



# LEUPHANA

UNIVERSITÄT LÜNEBURG



03ET1009A

Klimaneutraler Campus Leuphana Universität Lüneburg, Scharnhorststraße-Bockelsberg

Schlussbericht Teile I + II

August 2018

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

Oliver Opel, Karl F. Werner, Jan Geffken, Andreea Tribel, Nikolai Strodel,  
Irmhild Brüggem, Wolfgang Ruck

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den  
Autoren.

# Inhaltsverzeichnis

## Inhalt

Teil I: Darstellung des Vorhabens.....	7
1. Aufgabenstellung.....	7
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	9
3. Planung und Ablauf des Vorhabens .....	21
3.1 Status des Projektes: .....	21
3.2 Geplante Maßnahmen und innovative Projektinhalte.....	21
3.3 Arbeitsplan (EnEff:Stadt) .....	22
3.4 Arbeitsplan (EnOB) .....	23
3.5 Fortgeschriebene Vorhabensplanung .....	24
4. Stand der Wissenschaft und Technik .....	25
4.1 Integration erneuerbarer Energien in Energiesysteme .....	25
4.2 Gebäudeleittechnik / Ambient-Intelligence-Systeme / Embedded Systems .....	27
4.3 Niedertemperatur- und Abwärmenutzung / aktivierte PCM-Kühldecken .....	29
4.4 Vakuumisolationstechnik .....	31
4.5 Vakuumisulationspaneele .....	31
4.6 Vakuumverglasung .....	32
4.7 Aquiferwärmespeicherung .....	32
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	34
Teil II: Eingehende Darstellung der Verwendung der Zuwendung .....	37
1. Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse im Vergleich mit den vorgegebenen Zielen .....	37
1.1 Zusammenfassung der Ergebnisse und Zielerreichung.....	37
1.2 Bearbeitung des Arbeitsplanes und bedeutende Ergebnisse .....	41
1.2.1 Teil EnEff:Stadt .....	41
1.2.1.1 Umsetzung Einsparmaßnahmen der Bestandsgebäude / Energiecontracting .....	41
1.2.1.2 Vergabe Energieliefercontracting und Umsetzung Energiesystem.....	46
1.2.1.3 Öffentlichkeitsarbeit, Einbindung in die Lehre und Klimaschutzbestrebungen der Stadt Lüneburg .....	54
1.2.2 Teil EnOB.....	55
1.2.2.1 Prozess Zentralgebäudeneubau .....	55
1.2.2.2 Energetische Bewertung.....	70
1.2.2.3 Monitoringkonzept und Ambient Intelligence .....	75
2. Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	84
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	89

4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des Verwertungsplanes.....	90
5. Während der Durchführung an anderen Stellen bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens .....	91
6. Wissenschaftliche Veröffentlichungen.....	93



## Verzeichnis der Abbildungen

### Abbildungen

Abb. 1: Schema Erreichung des Klimaneutralitätsziels durch integrale Betrachtung der Bereiche bauliche Entwicklung, Energieversorgung und Verkehr.....	8
Abb. 2: Exergetisch sinnvolle Kaskadierung.....	8
Abb. 3: Sanierung des Campusnetzes in 2010.....	10
Abb. 4: Bestandsgebäude Campus Scharnhorststraße.....	10
Abb. 5: Ladenzeile.....	11
Abb. 6: Beginn Dachgeschossausbau Geb. 10.....	11
Abb. 7: Luftaufnahme des betrachteten Gebiets Bockelsberg.....	12
Abb. 8: Betrachtetes Gebiet Campus Scharnhorststraße/Bockelsberg und Siedlungstypen.....	13
Abb. 9: CO <sub>2</sub> – Emissionen der Universität (in t/a). Links: Gesamtemissionen. Rechts: Verkehr.....	13
Abb. 10: Präsentation der ersten Entstehungsschritte des Gebäudes.....	17
Abb. 11: Erste Entwürfe des Zentralgebäudeneubaus waren vor allem von der Energieeffizienz her noch verbesserungsfähig (große, südlich ausgerichtete Glasflächen).....	17
Abb. 12: Im Rahmen einer Summer-School in 2007 wurde der Entwurf kommentiert und ein erster Konzeptentwurf den Architekten übergeben.....	18
Abb. 13: Optimierungsschritte in der Vorplanungsphase.....	18
Abb. 14: Geplantes und in das Projekt eingebundenes neues Zentralgebäude.....	19
Abb. 15: Geologischer Schnitt durch den Salzstock Lüneburg.....	19
Abb. 16: Organisationsschema des Projekts.....	34
Abb. 17: Zugehörigkeit der einzelnen Projektpartner zu den Teilprojekten.....	34
Abb. 18: CO <sub>2</sub> -Emissionen durch die Energieversorgung des Campus Scharnhorststraße.....	37
Abb. 19: Primärenergiebedarfe der Campusgebäude vor und nach Einsparung im Vergleich mit dem neuen Zentralgebäude.....	38
Abb. 20: Primär- und Endenergiebedarfe des Zentralgebäudeneubaus.....	40
Abb. 21: Abnahme der Photovoltaikinstallation am 18.12.2013.....	45
Abb. 22: Exergetische Bewertung verschiedener Wärmeerzeugungskonzepte.....	47
Abb. 23: Modernisierung der Heizzentrale.....	48
Abb. 24: Modernisierung der Heizzentrale.....	49
Abb. 25: Integration Aquiferspeicher.....	50
Abb. 26: oben: Variante mit thermisch-hydraulisch getrennten Bohrungen.....	50

Abb. 27: li.: Wärmebereitstellung ohne, re.: Wärmebereitstellung mit Aquiferspeicher.....	51
Abb. 28: Wahrscheinlichkeitsbasierte Simulation des Aquiferwärmespeichers nach Monte-Carlo.....	51
Abb. 29: Wahrscheinlichkeitsbasierte Wirtschaftlichkeitsanalyse.....	52
Abb. 30: Grundriss des Erdgeschosses mit den vier Bauteilen.....	55
Abb. 31: Schnitt in Ost-West-Richtung.....	56
Abb. 32: Schnitt durch Auditorium und Foyer in Süd-Nord-Richtung.....	56
Abb. 33: Auditorium und Blick ins Foyer / Lüneburger Skyline.....	57
Abb. 34: Passive Energieeffizienz: Sommerlicher Wärmeschutz durch selbstverschattende Fassade...	58
Abb. 35: Schaltstufen der E-Control-Verglasung im Vergleich mit einer 33/25-Sonnenschutzverglasung.....	59
Abb. 36: Modellierter Raumtemperatur in einem mit E-Control ausgestatteten Schlechtraum.....	61
Abb. 37: Abdunkelungssollwerte für die 5 Stufen der E-Control-Verglasung.....	61
Abb. 38: Temperaturabhängige Auswahl der helligkeitsabhängigen Regelung.....	62
Abb. 39: E-Control-Regelung im Sommerfall > 24°C (max. Wärmeschutz).....	62
Abb. 40: E-Control-Regelung im Sommerfall < 20°C (Verschattung).....	63
Abb. 41: E-Control-Regelung im Winterfall (max. Stufe 3, Verschattung).....	63
Abb. 42: Übergabestation mit interner Kaskadierung 55/35°C und 35/25°C.....	64
Abb. 43: PCM-Kühldecken in den Besprechungsräumen des Bauteils Forschungszentrum.....	65
Abb. 44: Kühldecken-Anschluss mit Flexschläuchen.....	65
Abb. 45: Kühldecken-Anschluss mit Edelstahl-Wellrohr.....	66
Abb. 46: Cobiax-Deckenkonstruktion zur Einsparung von Beton und Stahl.....	68
Abb. 47: Mit E-Control ausgestattete Bereiche im Forschungszentrum.....	69
Abb. 48: Tageslichtabhängig gesteuerte Lichtbänder im Foyer.....	70
Abb. 49: EnEV-Berechnung (Endenergie) im Vergleich mit der dynamischen Modellierung.....	72
Abb. 50: Modellierter Jahreslastgänge Wärmebedarf (Referenzjahr).....	74
Abb. 51: Anordnung der Modellräume.....	76
Abb. 52: Schema Sensoren/Aktoren Modellräume.....	77
Abb. 53: CO <sub>2</sub> -Ampel zur direkten Information der Nutzer mit Aufzeichnung durch die GLT.....	77
Abb. 54: Beeinflussungsmöglichkeiten des Nutzerverhaltens.....	78
Abb. 55: Funktionsschema Ambient Intelligence.....	79

## Tabellenverzeichnis

### Tabellen

Tab. 1: Maßnahmen im Rahmen des Umweltmanagements der Universität.....	14
Tab. 2: Projektteilnehmer.....	36
Tab. 3: Treibhausgasbilanz der Energieversorgung Campus/Bockelsberg.....	53
Tab. 4: Gebäudeergebnisse Energiebedarf.....	71
Tab. 5: Qualität der Gebäudehülle im Vergleich zu EnEV 2009.....	73

## Verzeichnis der Anhänge

### Anhänge

Anhang I:	Bericht GTN Zusammenfassung
Anhang II:	Bericht EPA Modellierung Campus
Anhang III:	Masterarbeit Jan Geffken: Ambient Intelligence und Nutzerverhalten
Anhang IV:	Bachelorarbeit App-Gestaltung
Anhang V:	Dissertation Strodel: Wahrscheinlichkeitsbasierte Energiesystemanalyse
Anhang VI:	Bericht EPA Neubau
Anhang VII:	EnEV-Berechnung
Anhang VIII:	Monitoringkonzept
Anhang IX:	Bericht EPA Raumtemperaturen
Anhang X:	Bericht GFZ Potsdam
Anhang XI:	Bericht Eon ERC
Anhang XII:	Umwelterklärung Leuphana 2018
Anhang XIII:	Lastenheft Appentwicklung
Anhang XIV:	Studie Arup Vakuumisolierverglasung
Anhang XV:	Studie Arup PCM
Anhang XVI:	Studie Arup E-Control
Anhang XVII:	Dokumentation Steuerung Modellräume GfR
Anhang XVIII:	Veröffentlichung Energy Journal Opel et al. 2017

## Teil I: Darstellung des Vorhabens

### 1. Aufgabenstellung

Zielsetzung des Projekts war die Erreichung der Klimaneutralität des Campus Scharnhorststraße als Teil der Umsetzung des Konzeptes „klimaneutrale Universität“. Der Campus sollte dabei mindestens Nullenergie-Campus im Sinne einer primärenergetisch ausgeglichenen Energiebilanz werden. Darüber hinausgehende Stromeinspeisung aus EE-Erzeugung sowie der ausschließliche Bezug von Ökostrom seit 2012 sollen zu einer mindestens ausgeglichenen CO<sub>2</sub>-Bilanz des Universitätsbetriebs (inklusive Dienstreisen und Pendelverkehre) führen.

Der Fokus lag hierbei auf Energieeinsparmaßnahmen (Möglichst 50% Reduzierung Endenergie im Bestand, wobei die Ziegelfassade gemäß architektonischem Masterplan erhalten bleiben soll), sowie die Herstellung einer energieeffizienten und exergetisch sinnvollen Energieversorgung aus erneuerbaren Energien (KWK, kaskadierte Wärmenutzung, thermische Speicherung, PV) sowie der intensive Einbezug des Faktors Nutzerverhalten (Ambient Intelligence-System).

Durch die hinsichtlich des Nahwärmesystems mit dem Gebiet Bockelsberg verschränkte Energieversorgung sollte das versorgte Stadtgebiet quartiersweit betrachtet werden. Dabei sollten neben der Energieversorgung auch Energieeffizienz- und Einsparpotentiale im Stadtgebiet Bockelsberg in Zusammenarbeit mit der städtischen Wohnungsbaugesellschaft LüWoBau identifiziert und die Umsetzung katalysiert werden. Ziel des Projekts war es somit, neben bzw. auch durch die genannten Ziele im Bereich klimaneutrale Universität/Campus, Wegbereiter und Katalysator für ein energieeffizientes sowie vorwiegend aus EE versorgtes Lüneburg zu sein. Hierzu sollte eng mit der Stadt sowie dem Landkreis Lüneburg zusammengearbeitet werden.

Da die Verkehrsemissionen sowie Emissionen im Zusammenhang bspw. mit Verpflegung und Beschaffung von Arbeitsmaterialien und Papier nicht vollständig vermieden werden können, sollte der bisherige Ausgleich durch den Kauf von Zertifikaten in Zukunft durch eine Substitution „aus eigener Kraft“ im Rahmen einer integralen Betrachtung (Abb. 1) ersetzt werden.

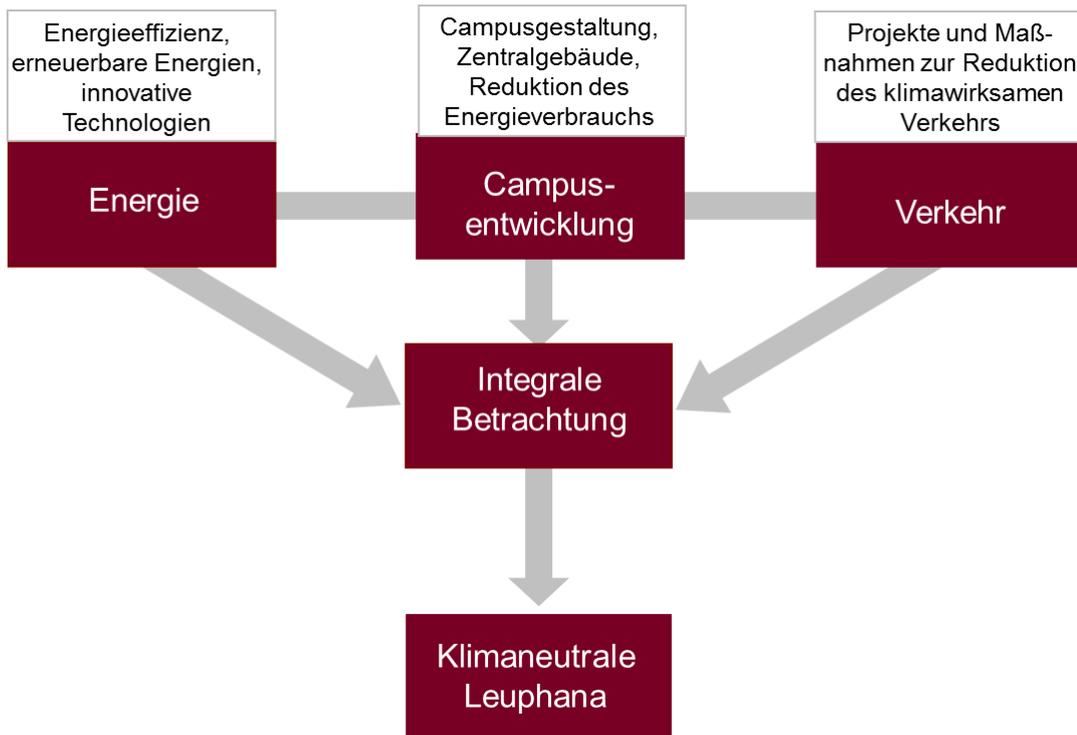


Abb. 1: Schema Erreichung des Klimaneutralitätsziels durch integrale Betrachtung der Bereiche bauliche Entwicklung, Energieversorgung und Verkehr.

Bei der Umsetzung sollte das Ziel einer exergetisch sinnvollen Kaskadierung verfolgt werden (Abb. 2).

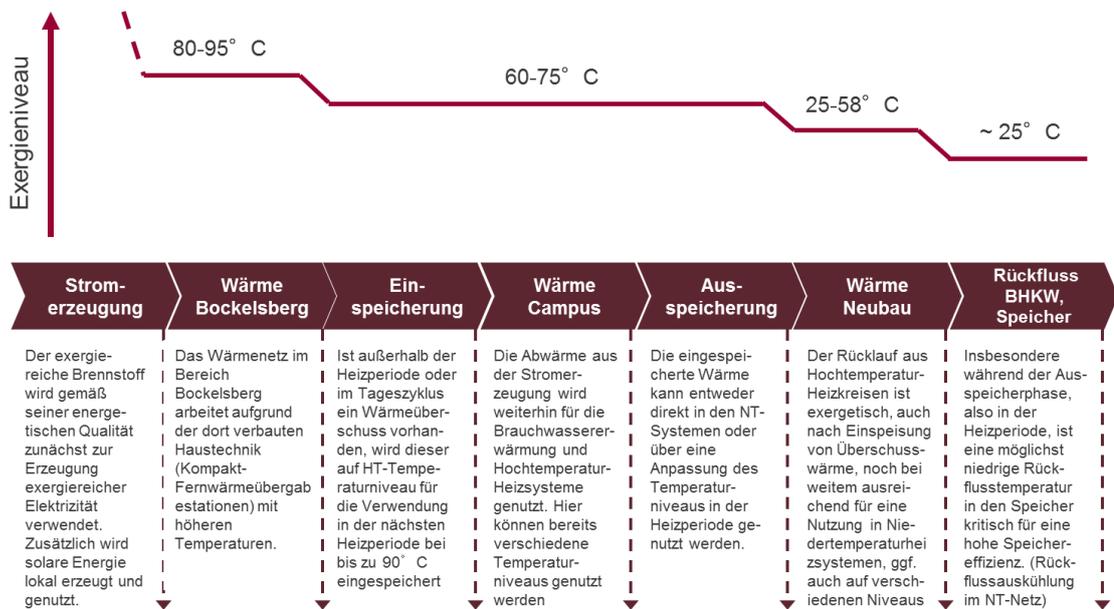


Abb. 2: Exergetisch sinnvolle Kaskadierung

Das neue, energieeffiziente Zentralgebäude ( $< 100 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  Endenergie) sollte dabei als funktionaler Bestandteil in das Energiesystem eingebunden werden (Niedrigexergiesysteme zur Rücklaufauskühlung im Campussystem, je nach Netz-/Bedarfsstruktur flexible Wärmeversorgung auf Mittel- und Niedertemperaturniveau). Hier sollten zudem innovative Technologien im Sinne des EnBau-Programms zum Einsatz kommen.

Im Bereich des Campus sollte durch den Dachgeschossausbau sowie den Zentralgebäudeneubau eine den Gesamtversiegelungsgrad nur wenig (von 70% auf 80%) erhöhende städtebauliche Verdichtung durchgeführt werden, die zum einen der weiteren Entwicklung der Universität Raum zur Verfügung stellt sowie durch die mögliche Zusammenlegung von Standorten am zentralen Campus Pendelverkehre reduziert.

Das neue Zentralgebäude sollte neben dem Audimax Büroflächen sowie Multifunktionsflächen für verschiedenartige Veranstaltungen bereitstellen, den Campuscharakter und die Kommunikation sowie die Freiheit des Geistes betonen.

Weitere Zielsetzung des Projekts war es daher, die effiziente Bedienung dieser besonderen Bedarfe zu demonstrieren und über ein Monitoringkonzept auswertbar zu machen.

## 2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die alte Kaserne an der Scharnhorststraße, 1936 errichtet, erfuhr in den 90er-Jahren im nördlichen Teil unter Nutzung der alten Kasernengebäude die Konversion zum Universitätsgelände, im südlichen Teil befindet sich heute das Wohngebiet Bockelsberg mit 504 Wohneinheiten, diversen Geschäften und Gewerbebetrieben.

Bereits im Zuge der Konversion wurde für die Energieversorgung des Bockelsberg auf Kraft-Wärme-Kopplung gesetzt. Im Bereich der Universität wurde das noch aus den 30er-Jahren stammende Dampfnetz als Wärmenetz verwendet, das 2010 vor Beginn des Projekts saniert wurde (Abb. 3).



Abb. 3: Sanierung des Campusnetzes in 2010

Weiterhin gibt es ein universitätseigenes Niederspannungsnetz für die Stromversorgung. Neben den 14 durch die Universität genutzten alten Kasernengebäuden (Abb. 4) werden 2 ehemalige Gebäude in privater Trägerschaft als Studentenwohnheim verwendet und verfügen bereits über isolierverglaste Fenster, während die durch die Universität genutzten Gebäude überwiegend noch Einscheiben-Doppel-Kastenfenster besitzen.



- ehemaliges Kasernengelände
- Bausubstanz 30er Jahre  
Vollziegelmauerwerk ~50 cm  
➤ U-Wert ca. 1 W/m<sup>2</sup>K
- Doppel-Holzkastenfenster  
Einscheibenverglasung  
➤ U-Wert ca. 3,5 W/m<sup>2</sup>K
- teilweise (noch) ungedämmte Dächer  
➤ Seit 2005 sukzessive gedämmt u. ausgebaut

Abb. 4: Bestandsgebäude Campus Scharnhorststraße

Die in den 90er-Jahren vorgenommenen Erweiterungen (Speisesaal, Hörsäle, Bibliothek) sowie ausgebauten Hallen (Ladenzelle, Studio 21) verfügen über Isolierverglasung und dem damaligen Baustandard entsprechender Dämmung (Abb. 5).



Abb. 5: Ladenzeile

Die Dachgeschosse der Universitätsgebäude wurden von 2007-2013 sukzessive nach jeweils gültiger EnEV ausgebaut (seit Projektstart 6.713 m<sup>2</sup>, Abb. 6) und verfügen über Isolierverglasung bzw. Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung.



Abb. 6: Beginn Dachgeschossausbau Geb. 10

Die Mensa, der Speisesaal, die Hörsäle und die Bibliothek verfügen über mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung.

Die in der Ladenzeile untergebrachten Drittnutzer auf dem Campus (Sparkassenfiliale, Techniker Krankenkasse, Unibuch, Campus Copy) sowie das (Fitness-) Studio 21 werden wie ein Kindergarten über das Wärmenetz mit versorgt.

Versorgt wird das Areal über ein Nahwärmesystem aus einer Heizzentrale (2 x 1,3 MWth Erdgas-BHKW, 1 x 3,5 MW sowie 1 x 6,5 MW Erdgas-Kessel, seit 2009 zusätzlich ein 500 kWel Biogas-BHKW im Grundlastbetrieb), welche ebenfalls das anliegende Gebiet Bockelsberg versorgt (Abb. 7).



Abb. 7: Luftaufnahme des betrachteten Gebiets Bockelsberg mit Universitätscampus im Süden. Neben den Universitätsgebäuden finden sich dort gewerbliche Gebäude sowie Wohnbebauung mittlerer Dichte. Abb. 8 gibt die im Bereich Campus Scharnhorststraße/Bockelsberg anzutreffenden Siedlungstypen wieder (nach Blesl).

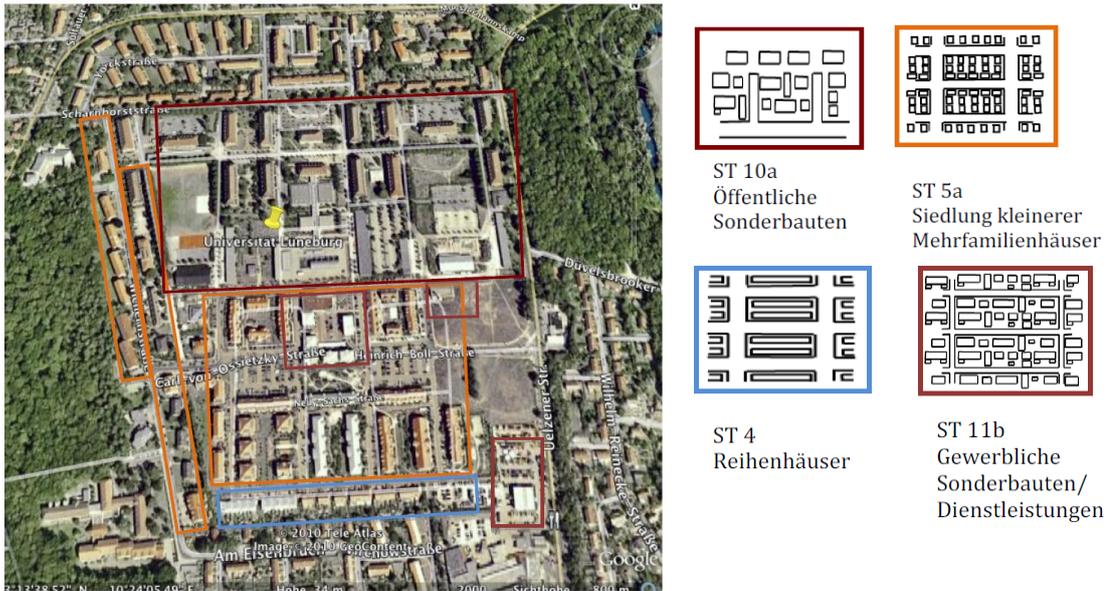


Abb. 8: Betrachtetes Gebiet Campus Scharnhorststraße/Bockelsberg und Siedlungstypen nach Blesl.

Der durchschnittliche Heizwärmebedarf in den Bestandsgebäuden betrug ca. 165 kWh/m<sup>2</sup>a, der Campus benötigte insgesamt ca. 6-6,5 GWh/a Wärme und 2,5 GWh/a Strom. Das Bockelsberg-Gebiet nimmt nochmals ca. 5,5 GWh/a Wärme aus der Heizzentrale ab. Kälte wird nur dezentral zur Kühlung von Laboratorien (Geb. 13, ca. 50 kW) sowie des Serverraums (Geb. 7, ca. 45 kW) und Mensa (ca. 25 kW) benötigt, eine Klimatisierung erfolgt nicht.

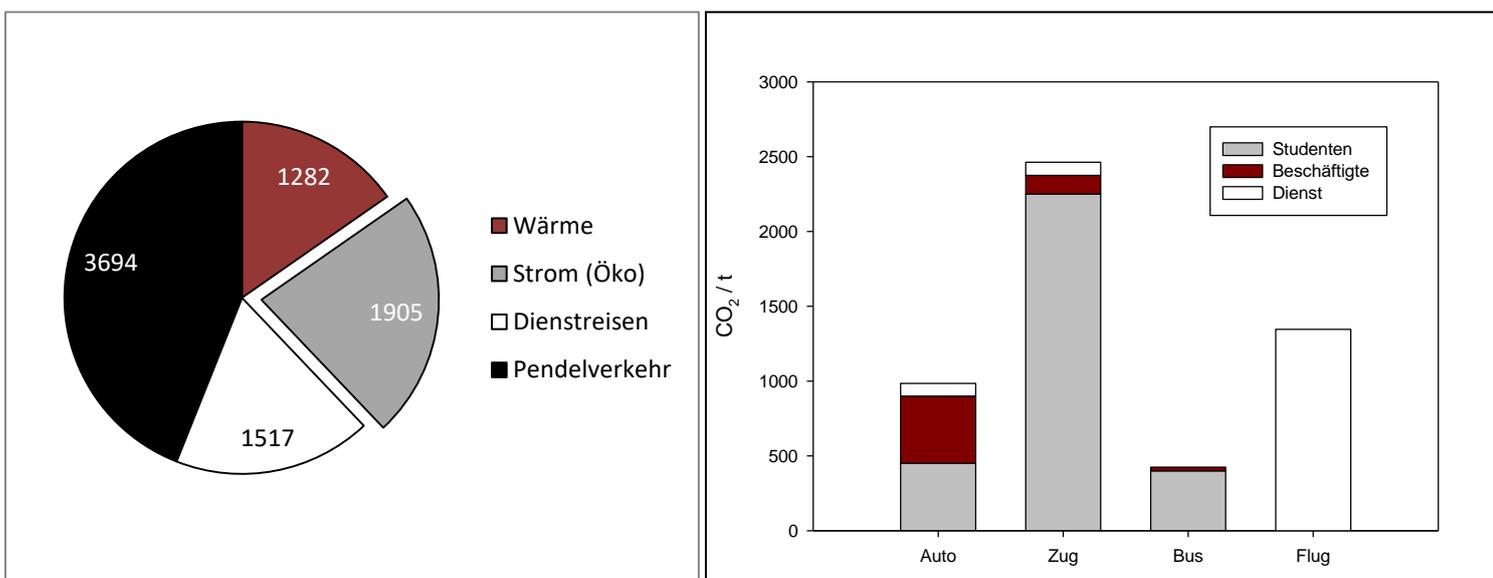


Abb. 9: CO<sub>2</sub> – Emissionen der Universität (in t/a). Links: Gesamtemissionen. Rechts: Verkehr.

Neben dem Hauptcampus bestehen 2 weitere Standorte, Volgershall (1,3 GWh/a th., 569 MWh/a el.) und Rotes Feld (1,3 GWh/a th., 431 MWh/a el.), die langfristig in den Hauptcampus integriert werden sollten. Allerdings reichten die erweiterten Kapazitäten des Hauptcampus hierfür nicht aus. Voraussichtlich wird der Standort Rotes Feld teilweise auch in Zukunft weiter benötigt. Abb. 9 fasst die gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen der 3 Standorte der Universität zusammen. Strom wird seit 2012 vollständig aus Erneuerbaren Energien bezogen.

Ein weiterer, energetisch sowie bezüglich der Treibhausgasemissionen bedeutsamer Bereich ist der Verkehr. Die direkt mit dem Universitätsbetrieb zusammenhängenden CO<sub>2</sub>-Emissionen aus den Pendelverkehren vom / zum Campus (Beschäftigte und Studenten, Abb. 9 re., Datenerhebung von 2007, „beyond Tier 3“) sowie Dienstreisen (2012, „Tier 3“) stellen ca. zwei Drittel der Gesamt-CO<sub>2</sub>-Emissionen der Universität.

Bisherige Maßnahmen zur Verringerung der Energieverbräuche sind nachfolgend in Tab. 1 dargestellt.

Tab. 1: Maßnahmen im Rahmen des Umweltmanagements der Universität

CO <sub>2</sub> -Reduktion	Zeitraum	Maßnahme
3.500 kg	jährlich	Installation neuer Leuchten in der Turnhalle seit August 2011
22 Tonnen	Jahr 2011	Photovoltaikanlage auf der Turnhalle
Daten liegen Anfang 2012 vor		Versand der Post mit GoGreen seit 2011
wird ermittelt	jährlich	Effiziente Regalbeleuchtung in der Universitätsbibliothek seit 2011
22 Tonnen	jährlich	Sanierung des Wärmenetzes in 2010
wird ermittelt	ab Oktober 2010	Anteil an Biogas für die Bereitstellung von Wärme am Standort Volgershall
17 Tonnen		Photovoltaikanlage auf Gebäude 9, 01.01.2006 bis 31.12.2011
19,5 Tonnen	jährlich ab 01.01.2010	Analyse der Lichtanlage in der Bibliothek: Festlegung von Schaltergruppen für Betriebszeiten, Deaktivierung von Leuchten u.a.
21 Tonnen	jährlich	In der Universitätsbibliothek durch Verschieben der Reinigungszeiten seit 2005
90 Tonnen	WS 06/07	"Nix Verschwenden"; Kampagne zur Verhaltensänderung in der gesamten Universität
6,6 Tonnen	WS 04/05	Energy Trophy; Kampagne zur Verhaltensänderung in einem Gebäude
103 Tonnen	seit 2002	Wärme einsparen zwischen Weihnachten und Neujahr
4,4 Tonnen	WS 01	Kampagne zur Verhaltensänderung in einem Gebäude
21 Tonnen	jährlich	Technische Optimierungen im Gebäude 14 seit 2001

Sie fanden im Rahmen der regulären Wartung (Austausch Leuchten, Heizungspumpen) statt.

Weiterhin wurden zahlreiche Nutzerverhaltensbasierte Maßnahmen zu den Themen „richtig Lüften“,

„Licht aus“ und weiteren Nachhaltigkeitsthemen durchgeführt. Die ÖPNV-Anbindung wurde (mit sehr guter Annahmehquote) deutlich verbessert (direkte Busverbindung vom/zum Bahnhof Lüneburg, passend zu den Veranstaltungszeiten und Zugverbindungen) sowie ein Angebot an Dienstfahrrädern geschaffen. Zukünftig soll ein Parkraumbewirtschaftungssystem weitere Anreize zur Anreise mit ÖPNV und Fahrrädern geben. Diese Maßnahmen wurden, neben anderen, stetigen Maßnahmen zur Ressourcenverbrauchsreduzierung und weiteren Nachhaltigkeitsmaßnahmen durch eine seit dem Jahr 2000 bestehende EMAS-Zertifizierung und den im zwei-Jahres-Turnus (inzwischen jährlich) erstellten Nachhaltigkeitsbericht dokumentiert.

Weitere Maßnahmen in diesem Rahmen waren die Installation einer energieeffizienten Serverkühlung im Zuge erweiterter Rechenkapazität (vorher erfolgte die Kühlung mit Splitgeräten, inzwischen erfolgt dies mit effizienteren Kältemaschinen und einem größeren Anteil freier Kühlung erfolgen) sowie eine testweise Erweiterung der Leihangebote (Diensträder) auf E-Bikes. Weiterhin wurde durch eine zentrale Beschaffung nach Nachhaltigkeitskriterien, den Einsatz von Elektrohandtrocknern zur Vermeidung des hohen Papierhandtücherverbrauchs und besserer Mülltrennung weitere Nachhaltigkeitspotentiale realisiert, die neben Beiträgen zur nachhaltigen Energieversorgung, Einsparpotentialen auf dem Campus und Nutzermaßnahmen/Ambient Intelligence von einem studentischen transdisziplinären Lehrforschungsprojekt im Master Nachhaltigkeitswissenschaften über 2 Semester erarbeitet wurden.

Nachhaltigkeit ist als eines der Leitbilder der Universität auch mit Bezug zu Energiethemen fest in der Lehre verankert. Veranstaltungen zu den Themen Ressourceneffizienz, Energieverbräuche/Energiesparen, Energiewahrnehmung/Energiebewusstsein, Energiewende, Energieökonomie, Energieeffizienz und erneuerbare Energien wurden und werden insbesondere durch die Fakultät Nachhaltigkeit im Rahmen des Leuphana-Semesters („Studium Generale“ im 1. Semester mit anschließend stattfindender Nachhaltigkeits-Konferenz) sowie im Komplementärstudium des Leuphana-Bachelor als Wahlpflichtveranstaltungen fächerübergreifend für alle Studierenden angeboten. Darüber hinaus fanden und finden im Bereich des Masterstudienganges Nachhaltigkeitswissenschaften/Sustainability Sciences transdisziplinäre Projektseminare zu Themen wie nachhaltiger Gemeinde- und Stadtentwicklung, integralen Energiesystemen und nachhaltiger Landwirtschaft mit 2 Semestern Laufzeit als Projektstudium im direkten Zusammenhang mit der Forschung und entsprechenden Projekten statt.

Die bauliche Entwicklung des Campus Scharnhorststraße basiert auf einer Flächenplanung, die im Zuge einer profilbildenden Neuausrichtung der Universität (mit den Säulen Humanismus, Nachhaltigkeit, Handlungsorientierung) entstand. Sie folgte zeitlich auf die Fusion der Universität Lüneburg mit der Fachhochschule Nordostniedersachsen und die Umwandlung in eine Stiftungsuniversität. Basis ist die Zusammenführung der 3 Lüneburger Standorte auf dem Campus Scharnhorststraße, um Pendelverkehre zu vermeiden und die Vorteile eines Universitätscampus vollständig nutzen zu können. Zeitgleich mit der Aufnahme der Planungen für die bauliche Campuserwicklung wurde die „klimaneutrale Universität“ als Ziel festgelegt.

Aufgrund steigenden Raumbedarfs wurden seit 2007 sukzessive bislang ungenutzte und ungedämmte Dachgeschosse ausgebaut und gedämmt. Das im Bereich des Campus in Besitz der Universität befindliche Nahwärmenetz wurde bereits im Sommer 2010 unter Verwendung von Kunststoffmantelrohr der Dämmstufe 3 saniert. Es fehlte ein großer Hörsaal für die Durchführung von Veranstaltungen für eine vollständige Semesterkohorte, für fächerübergreifende Veranstaltungen im Leuphana-Semester (Studium Generale) und Komplementärstudium sowie Gastvorlesungen, akademische Feiern und Veranstaltungen. Weiterhin sollten eine Cafeteria, Seminarräume, Arbeitsräume für Forscher, Gruppenräume und flexibel zu nutzende Flächen für Studierende geschaffen werden. Um eine hohe Auslastung zu gewährleisten, sollte zusätzlich eine Funktionalität als Stadthalle, für Musikveranstaltungen, öffentliche Lesungen, Messen und Ausstellungen gegeben sein.

Der partizipative Prozess zur Ideenfindung, unter anderen in Form von Seminaren in Lüneburg und New York, startete in 2006 (Abb. 10).



Abb. 10: Daniel Libeskind und Holm Keller bei der Präsentation der ersten Entstehungsschritte des Gebäudes



Abb. 11: Erste Entwürfe des Zentralgebäudeneubaus waren vor allem von der Energieeffizienz her noch verbesserungsfähig (große, südlich ausgerichtete Glasflächen)

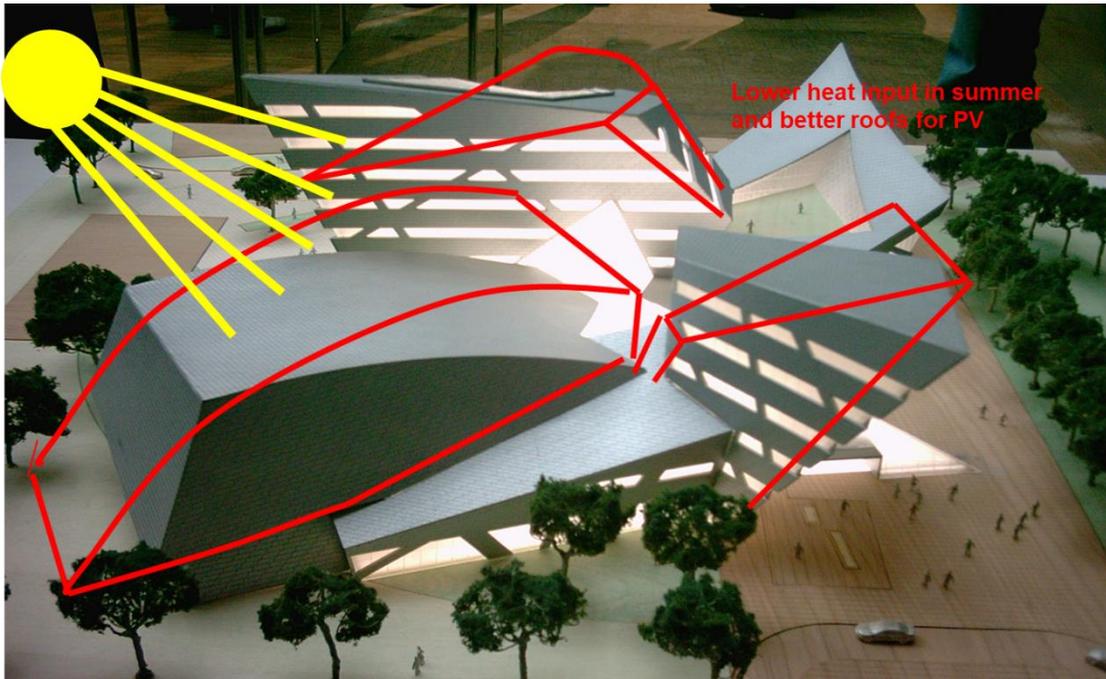


Abb. 12: Im Rahmen einer Summer-School in 2007 wurde der Entwurf kommentiert und ein erster Konzeptentwurf den Architekten übergeben.

Bereits in der Vorplanung wurde die Gebäudekubatur unter Mitwirkung studentischer Seminare und einer Summerschool in einem universitätsweiten partizipativen Prozess optimiert (Abb. 11-13).

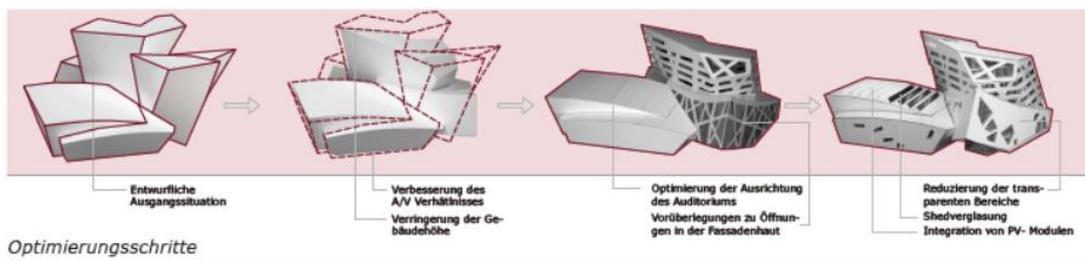


Abb. 13: Optimierungsschritte in der Vorplanungsphase

Das neue Gebäude (Abb. 14) sollte das international sichtbare Zeichen der als Bologna-Modelluniversität inhaltlich konsequent an inter- und transdisziplinärer Forschung und Lehre ausgerichteten Profilierung darstellen.



Abb. 14: Geplantes und in das Projekt eingebundenes neues Zentralgebäude der Leuphana Universität nach Entwurf von Prof. Daniel Libeskind, der ebenfalls den architektonischen Masterplan für die Campusgestaltung entwickelt hat (EnOB/EnBau-Projekt als Teil der Campus- bzw. quartiersweiten Betrachtung im EnEff-Zusammenhang).

Die hinsichtlich saisonaler Wärmespeicherung relevante Geologie am geplanten Campus Scharnhorststraße ist geprägt durch das nur rund 2,5 km entfernte Zentrum eines offenen Salzstockes. Durch diese Hebung sind Schichten, die im norddeutschen Tiefland üblicherweise in größeren Tiefen vorkommen, relativ oberflächennah vorzufinden (Abb. 15). Der Standort ist jedoch weit genug vom Zentrum des Salzstockes entfernt, um Risiken einer ausschließen zu können.

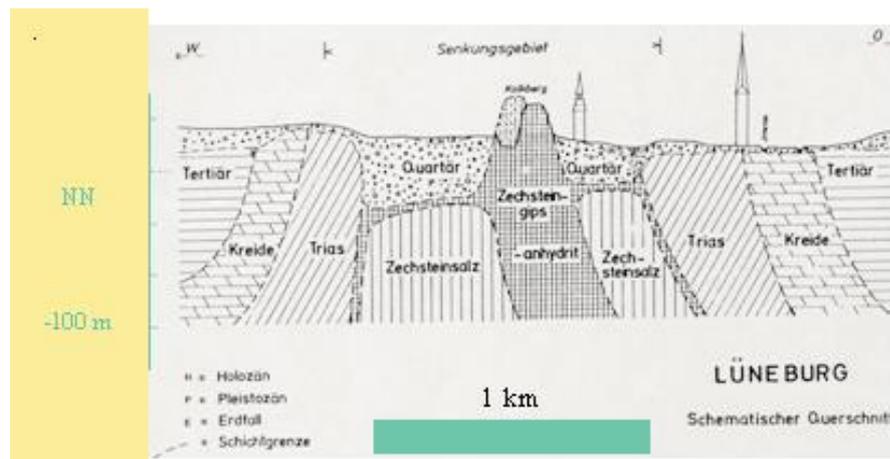


Abb. 15: Geologischer Schnitt durch den Salzstock Lüneburg (Sympos. Int. Assoz. Ing. Geol., Hannover 1973)

Eine Bestandsaufnahme der beim LBEG, Niedersächsischen Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, vorhandenen Bohrdaten ergab eine voraussichtliche Eignung eines am Standort

Scharnhorststraße in etwa 350-450 m Tiefe gelegenen, ca. 20 m mächtigen Sandsteinkomplex im oberen Eozän des Tertiär für eine Speicherung von Wärme in einem Grundwasserleiter (Aquifer). Gemäß einer durch das LBEG vorgenommenen Auswertung von Tiefbohrungen im Umkreis von 10km östlich bzw. südöstlich von Lüneburg (in Richtung des geplanten Standortes) befinden sich unterhalb im oberen und mittleren Eozän voraussichtlich weitere Feinsandsteinlagen. Die Basis Mittel-/Oberoligozän liegt am Standort bei etwa -350m NN, die Basis Mitteleozän/ Unteroligozän bei etwa -450m NN. Die entsprechenden Sandsteinlagen befinden sich soweit tatsächlich vorhanden zwischen diesen beiden Grenzwerten und wären somit für eine wirtschaftlich sinnvolle Nutzung geeignet. Die sich in einer Tiefe von 100-250m befindenden Braunkohlensande des Miozän sind für eine Aquiferwärmespeicherung nicht geeignet, da diese als Trinkwasseraquifere genutzt werden.

### 3. Planung und Ablauf des Vorhabens

#### 3.1 Status des Projektes:

- Bestandsgebäude und Energiesystem: Planungsphase
- EnBau-Teilprojekt neues Zentralgebäude: teilweise Ausführungsplanung, Ausführungsphase

#### 3.2 Geplante Maßnahmen und innovative Projektinhalte

- Konzepterstellung Sanierung Bestandsgebäude und Energiesystem:
  - Wirtschaftliche und funktionsbasierte Vergabe (Gleichzeitige Ausschreibung Energieeinspar- und Energieliefercontracting als Lose getrennt in einem zweistufigen Verhandlungsverfahren mit vorgeschaltetem Teilnehmerwettbewerb, Bewertung nach Energie- und Exergieeffizienz- sowie Nachhaltigkeitskriterien)
  - integrale Planungsphase zusammen mit den Contractingpartnern (teilweise während, größtenteils nach Vergabe)
  - Akteursansprache und -Einbindung, transdisziplinär-methodische und integrative Begleitung
  - Machbarkeitsstudie Aquiferwärmespeicher und Entwicklung exergieeffizientes Versorgungskonzept
  - Gebäudemodellierung Bestandsgebäude, Sanierung und Optimierungspotentiale TGA
- Umsetzung Zentralgebäudeneubau:
  - Schaltbare Verglasung
  - Innovatives Lüftungssystem (freie Lüftung und Luftführung im Doppelboden)
  - VIP-Dämmung und PCM-Kühldecken in ausgewählten Bereichen
  - LED-Beleuchtungskonzept
  - Monitoring- und Datenmanagement-/Datenanalysekonzept
  - „Ambient Intelligence“ – Nutzer/Gebäude Kommunikationssystem
  - Flexibles Niedrigexergie-Heizungssystem mit zwei Temperaturniveaus zur effizienten Einbindung in das Campusnetz

### 3.3 Arbeitsplan (EnEff:Stadt)

- Zweistufige Variantenbetrachtung: Konzeptauswahl auf der Grundlage einer öffentlichen Ausschreibung im Verhandlungsverfahren als allgemein übertragbares und wirtschaftliches Planungsmittel mit Bewertung anhand eines modellierten Referenzszenarios sowie nach Konzeptauswahl simulationsgestützte integrale Planung und Variantenbetrachtung/Bewertung unter Einbezug der verschiedenen Akteure
- die Integration verschiedener Akteure im Stadtgebiet, EVU, Universität, PPP-Nehmer Zentralgebäude-Neubau sowie weitere Wärmeabnehmer im derzeit bestehenden Wärmenetz (LüWoBau Lüneburger Wohnungsbau GmbH und Privatpersonen im Gebiet Bockelsberg) erfolgt aufbauend auf vorangegangenen Prozessen (s.u.) durch den Einsatz von stakeholderbasierten Kommunikationskonzepten aus dem Nachhaltigkeitsmanagement sowie im Rahmen eines 2-semesterigen studentischen Lehrforschungsprojekts.
- Es erfolgt die Konzeptionierung, Auslegung und integrale Planung eines innovativen stadtteilweiten Energiesystems, das sowohl eine hohe Effizienz als auch eine flexible Betriebsweise zulässt:
  - Innovative technische Konzeption und von vornherein integrale und auf Partizipation basierende Planung auf der technischen Ebene
  - Untersuchung von Möglichkeiten und Potentialen einer exergetischen Anpassung der Heizungssysteme in den Bestandsgebäuden, evtl. Nutzung flexibler Vorlauftemperaturen
  - Untersuchung von zusätzlichen Potentialen im Rahmen der Wohnungsbebauung im Bockelsberger Bestand
- Im Rahmen der Phase I wird abhängig von der gewählten Konzeptionierung bzw. Variante ein angepasstes, detailliertes Monitoringkonzept erarbeitet und in die Detailplanung integriert

Folgende Ansätze und Innovationen werden in dem geplanten Vorhaben eingesetzt und untersucht:

- Flexible Abwärme- und Niedrigexergienutzung:
  - Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung mit saisonaler Wärmespeicherung und besonderem Augenmerk auf die bestmögliche Integration des Wärmespeichers (Optimierung der Rückflusstemperaturen, Nutzung des Rückflusses aus den Bestandsgebäuden oder direkte gespeicherte Wärme aus dem Wärmespeicher je nach Betriebssituation)

- Exergetisch sinnvolle Energienutzungskaskade und Wärmenutzung auf verschiedenen Temperaturniveaus
- Intelligente Steuerung und dadurch flexible Niedrigexergie- und Abwärmenutzung im in das Energiesystem eingebundenen Zentralgebäude, ggf. ebenfalls Einsatz in den Bestandsgebäuden
- Intelligente Steuerung des Wärmenetzes bzw. Untersuchung der Möglichkeiten innovativer Regelungstechnik auf Basis eines verteilten autonomen, agentenbasierten Systems analog dem Ambient-Intelligence-System im Zentralgebäude
- Eine exergiebasierte Bewertung der Energiekonzepte erfolgt zusätzlich zur (Primär-) energetischen Bewertung
  - Einbindung/Nutzung erneuerbarer Energien (Es ist die Versorgung aus 100% Erneuerbaren geplant, bspw. Biogas-KWK(K) mit Photovoltaik/Solarthermie und Wärmespeicherung, nach Konzeptbewertung)
  - LED-Technik für die Beleuchtungssysteme im neuen Zentralgebäude und ggf. in den Bestandsgebäuden (nach Variantenprüfung)
  - Innovative Wärmedämmtechnik (Vakuumverglasung und Vakuumdämmpaneele) und ggf. nach Variantenprüfung in der Sanierung der Bestandsgebäude zur Erhaltung der Ziegelfassade

### 3.4 Arbeitsplan (EnOB)

- Flexible Niedrigexergie- und Abwärmenutzung, Anschlussfähigkeit zum geplanten Energiesystem Campus-Bockelsberg: Zusammenstellung planungsrelevanter Parameter und Analyse von Abhängigkeiten Mitarbeit, Überwachung und Hilfestellung Ausführungsplanung, Ausschreibung
- Wiss. Beratung und Begleitung nachhaltige Planung / Bau: Begleitung und Überwachung der relevanten Planungs- und Ausführungsprozesse aus Sicht der nachhaltigen Konzeption.
- Monitoringkonzept: Ausformulierung des Konzepts zur Überwachung und Analyse der energetischen Performance des Gesamtgebäudes mit Unterteilung in verschiedene Nutzungs- und Systemebenen sowie sozioökologische Aspekte des Nutzerverhaltens in 12 Modellräumen (6 Räume mit Ambient Intelligence Ausstattung und 6 Referenzräume, Einplatz- und Mehrplatzbüros, Seminarräume). Erarbeitung eines Konzepts zum Monitoring von Komfortparametern in den Modellräumen (insb. CO<sub>2</sub>, Luftfeuchtigkeit) und der

sensorischen Evaluation der Qualität der Gebäudeaußenhülle an relevanten Messpunkten und innovativen Fassadenelementen (Prof. Wolfrum, HS Karlsruhe), Erarbeitung eines Konzeptes und einer Methodik zur Datenintegration und Auswertung.

- Ambient Intelligence und nachhaltiges Facility-Management: In den Modellräumen soll intelligente Technologie zur Nutzer-gebäude-Interaktion eingesetzt und untersucht werden. Erfasste Informationen (bspw. individuelle Energieverbräuche) sollten für Bonus-Malus-Systeme bzw. zur Motivation umweltgerechten Verhaltens eingesetzt werden.

### 3.5 Fortgeschriebene Vorhabensplanung

#### **10/2010 Projektbeginn**

11/2011 – 08/2013 Ausführungsplanung Zentralgebäude, teilw. baubegleitend

01/2011 – 09/2012 Ausschreibung und Vergabe Energiesystem-Partner EVU

01/2012 – 06/2013 Integrale Planung und Variantenbetrachtung Energiesystem

01/2012 – 12/2014 Ausschreibung und Vergabe Zentralgebäude, gewerkeweise

#### **03/2012 Entscheidung Partner EVU**

07/2012 – 06/2013 Detailplanung Energiesystem und Einsparmaßnahmen Campus

#### **11/2012 Baubeginn Energiesystem und Umsetzung Einsparmaßnahmen**

11/2013 – 09/2014 Umsetzung Einsparmaßnahmen Campus

06/2013 – 12/2014 Wirtschaftlichkeit Aquiferspeicher

#### **03/2012 Baubeginn Zentralgebäude/Aushebung Baugrube**

08/2012 – 10/2016 Baudurchführung

#### **01/2015 Richtfest Zentralgebäude**

02/2015 – 02/2016 Fassade/Dach

09/2015 – 05/2016 TGA Leitungsinstallation

05/2016 – 12/2016 TGA Feininstallation

#### **12/2016 Ende Phase I EnOB**

#### **01/2017 Beginn Phase II EnOB**

01/2017 – 09/2017 Probetrieb und Optimierung

#### **09/2017 Beginn Vollbetrieb**

09/2017 – 08/2020 Monitoring

#### **08/2020 Ende Phase II**

## 4. Stand der Wissenschaft und Technik

### 4.1 Integration erneuerbarer Energien in Energiesysteme

Die Forschung auf dem Gebiet der Integration erneuerbarer Energien in niedrigexergiebasierte Nahwärmesysteme hat in den vergangenen Jahren deutliche Fortschritte verzeichnen können. Insbesondere für die Integration solarthermischer Wärmeengewinnung sind dabei Speichertechnologien für die saisonale Wärmespeicherung unverzichtbar. Hierfür bestehen verschiedene Möglichkeiten [1]. Sinnvoll ist nach wie vor eine zentrale Speicherung auf Nahwärmenetzebene unter der Verwendung von Wasser als primäres Speichermedium mit den bekannten Vorteilen hoher Wärmespeicherkapazität, geringer Kosten und geringem Umweltrisiko. Eine Reihe von Anlagen mit Wärmespeichertechnik auf der Basis von Erdsonden- und Erdbeckenspeichern und oberirdischen Wasserspeichern, aber auch Aquiferspeichern ist im Rahmen von Modellsiedlungen (eine Aufstellung findet sich in [1], darunter bspw. Attenkirchen [2], München Ackermannbogen, Rostock [3]) erfolgreich in Betrieb. Bei diesen Projekten hat sich die gerade bei der Planung von Niedrigexergiesystemen vorhandene Notwendigkeit einer integralen Planung gezeigt, wobei die Solarthermie 2000 (plus)-Projekte hauptsächlich mit neu gebauten Wohngebäuden kombinierte Systeme darstellen.

Hauptprobleme sind die Brauchwasserbereitung und die Notwendigkeit einer möglichst geringen Speicherrückflusstemperatur, die sich nur mit einer optimierten und abgestimmten, verbraucherseitigen Haustechnik erreichen lässt und die die Speichereffizienz und Kapazität direkt beeinflusst [4].

Weitere Anlagen und Pilotprojekte zur Integration erneuerbarer in Nah- bzw. Fernwärmesysteme basieren auf der Nutzung von Biomassefeuerung (wie bspw. Holzpellets), Biogas und Geothermie. Hier wird oftmals eine für die KWK-Nutzung ausgelegte Grundlastanlage (Geothermie oder andere Erneuerbare) mit einem Spitzenlastkessel (fossil oder Biomasse) kombiniert (bspw. Geothermie Unterhaching). Aufgrund der erzielbaren hohen Vorlauftemperaturen stellt die Heizungstechnik sowie die Brauchwassererzeugung kein Problem dar. Auf eine saisonale Speicherung wird in diesen Fällen zumeist verzichtet, hier stellt sich eine (Biomasse-) Kessellösung häufig ökonomisch besser dar, jedoch unter Verzicht auf eine KWK-Erzeugung in der Mittel- und evtl. Spitzenlast.

Eine Erhöhung des KWK-Anteils an der Wärme- und Strombereitstellung unter Vermeidung bzw. Minimierung der Nutzung von Spitzenlastanlagen ist demgegenüber vor dem Hintergrund der exergetisch sinnvollen Nutzung und aus Gründen der Wirtschaftlichkeit geboten. Hierfür sind Wärmespeicher erforderlich, um die KWK-Wärme saisonal zu speichern und entkoppelt von der

Stromproduktion nutzbar zu machen. Ergänzt werden kann die Wärmespeicherung durch eine bedarfsgerechte Abwärmenutzung zur Kältebereitstellung. Auf diese Weise ergibt sich eine exergetisch sinnvolle und daher hocheffiziente Energienutzungskaskade, bei der aus dem hochexergetischen Verbrennungsprozeß zunächst Elektrizität, dann bei Bedarf Kälte und zuletzt Wärme, idealerweise auf verschiedenen Niveaus, mit einer hohen Volllaststundenzahl ausgekoppelt wird.

Es existieren wenige Anlagen in der oben beschriebenen Konzeption. Ein Beispiel für eine solche Auslegung ist das Energiesystem der Parlamentsbauten am Berliner Spreebogen, das eine besonders flexible, da stromgeführt ausgelegte Betriebsweise besitzt. Diese Betriebsart wurde bei den Parlamentsbauten aus Sicherheitserwägungen heraus gewählt (Möglichkeit der autarken Energieversorgung), sie verdeutlicht aber auch, wie durch die Kombination von KWK(K) und Wärmespeicherung ein Erzeugungsmanagement ermöglicht wird.

Bei der Wärmespeicherung erscheint die Aquiferspeicherung aus mehreren Gründen attraktiv:

- Geringe Kosten je m<sup>3</sup> Wasseräquivalent
- Geringer konstruktiver Aufwand
- Nur geringer oberirdischer Flächenbedarf und wenige oberirdische Aufbauten
- Sehr hohe Speicherkapazitäten im GWh-Bereich (hier ca. 4-5 GWh)

Diese Speicherform ist jedoch von geologischen und hydrogeochemischen Gegebenheiten abhängig und wird je nach erforderlicher Bohrtiefe erst bei großen zu speichernden Energiemengen wirtschaftlich. Ein Einbezug weiterer in Lüneburg vorhandener Netze könnte die spezifischen Kosten für eine Wärmespeicherung weiter reduzieren.

Sowohl hinsichtlich der zu beachtenden geologischen / hydrogeologischen und hydrogeochemischen Parameter als auch hinsichtlich Planung, Auslegung und Modellierung verfügen die Antragsteller über langjährige, einschlägige Erfahrung mit den Aquiferwärmespeichern u.a. in Neubrandenburg, Rostock und Berlin [5-13].

[1] T. Schmidt, D. Mangold, H. Müller-Steinhagen: Seasonal Thermal Energy Storage in Germany, ISES Solar World Congress 2003, 14.-19.06.2003, Göteborg, Schweden

[2] M. Reuß, W. Schölkopf, W. Beuth, M. Schmidt, Solare Nahwärme Attenkirchen – Erfahrungen beim Bau und im Betrieb, Tagungsband, OTTI – 17. Symposium Thermische Solarenergie, S. 216 – 218, 2007.

[3] T. Schmidt, H. Müller-Steinhagen: Die solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit saisonalem Aquifer-Wärmespeicher in Rostock - Ergebnisse nach vier Betriebsjahren 5. Symposium Erdgekoppelte Wärmepumpen, 8. Geothermische Fachtagung, Landau in der Pfalz, 10.-12.11.2004

[4] Mangold, D.; Hahne, E.: Technische Erfahrungen aus den solar unterstützten Nahwärmeanlagen des Förderprogramms Solarthermie 2000; 10. Symposium. Therm. Solarenergie, OTTI Tagungsband, S. 106-113, Kloster Banz 2000

[5] Kabus, F. & Seibt, P.: Aquifer Thermal Energy Storage for the Berlin Reichstag Building – New Seat of the German Parliament.- In: Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu - Tohoku, Japan, 28. Mai- 10. Juni, 2000. pp. 3611-3615.

- [6] Bartels, J.; Kabus, F. & Schmidt, T.: Seasonal Aquifer Solar Heat Storage at Rostock-Brinckmanshöhe – First Operational Experience and Aquifer Simulation.- Proceedings 9th International Conference on Thermal Energy Storage FUTURESTOCK 2003, Warschau, 01.-04.09.2003, Vol. 1, S. 59-64.
- [7] Bartels, J.: Wissenschaftliche Begleitung des Betriebes der unterirdischen Wärme- und Kältespeicher für die Parlamentsbauten.- Tagungsband 4. Berliner Energietage 16.-18. Juni 2003, Hrsg.: Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V. an der TU Berlin, Juni 2003.
- [8] Kabus, F. & Bartels, J.: Speicherung von Wärme und Kälte in Grundwasserleitern.- KI Luft- und Kältetechnik, Hüthig-Verlag, Heidelberg, Heft 5/2004, S. 170-175.
- [9] Kabus, F.; Möllmann, G.; Hoffmann, F.; Bartels, J. (2006): Two-year experience in the operation of an aquifer thermal energy store based on surplus heat arising from a gas and steam cogeneration plant at Neubrandenburg/ NE Germany. 10th International Conference on Thermal Energy Storage, ECOSTOCK, Pomona NJ, Richard Stockton College of New Jersey
- [10] Kabus, F.; Richlak, U.; Beuster, H. (2006): Saisonale Speicherung von Überschusswärme aus einem Heizkraftwerk in einen Aquifer in Neubrandenburg. Statusseminar „Thermische Energiespeicherung“, Freiburg
- [11] Köhler, S., Kranz, S., Huenges E., Albers J., Berkyürek, C., Ziegler, F., Bartels, J., Wolfgramm, M., Seibt, A., Kabus, F., Opel, O., Ruck, W.: Wärme- und Kälteversorgung der Parlamentsbauten im Berliner Spreebogen mit Aquiferspeicher.- Statusseminar „Thermische Energiespeicher“, Freiburg, 2./3. November, 2006.
- [12] Kranz, S., Bartels, J., Gehrke, D., Hoffmann, F., Wolfgramm, M.: Wärme und Kältespeicherung in Aquiferen.- bbr, 07-08/2008, S. 34-43.
- [13] Kranz, S., Huenges E., Albers J., Berkyürek, C., Ziegler, Opel, O., Ruck, W., F., Bartels, J., Wolfgramm, M., Kabus, F.: Aquiferspeicher für die Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden- Statusseminar „Forschung für Energieoptimiertes Bauen“, Würzburg, 30.Juni – 2. Juli, 2009, S. 121-127.

#### 4.2 Gebäudeleittechnik / Ambient-Intelligence-Systeme / Embedded Systems

Im Zweckgebäudebereich dominiert heute weiterhin die klassische Gebäudeautomatisierung. Hier sind Automationssysteme wie z.B. SIEMENS Desigo PX mit Projektierungssystemen XWORKS und Gebäudeleitsystemen Desigo Insight Stand der Technik. Dabei konzentrieren sich die Anwendungen im Wesentlichen auf die Bereiche Heizung, Elektroinstallation, Lüftung, Zutrittskontrolle und Brandschutz; welche durchweg deterministische, zentralistische Anwendungen, einmal von der Strukturierung nach Automationsebenen abgesehen, darstellen.

Drei von vielen Beispielen sind das „INHAUS“-Projekt der Fraunhofer Gesellschaft [INHAUS], das „Haus der Gegenwart“-Projekt auf Initiative des SZ-Magazins [HDG] und das „TRON intelligent House“-Projekt der Tabenaka Corporation [TRON]. Während das Konzept von TRON in der Kombination des traditionellen japanischen Wohnstils mit futuristischen japanischen Computertechnologien besteht und nach eigener Aussage zur - zum Zeitpunkt der Erstellung - höchsten je erreichten Rechnerdichte in einem Wohnbereich führte, versuchte man mit dem „Haus der Gegenwart“ den typischen Menschen mit seinen sich wandelnden Lebensentwürfen in den Mittelpunkt zu stellen. Erst die Haussteuerung sowie die Integration des Unterhaltungs- und Kommunikationssektors durch Microsoft sowie die Vernetzung der Fahrzeug- und Hausdomänen durch BMW führte eine starke informationstechnische Prägung in das Projekt ein. Das INHAUS-Projekt, das nach einer Phase I für den Wohnbereich nun in eine Phase II für den Zweckbereich eintritt, birgt interessante Ansätze: Über einen Multisphere-Konzept wird die Lebensumgebung des Menschen in Schalen ausgehend von den persönlichen Gegenständen (Personal Area Network) über Immediate Environment (Kaffeemaschine, Herd, ...), Instant Partners (Auto), Tele Access

(Weitverkehrstechnik) bis hin zum Cyber World Level eingeteilt. Hierbei soll zunächst über nicht synergetische Einzelprojekte eine Systemlösung erarbeitet werden, zu der u. a. eine integrierte Systembedienung gehört.

Sieht man sich nach dem Ablauf einiger Projekte (z.B. Fraunhofer: Phase I) die aktuelle Marktsituation an, so stellt sich eine signifikante Ernüchterung ein. Auch wenn man beachtet, dass die entstandenen Technologieboliden die Möglichkeiten in ihrem gesamten Facettenreichtum abbilden sollen, muss festgestellt werden, dass im Wohnbereich selbst Low Level Bussysteme wie z. B. DALI (EN 60929 Annex E,), LON (ANSI/EIA-709 und EIA-852) oder EIB (EN 50090) bisher so gut wie nicht anzutreffen sind; hinsichtlich der Installationstechnik dominieren die seit Jahrzehnten etablierten klassischen elektro-mechanischen Lösungen.

[HDG] Haus der Gegenwart, [www.haus-der-gegenwart.de](http://www.haus-der-gegenwart.de)

[INHAUS] INHAUS, [www.inhaus-duisburg.de](http://www.inhaus-duisburg.de)

[TRON] TRON, <http://tronweb.super-nova.co.jp/homepage.html>

[Ambience 2004] Tuulari (2004): "Context Aware Environments for Ambient Services." ITEA/Eureka.

[Ambience 2003] Loenen, Van (2003): "the Ambience Project." <http://www.hitech-projects.com/euprojects/ambience/>. Philips Research.

[Amigo 2008] Janse (2008): AMIGO - Ambient Intelligence for the networked home environment. <http://www.hitech-projects.com/euprojects/amigo/>.

[Baader et al. 2008] Baader et al. (2008): „The Decryption Logic Handbook“, Cambridge University Press, ISBN, 978-0-521-87625-4.

[Brumitt 2000] Brumitt et al. (2000): "EasyLiving: Technologies for Intelligent Environments", LNCS Springer Berlin / Heidelberg, ISBN 978-3-540-41093-5.

[Delius et al. 2007] Daniel Meyer-Delius, Christian Plagemann, Georg von Wichert, Wendelin Feiten, Gisbert Lawitzky, and Wolfram Burgard (2007): A Probabilistic Relational Model for Characterizing Situations in Dynamic Multi-Agent Systems, In post-conference proceedings of the Conference of the German Classification Society - Gesellschaft für Klassifikation (GfKL).

[Liao et al. 2005] LIAO, L. and FOX, D. and KAUTZ, H. (2005): Location-Based Activity Recognition using Relational Markov Networks. In Proc. of the International Joint.

[MIT 2009] MIT Project Oxygen Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory (2009): "MIT Project Oxygen - Pervasive, Human-centered Computing", <http://www.oxygen.lcs.mit.edu/>

[Pearl 1988] J. Pearl (1988): Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference. Morgan Kaufmann Publishers, Inc..

[Patterson et al. 2003] PATTERSON, D. J. and LIAO, L. and FOX, D. and KAUTZ, H. (2003): Inferring High-Level Behavior from Low-Level Sensors. In Proc. of the International Conference on Ubiquitous Computing (UBICOMP-03).

[Rabiner 1989] RABINER, L. (1989): A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition. Proceedings of the IEEE, 77(2):257-286.

[Richardson et al. 2006] Richardson, M. and Domingos, P. (2006): Markov logic networks. Mach. Learn. 62, 1-2 (Feb. 2006), 107-136. DOI= <http://dx.doi.org/10.1007/s10994-006-5833-1>.

[Subramanya et al. 2006] SUBRAMANYA, A. and RAJ, A. and BILMES, J. and FOX, D. (2006): Recognizing Activities and Spatial Context Using Wearable Sensors. In Proc. of Conference on Uncertainty in AI (UAI).

[Taskar et al. 2002] B. Taskar, P. Abbeel, and D. Koller (2002): Discriminative probabilistic models for relational data. In Proc. of the Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI).

[Wang 2004] Wang, et al. (2004): „ Ontology Based Context Modeling and Reasoning using OWL “, Proceedings of the Second IEEE Annual Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOMW'04), IEEE Computer Society.

[W3C 2009a] W3C Semantic Web (2009): "OWL Web Ontology Language Reference", <http://www.w3.org/2004/OWL/#specs>.

[W3C 2009b] W3C (2009), "RDF Vocabulary Description Language 1.0: RDF Schema", <http://www.w3.org/TR/rdf-schema/>.

[Yau 2006] Yau, Liu (2006): „Hierarchical Situation Modeling and Reasoning for Pervasive Computing“, Proceedings of the Fourth IEEE Workshop on Software Technologies for Future Embedded and Ubiquitous Systems and Second International Workshop on Collaborative Computing, Integration and Assurance, IEEE Computer Society.

#### 4.3 Niedertemperatur- und Abwärmenutzung / aktivierte PCM-Kühldecken

Im Bereich von Niedrigtemperatur-Heiz- und Kühlsystemen ist die Betonkern- bzw. Bauteilaktivierung Stand der Technik. Eine sinnvolle Niedrigexergienutzung hängt hierbei hauptsächlich von der Art der Wärmebereitstellung ab, wobei sich letztlich nur bei der Nutzung von Niedrigexergie-Wärmequellen, wie bidirektionale Erdsonden-, Erdpfahl- und/oder Bodenplatten-Wärmetauschergekoppelte Wärmepumpen mit der saisonaler Wärmespeicherung und/oder der Nutzung solarer Wärme bzw. Abwärme exergetisch mehr oder weniger sinnvolle und primärenergetisch effiziente Energienutzungsszenarien gestalten lassen [1]. Eine Nutzung von Fern- oder Abwärme in Verbindung mit Niedrigtemperatur-Heizsystemen weist wirtschaftliche Vorteile durch sehr kompakt ausführbare Wärmeübergabestationen auf und ist exergetisch in Verbindung mit einer Abwärmenutzung, Rücklaufauskühlung, Absorptionskälteerzeugung und/oder in Verbindung mit saisonaler Wärmespeicherung zur Erreichung hoher KWK-Anteile konzeptionell sinnvoll. Besonders effizient sind Systeme, die durch die Integration von Wärmespeichern eine flexible Niedrigexergie- und Abwärmenutzung zulassen sowie eine exergetisch sinnvolle Energienutzungskaskade aufweisen [1-6].

Ein Nachteil von auf Bauteilaktivierung setzender Gebäudeklimatisierung ist die vergleichsweise niedrige Flexibilität, sowohl hinsichtlich des zeitlichen Ansprechverhaltens, als auch hinsichtlich raumindividueller Regelung. Zumeist wird eine an der solaren Einstrahlung ausgerichtete, zonengeregelte Auslegung gewählt. Das Fehlen individueller Regulierungsmöglichkeiten führt dabei zu einer Reihe negativer Effekte, die ihren Ursprung in einem verminderten Komfortempfinden der Nutzer bei zu starrer Regelung haben [7].

Für die Realisierung raumindividueller Klimatisierung werden oftmals Kombinationen mit Radiatoren realisiert, was aufgrund der schnelleren Ansprechzeiten bei thermostatgesteuerten Radiatoren jedoch zu bedeutenden Problemen (Überhitzung der Erdwärmespeicher aufgrund zu geringer Wärmeentnahme über die Niedrigexergiesysteme im Gegensatz zu den Radiatorsystemen) führt [8]. Es bestehen vereinzelt Konzepte hinsichtlich einer mittels separat gesteuerten Komfortzonen ausgeführten, raumindividuellen Bauteilaktivierung [9], die zum Teil auch einen gebäudeinternen Wärmeausgleich (bspw. Südseite -> Nordseite) ermöglichen, diese Konzepte wurden bislang jedoch noch nicht realisiert.

Die positiven Eigenschaften von Bauteilaktivierungssystemen, eine energieeffiziente Temperierung unter Nutzung niedrigexergetischer Wärmequellen und -Senken, können durch die komplementäre Nutzung von Phasenwechsel-Wärmespeichermaterialien unterstützt werden. Für Phasenwechsel-

(PCM-) Materialien besteht ein breites Anwendungsspektrum im Baubereich [10, 11]. Für die niedrigexergetische Raumklimatisierung bieten sich insbesondere für den ressourcensparenden Leichtbau PCM-Putze und PCM-Paneele an, die in der Lage sind, auftretende Spitzenkühllasten zu vermindern und eine gleichmäßigere Raumtemperierung sicherzustellen. Die theoretische Wirksamkeit insbesondere bei der Dämpfung von Temperaturspitzen in der Kühlperiode wurde in zahlreichen Modellanwendungen nachgewiesen [12, 13].

Während es bei rein passiven, bspw. mit freier Lüftung und Nachtauskühlung kombinierten Systeme in der Praxis zu Problemen mit der Entladung kommen und die Kapazität zur Wärmespeicherung und Funktion der PCM-Bauteile beeinträchtigt werden kann, können aktivierte Systeme helfen, Kühllasten zu verstetigen und somit insbesondere durch Kombination mit Niedrigexergiekühlsystemen insgesamt eine energieeffizientere Klimatisierung bei geringerer Überschreitung des Komfortbereichs zu erreichen [13].

Hinsichtlich der exergetischen Bewertung finden sich bspw. in [14] nützliche Handreichungen.

[1] Kabus, F. & Seibt, P.: Aquifer Thermal Energy Storage for the Berlin Reichstag Building – New Seat of the German Parliament.- In: Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu - Tohoku, Japan, 28. Mai- 10. Juni, 2000. pp. 3611-3615.

[2] Bartels, J.: Wissenschaftliche Begleitung des Betriebes der unterirdischen Wärme- und Kältespeicher für die Parlamentsbauten.- Tagungsband 4. Berliner Energietage 16.-18. Juni 2003, Hrsg.: Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V. an der TU Berlin, Juni 2003.

[3] Kabus, F.; Möllmann, G.; Hoffmann, F.; Bartels, J. (2006): Two-year experience in the operation of an aquifer thermal energy store based on surplus heat arising from a gas and steam cogeneration plant at Neubrandenburg/ NE Germany. 10th International Conference on Thermal Energy Storage, ECOSTOCK, Pomona NJ, Richard Stockton College of New Jersey

[4] Köhler, S., Kranz, S., Huenges E., Albers J., Berkyürek, C., Ziegler, F., Bartels, J., Wolfgramm, M., Seibt, A., Kabus, F., Opel, O., Ruck, W.: Wärme- und Kälteversorgung der Parlamentsbauten im Berliner Spreebogen mit Aquiferspeicher.- Statusseminar „Thermische Energiespeicher“, Freiburg, 2./3. November, 2006.

[5] Kranz, S., Bartels, J., Gehrke, D., Hoffmann, F., Wolfgramm, M.: Wärme und Kältespeicherung in Aquiferen.- bbr, 07-08/2008, S. 34-43.

[6] Kranz, S., Huenges, E., Albers, J., Ziegler, F., Opel, O., Ruck, W., Bartels, J., Wolfgramm, M., Kabus, F. (2009) „Aquiferspeicher für die Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden“. EnOB Statusseminar 2009, 30.06.-02.07.2009, Würzburg, Germany.

[7] C. Sasse, H. Schnürer, M. N. Fisch (2006) Wärme- und Kältespeicherung im Gründungsbereich energieeffizienter Bürogebäude. Tagungsband PTJ Statusseminar thermische Energiespeicherung, 2.-3. November 2006, Freiburg, Germany.

[8] M. N. Fisch, F. Bockelmann, H. Kipry (2009): Evaluation and Optimisation of UTES Systems of Energy Efficient Office Buildings. IRES 2009, 24.-25. November in Berlin, EUROSOLAR, Bonn.

[9] Opel, O., Aretz, G., Dusedeau, A., Homberger, G., Reuß, M., Schütt, R., Welge, R., Ruck, W., 2008, BeBa Energie Zentrum - 1st 100% solar and wind-powered business building. IRES 2008, 24.-25. November in Berlin, EUROSOLAR, Bonn.

[10] Tyagi, V.-V., Buddhi, D.: PCM thermal storage in buildings: A state of art. Renewable Sustainable Energy Rev., 11 (2007) 1146–1166.

[11] Zhang, Y., Zhou, G., Lin, K., Zhang, Q., Di, H.: Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook. Build. Environ. 42 (2007) 2197–2209.

[12] Kuznik, F., Virgone, J., Roux, J.-J.: Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experimental investigation. Energy Build. 40 (2008) 148–15.

[13] Schossig, P., Haussmann, T., Gschwandner, S. (2008): Phasenwechselmaterialien zur thermischen Energiespeicherung. Energieforum Nord, 14.02.2008, Hamburg-Harburg.

[14] Torlo, H, Schurig, M. Stationäres exergetisches Bewertungsverfahren. Tagungsband LowEx-Symposium 2009, 28.-29.10.2009, Kassel.

#### 4.4 Vakuumisolationstechnik

Die Vorteile evakuierter Wärmedämmkonstruktionen sind seit der Entwicklung der Thermoflasche durch Dewar 1892 bekannt. Das Prinzip beruht auf der Minimierung der Transmission durch Konvektion und Wärmeleitung. Der verbleibende Anteil an der Wärmetransmission erfolgt theoretisch durch Wärmestrahlung, welche durch IR-reflektierende bzw. IR-undurchlässige Beschichtungen oder Folien unterbunden wird.

Sowohl bei Vakuumisulationspaneele wie auch bei Vakuumverglasung liegen der Konstruktion zwei Grundforderungen zugrunde: Die Notwendigkeit einer Abtragung der durch den Luftdruck auf die planen Oberflächen wirkenden Last sowie eine Versiegelung gegen das Eintreten von Gasen und Wasser in den evakuierten Raum. Diese technischen Erfordernisse werden für Vakuumisulationspaneele und Vakuumverglasung auf jeweils spezifische Art und Weise gelöst. Die Anwendung im Bau wird bei beiden Technologien seit einigen Jahren angestrebt. Im Rahmen von EnOB beschäftigt sich der FuE-Bereich ViBau mit der Entwicklung der Vakuumisolationstechnik für die Anwendung im Baubereich.

#### 4.5 Vakuumisulationspaneele

Vakuumisulationspaneele (VIP) wurde erstmals 1999 vom ZAE Bayern nach einer langen Entwicklungs-geschichte im Bau eingesetzt [15]. Die Wärmedurchgangskoeffizienten von VIP liegen bei gleicher Dicke ca. um den Faktor 10 unterhalb anderer Dämmstoffe. Die Verwendung von VIP bietet sich daher insbesondere bei Raumknappheit hinsichtlich der Verwendung größerer Dämmstärken, bei besonderem Wert der gewonnenen Fläche oder für die Konstruktion von Fassaden mit besonders geringen Transmissionskoeffizienten an.

Es existieren mittlerweile Bauformen, die bei hoher Dichtigkeit durch Verwendung spezieller Laminate und Füllmaterialien gegenüber einer Degradation durch die Permeation von Gasmolekülen und Wasser in das Innere der VIPs verhältnismäßig unempfindlich sind. Dennoch muss bei der Planung und Installation von VIPs besondere Sorgfalt angewendet werden. Eine Anpassung an geometrische Formen ist in Einzelanfertigung möglich, erhöht jedoch die hiermit verbundenen Kosten. Ein besonderes Augenmerk ist bei der Installation auf eine Vermeidung von Beschädigungen und Wärmebrücken zu legen. Eine ausführliche Darstellung des Entwicklungsstands ist in [16] gegeben.

Um die Anwendbarkeit zu demonstrieren und das Vertrauen in die VIP-Technologie zu erhöhen, wird im Rahmen von EnBau die Integration von VIPs in Demonstrationsbauvorhaben angestrebt. Hierbei

werden die mit VIP ausgerüsteten Fassaden einem besonderen Monitoring unterzogen, um die Alterungsbeständigkeit dieses innovativen Bauprodukts eingehend untersuchen zu können.

#### 4.6 Vakuumverglasung

Bei der Vakuumverglasung wird das gleiche Prinzip angewandt wie bei Vakuumisulationspaneele. Durch die deutlich reduzierte Wärmetransmission können dabei mit einer Zweischeiben-Vakuumverglasung in etwa die U-Werte einer Dreischeibenverglasung mit Edelgasfüllung bei signifikant geringerem Gewicht verhältnismäßig wirtschaftlich erreicht werden. Undichtigkeiten und Beschädigungen stellen ein im Gegensatz zu VIP vergleichsweise geringeres Risiko dar. Das Potential dieser Technologie, auch im Hinblick auf Ressourceneinsparungen durch geringere statische Anforderungen ist immens [17-21]. Mit einer Verfügbarkeit ist im Laufe der nächsten Jahre zu rechnen. Im Rahmen des Projektes wird mit dem möglichen Hersteller Glaser FMB GmbH u. Co. KG zusammengearbeitet.

[15] Fricke, J., Heinemann, U., Ebert, H.P. Vacuum insulation panels – From research to market. *Vacuum* 82 (2008) 680-690

[16] Baetens, R., Jelle, B.P., Thue, J.V., Tenpierik, M.J., Grynning, S., Uvsløkk, S., Gustavsen, A. Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond. *Energy Build.* 42 (2010) 147-172.

[17] Collins, R.E., Turner, G.M., Fischer-Cripps, A.C., Tang, J.Z., Simko, T.M., Dey, C.J., Clugston, D.A., Zhang, Q.-C., Garrison, J.D. Vacuum Glazing – A New Component for Insulating Windows. *Build. Environ.* 30 (1995) 459-492.

[18] Collins, R.E., Garrison, J.D. MANUFACTURE AND COST OF VACUUM GLAZING. *Solar Energy* 55 (1995) 151-161.

[20] Manz, H. On minimizing heat transport in architectural glazing. *Ren Energy* 33 (2008) 119-128.

[21] Eames, P.C. Vacuum Glazing: Current Performance and Future prospects. *Vacuum* 82 (2008) 717-722

#### 4.7 Aquiferwärmespeicherung

Der Antragsteller sowie die Leistungsträger GFZ Potsdam und GTN Neubrandenburg verfügen wie bereits dargestellt über eine reichhaltige, auch gemeinsame Erfahrung im Bereich der Planung, des Baus und des Betriebs von thermischen Aquiferspeichern. Dabei besitzt die GTN Neubrandenburg insbesondere Kenntnisse und Erfahrungen in der Planung/Auslegung/Geologie und der numerischen Simulation von Aquiferspeichern sowie deren Betrieb, das GFZ Potsdam deckt die Energiesystemmodellierung und Energiesystemforschung ab, wobei auch hier speziell Erfahrungen mit der Integration von Aquiferwärme und Kältespeichern in Energiesysteme vorliegen. Die Universität Lüneburg besitzt neben der Kompetenz in den interdisziplinären Bereichen insbesondere wasserchemische, mikrobiologische und hydrogeochemische Erfahrung mit Aquiferenergiespeichern und energieeffizienten Konzepten sowie erneuerbaren Energien und deren Nachhaltigkeitsbewertung.

Zur Anwendung kommen sollen in dem hier dargestellten Vorhaben bereits in der Planungsphase und bei der Erstellung des als Referenz dienenden Energiesystemmodells Erkenntnisse zu einer Angleichung der Rückflusstemperatur an die natürliche Aquifer- bzw. Speichertemperatur. Dies beeinflusst direkt die Kapazität und Effizienz des Wärmespeichers [5]. Erreicht werden kann dies sowohl durch eine flexible, intelligente Niedrigexergienutzung und kaskadierte Wärmeauskopplung für die verschiedenen im Netz vorhandenen Heizungssysteme als auch durch die Nutzung der evtl. vorhandenen Möglichkeiten der am Standort vorgefundenen geologischen Voraussetzung (ggf. Nutzung von Konvektion etc.).

Weiterhin ist bei Entscheidung für eine Aquiferwärmespeicherung die Pilotanwendung eines von der Universität Lüneburg entwickelten Verockerungssensors (Patent Nr. EP2601511B1) zur Frühwarnung vor Betriebsstörungen durch Eisenaussäureungen [vgl. 15-18] und die Anwendung der vorhandenen Erfahrung hinsichtlich anderer wasserchemischer und mikrobiologischer Prozesse geplant.

[14] Kranz, S.; Bartels, J. (2009): Simulation and data based identification of parameters affecting seasonal ATEs efficiency, 11th International Conference on Thermal Energy Storage - Effstock 2009 (Stockholm, Sweden 2009).

[15] Opel, O., Ruck, W., (2006). Investigation of effects of HT-ATES usage on aquifer water chemistry in Berlin – first results. Poster, 1st IUPAC Conference on Green-Sustainable Chemistry, Dresden, Germany.

[16] Opel, O., Novio Liñares, J.A., Ruck, W., (2007). Saisonale Wärmespeicherung im Aquifer – Ergebnisse aus dem geochemischen Monitoring der Aquiferwärme- und Kältespeicher am deutschen Reichstagskomplex in Berlin. Poster, Geothermiekongress 2007, GTV, 29.-31.10.2007, Bochum, Germany.

[17] Opel, O., Novio Liñares, J.A., Eggerichs, T., Ruck, W. (2008). Zusammenhänge zwischen gemessenen und aus Fe<sup>2+</sup>-Konzentrationen errechneten Redoxpotentialen in den Fluiden der thermischen Aquiferenergiespeicher im Energiesystem der Parlamentsbauten am Spreebogen in Berlin. *Vom Wasser* 106 (4), 14-21.

[18] Opel, O., Eggerichs, T., Eler, N., Ruck, W. (2009). Zusammenhänge und Kinetik biotischer und abiotischer Eisenoxidation bei der Brunnenverockerung und Ansätze zur Modellierung. *Wasser 2009, Tagungsband der Jahrestagung der wasserchemischen Gesellschaft 2009*, 18.-20. Mai 2009 in Stralsund, ISBN 978-3-936028-56-0, Berlin 2009.

## 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Für die Bearbeitung des Projekts wurde mit einer Anzahl externer Projektpartner zusammengearbeitet. Die Zusammenarbeit der einzelnen Partner im Projekt ist in Abb. 16 und 17 dargestellt.

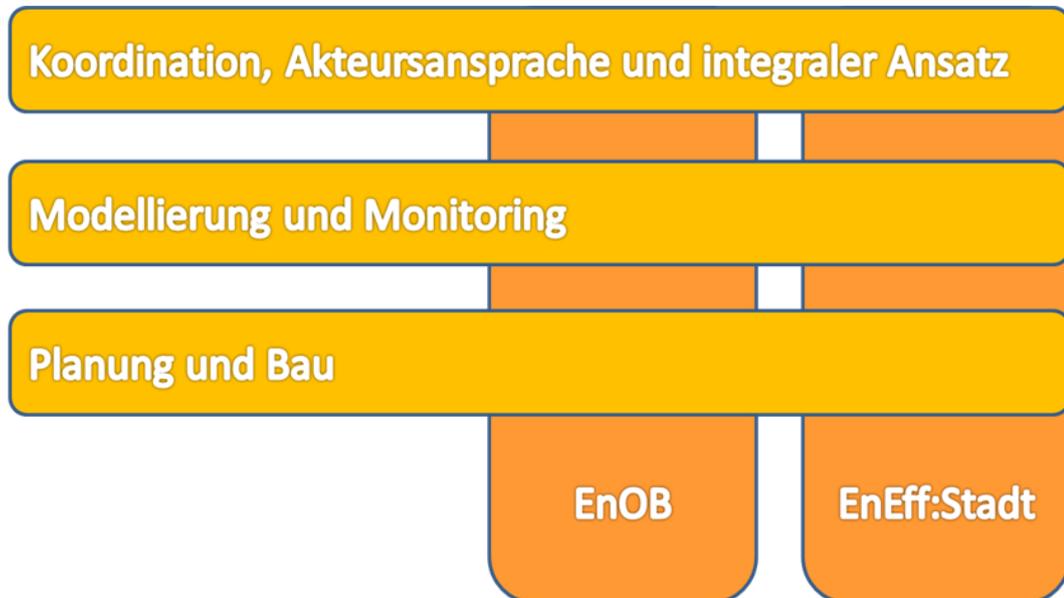


Abb. 16: Organisationsschema des Projekts „klimaneutraler Campus Scharnhorststraße/Bockelsberg“

### Arbeitspakete und Partner:

1. Koordination, Akteursansprache und integraler Ansatz:
  - LULG, Partner Energieeinsparkontraktoring
2. Modellierung und Monitoring:
  - GTN, GFZ, EPA, EonERC, HS Karlsruhe, LULG, Haustechnikplaner
3. Planung und Bau:
  - GTN, LULG, Energiesystempartner, Energieeinsparkontraktor, Architekten, Fassadenplaner, Energieplaner, Lichtplaner, Haustechnikplaner etc.
- A. EnEff: Stadt/Energiesystem:
  - GTN, GFZ, LULG, EPA, EonERC, Energiesystempartner, Energieeinsparkontraktor
- B. EnOB:
  - LULG, HS Karlsruhe, Architekten, Fassadenplaner, Energieplaner, Lichtplaner, Haustechnikplaner etc.

Abb. 17: Zugehörigkeit der einzelnen Projektpartner zu den Teilprojekten

Die beiderseits mit dem Campusenergiesystem und den Bestandsgebäuden sowie dem Neubau zusammenhängenden Projektaufgaben werden in interdisziplinären Teams bearbeitet. Zum Teil werden die Projektaufgaben von den gleichen Personen (gilt insbesondere für die Koordination und andere Arbeitspakete der Leuphana Universität), zum Teil durch unterschiedliche Teams (insb. Bereich Planung und Bau) übernommen.

Neben dem Team der Stabsstelle Campusentwicklung der Leuphana Universität waren dies vor allem die Architekten rw+ und die TGA-Fachplaner der emutec GmbH.

In der Bauphase des Zentralgebäudeneubaus finden wöchentliche Planungstreffen statt. Entscheidungen werden nach intensiver Rückkoppelung mit den Planungsteams durch die Projektleitung/Koordination getroffen. Während der Einsparrunden im 1. HJ 2014 wurde zusätzlich zu den wöchentlichen Planungsbesprechungen ein wöchentlicher Management Jour Fixe mit externer Begleitung eingerichtet.

In der Konzeptions- und Planungsphase Energiesystem und Campus-Bestandsgebäude wurden Projekttreffen zu einzelnen Themen sowie regelmäßige Besprechungen im Projektteam durchgeführt. Die notwendige Integration und Abstimmung zwischen den Projektteilen wird von der Projektleitung koordiniert und erfolgt nach Bedarf durch Gesprächstermine oder die gegenseitige Teilnahme an den Planungstreffen.

Im FuE-Teil wurde das Büro EPA Aachen sowie das EON ERC mit der Modellierung der Campusgebäude und des Energiesystems des Campus sowie später mit der dynamischen Modellierung des Zentralgebäudes beauftragt, die GTN Neubrandenburg und das GFZ Potsdam übernahmen die Modellierung des Referenzszenarios. Die Hochschule Karlsruhe sollte das Komfortmonitoring der Referenzräume übernehmen, später wurde mit der Modellierung jedoch das SIZ energie+ aus Braunschweig beauftragt.

Tabelle 2 gibt das finale Projektkonsortium (ohne ausführende Firmen und Außenanlagenplaner etc.) wieder.

Tab. 2: Projektteilnehmer

Nr.	Institution	Ansprechpartner	Anschrift	Telefon/ E-Mail	Typ
1	Leuphana Universität Lüneburg	Susanne Ohse	Scharnhorststr. 1, 21335 Lüneburg	04131/677-2686 <a href="mailto:ohse@uni.leuphana.de">ohse@uni.leuphana.de</a>	Bauherr und Antragsteller
2	Leuphana Universität Lüneburg	Prof. Dr.-Ing. Wolfgang K.L. Ruck	Scharnhorststr. 1, 21335 Lüneburg	04131/677-2870 <a href="mailto:ruck@uni.leuphana.de">ruck@uni.leuphana.de</a>	FuE
3	rw+ Architekten	Heiko Klement	Christburger Straße 6 10405 Berlin	030/440 400-49 <a href="mailto:heiko-klement@rwplus.de">heiko-klement@rwplus.de</a>	Architekt Koordination Planung
4	GFZ Potsdam	Dr. Ernst Huenges, Stefan Kranz	Telegrafenberg, E 225 14473 Potsdam	0331/288-1565 <a href="mailto:kranz@gfz-potsdam.de">kranz@gfz-potsdam.de</a>	FuE
5	GTN Neubrandenburg	Dr. Frank Kabus	Seestr. 7 A 17033 Neubrandenburg	0395 / 36774-0 <a href="mailto:gtn@gtn-online.de">gtn@gtn-online.de</a>	Fachplaner / FuE
6	Eon_ERC ERG	Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller	Mathieustrasse 6 52074 Aachen	0241/80-49761 <a href="mailto:dmueller@eonerc.rwth-aachen.de">dmueller@eonerc.rwth-aachen.de</a>	FuE
7	HS Karlsruhe	Prof. Wolfrum	Moltkestraße 30 76133 Karlsruhe	0721/925-1544 <a href="mailto:Klaus.wolfrum@hs-karlsruhe.de">Klaus.wolfrum@hs-karlsruhe.de</a>	FuE
8	ELEKTRO - PHYSIK AACHEN GMBH	Dr.-Ing. Heinz Jörg Röttger	Jülicher Straße 338 52 070 Aachen	0241/159090 <a href="mailto:info@epa-aachen.de">info@epa-aachen.de</a>	FuE / Modellierung
9	Emutec GmbH	Michael Schneider	Oststraße 11 22844 Norderstedt	040/30 98 66 – 604 <a href="mailto:michael.schneider@emutec.de">michael.schneider@emutec.de</a>	Fachplaner TGA
10	SIZ energie+	Samuel Rischmüller	Mühlenpfordtstraße 23 38106 Braunschweig	(0) 531 391-3590 <a href="mailto:samuel.rischmueller@stw.de">samuel.rischmueller@stw.de</a>	FuE / Monitoring

## Teil II: Eingehende Darstellung der Verwendung der Zuwendung

### 1. Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse im Vergleich mit den vorgegebenen Zielen

#### 1.1 Zusammenfassung der Ergebnisse und Zielerreichung

- Als zentrales Ergebnis konnte ein klimaneutrales Campuskonzept (negative CO<sub>2</sub>-Äquivalentemissionen in der Jahresbilanz inklusive Tier 1-3 (Energie, Beschaffung, Dienstreisen und Dienstfahrzeuge sowie grauer Energie und Nahrungsmittel) erarbeitet und umgesetzt werden (Opel et al. 2017). Die Emissionsbilanz wird jährlich im Rahmen der EMAS-Zertifizierung nachgeführt und kontrolliert (Umwelterklärung Leuphana 2018). Abb. 18 zeigt die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Energieversorgung des Campus.

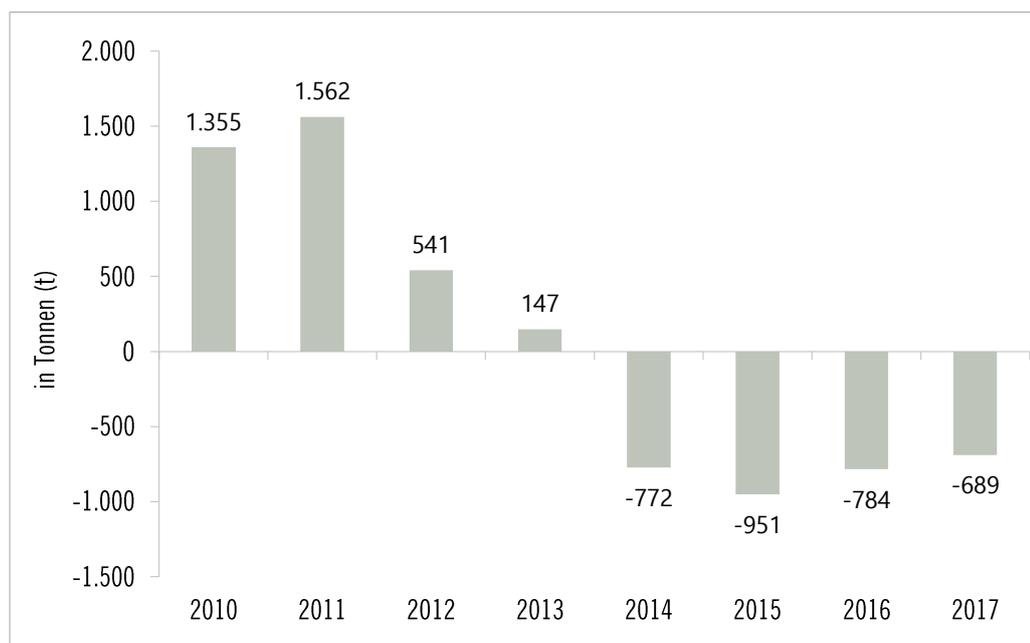


Abb. 18: CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Energieversorgung des Campus Scharnhorststraße seit Projektbeginn.

- Wird der Stadtteil Bockelsberg mit einbezogen ergibt sich eine CO<sub>2</sub>-Bilanz von -1.636 t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten p.a. (Opel et al. 2017)
- Die Zielerreichung hinsichtlich eines Netto-Null- oder Plusenergiecampus wurde eingehend und differenziert untersucht. Aufgrund der nicht gebäudespezifischen Betrachtung kann für den Gesamtcampus abweichend von der EnEV der (fachlich zutreffendere) PE-Faktor 0,5 (statt

1,1) für Biomethan eingesetzt werden, hiermit kann bei Umsetzung des Aquiferwärmespeichers eine negative Primärenergiebilanz (entsprechend eines Plusenergiecampus) erreicht werden.

- In 15/16 wurden bereinigt etwa 29 % Wärme und 28 % Strom eingespart.
- Durch die betrachteten Maßnahmen (Dachgeschossausbauten und Zentralgebäudeneubau) wurde die durch die Universität genutzte, beheizte Nettogrundfläche von 56.148 m<sup>2</sup> auf 80.581 m<sup>2</sup> erhöht.
- Der absolute Bedarf an Wärme auf dem Campus (inkl. Fremdnutzer, ohne Zentralgebäudeneubau, Bezugsfläche Uni 56.148 m<sup>2</sup> bzw. 62.861 m<sup>2</sup>) ist von 6.099 MWh in 2011 auf 4.763 MWh (bereinigt 4.348 MWh, teilweise Probleme mit Heizungssteuerung durch Ersatz der MSR, sind inzwischen behoben) in 2015/2016 gesunken, der Strombedarf von 3.153 MWh in 2011 durch den Bedarf an Baustrom und Bauheizung auf 3.843 MWh gestiegen in 2015/2016 (bereinigt auf 2.269 MWh gesunken).
- Die Heizperiode 2016/2017 ist noch nicht abschließend bilanziert, hier gibt es aufgrund von Baustrombedarfen und Heizungseinregulierung weiterhin Unsicherheiten, insgesamt werden die angezielten 30 % Reduzierung im Endenergie-Bedarf seit Beginn des Contractings erreicht.
- Primärenergetisch ergeben sich bei den Bestandsgebäuden höhere Einsparungen von 152 kWh/m<sup>2</sup>a auf 77 kWh/m<sup>2</sup>a inklusive Nutzerstrom (Bei Verwendung eines PEF von 1,1 für Biomethan) (Abb. 19, Opel et al. 2017)

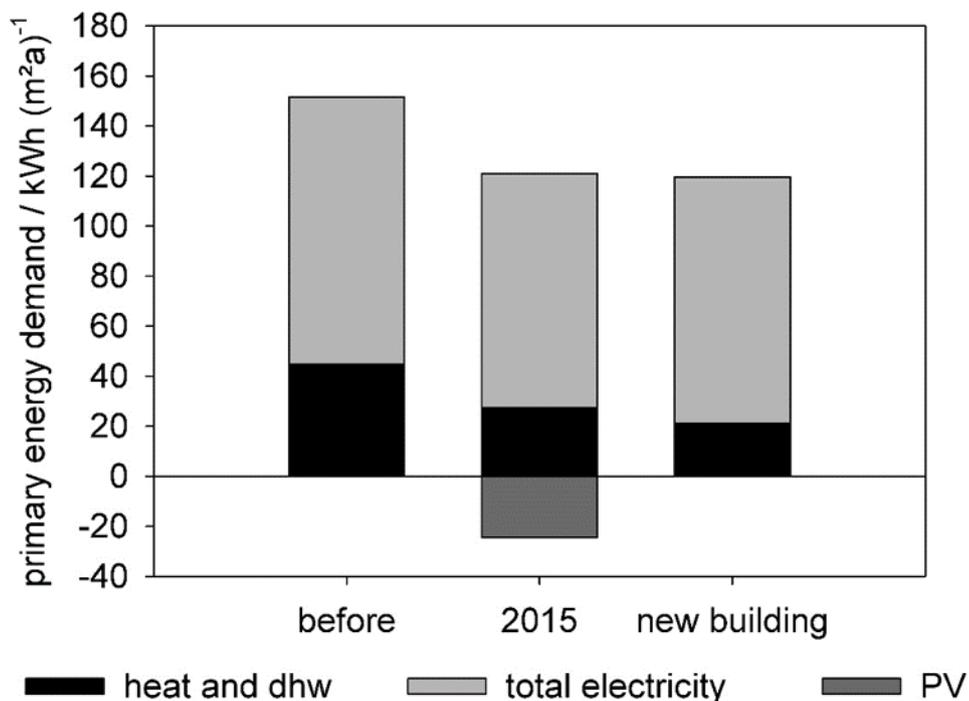


Abb. 19: Primärenergiebedarfe der Campusgebäude vor und nach Einsparung im Vergleich mit dem neuen Zentralgebäude.

- Bei Bewertung des Biomethans als EE-Methan und Verwendung eines PEF von 0,5 (wichtigstes Kriterium ist die Langfristigkeit der Lieferverträge: Aus dem Erdgasnetz bezogenes Methan kann für die Ausstellung eines Energieausweises nicht den PEF 0,5 bekommen, wenn ohne technische Änderungen durch einfache Änderung des Liefervertrags stattdessen Erdgas bezogen werden kann) wurde im letzten Messjahr ein spezifischer Primärenergieverbrauch von 13,5 kWh/m<sup>2</sup>a erreicht. Dies ist eine bedeutende Reduktion, entspricht jedoch nicht dem Projektziel, da die erreichten KWK-Anteile durch die noch nicht erfolgte Umsetzung des Aquiferwärmespeichers und der Betriebsführung der Anlagen vor Ort nicht die erzielten 92 %, sondern 2016 nur 74,2 % betragen.
- Monetär ergeben sich durch das ESC keine Einsparungen, da die Contractingrate in etwa der Einsparung entspricht. Durch den günstigeren Wärmeeinkauf entstehen Einsparungen, die bislang aber durch den höheren Bedarf (insbesondere Baustrom) wieder aufgezehrt werden. Perspektivisch sollen die Einsparungen für die Umsetzung weiterer Effizienzmaßnahmen (Fenstertausch/Kellerdeckendämmung) genutzt werden.
- Im Bereich Modellierung und Einbindung thermischer Speicher konnten bedeutende Fortschritte gegenüber dem Stand der Technik erreicht werden. Insbesondere konnte im Rahmen einer Promotionsarbeit ein wahrscheinlichkeitsbasierter Lastprofilgenerator für die Energiesystemsimulation mithilfe generischer Lastprofile auf der Basis historischer Wetterdaten in MATLAB programmiert und für die Systemsimulation mit TRNSYS (standortspezifisch mittels FeFlow validiertes Modell) genutzt werden. Hierdurch wird anstelle eines statischen Standardlastprofils eine deutlich realistischere dynamische Speichersimulation und fundiertere Investitionsentscheidung ermöglicht (siehe Strodel 2018).
- Die detaillierte Monte-Carlo-Simulation ergab eine Speichereffizienz von über 70 % und spezifische Speicherkosten von etwa 6 c/kWh aufgrund der nur geringen Auslastung des Speichers mit 3 GWh einspeicherbarer Wärme. Bei voller Auslastung mit etwa 15 GWh verringerten sich die Speicherkosten auf deutlich unter 2 c/kWh. Dennoch wäre der Speicher am Standort Scharnhorststraße durch die EEG-Vergütung des aus Biomethan erzeugten Stroms bei etwa 20 % Investitionsförderung wirtschaftlich.
- Durch die Umsetzung des Aquiferspeichers würden die jährlichen Emissionen nochmals deutlich um etwa 2.400 t CO<sub>2</sub> pro Jahr auf – 4.060 t/a gesenkt und ermöglichten eine Kompensation der beyond Tier 3-Emissionen durch Pendelverkehre.

- Für die Umsetzung des Speichers konnte bislang aufgrund von Vorbehalten gegenüber der Zuverlässigkeit und genehmigungsrechtlichen Zulässigkeit sowie dennoch kein federführender Partner gefunden werden. Die aufgetretenen Fragen werden derzeit in einem Anschlussprojekt „Aquiferspeicher“ 03ET1376A untersucht.
- Der Universitätscampus sowie das Zentralgebäude wurden mit umfangreichem Monitoring ausgestattet und werden derzeit in einem Monitoringprojekt untersucht.
- Das Zentralgebäude konnte mithilfe der innovativen Bauart und technischen Elemente unter Einhaltung der Ziele zur Energieeffizienz umgesetzt werden. Anstelle der zunächst geplanten Vakuumisolationsverglasung wurde schaltbare Verglasung in ausgewählten Bereichen eingesetzt, die den Wegfall der baulich nicht umsetzbaren Betonkerntemperierung zur Kühlung teilweise kompensieren konnte.
- Das Gebäude wurde mithilfe der Software ZUB Helena Ultra energetisch bewertet sowie mithilfe der mit TRNSYS verwandten Software DOE2.E dynamisch modelliert.
- Es ergeben sich im Modell den Projektzielen entsprechende Werte. Abb. 20 zeigt die Synopse aus den unterschiedlichen Modellen (Opel et al. 2017).

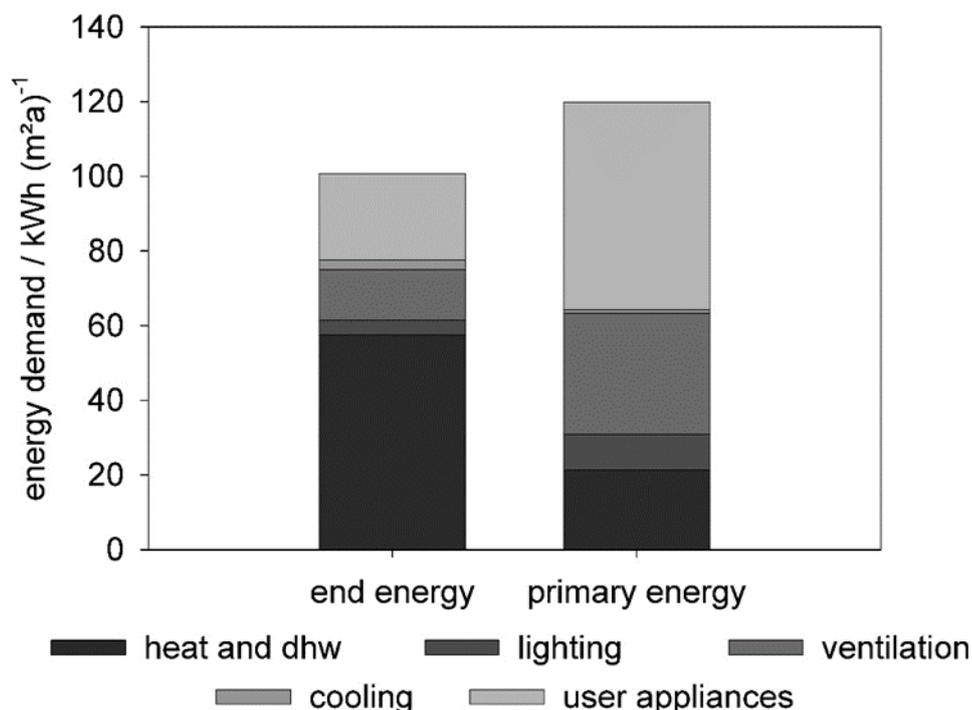


Abb. 20: Primär- und Endenergiebedarfe des Zentralgebäudeneubaus (Opel et al. 2017)

- Das Ambient-Intelligence-Konzept sowie das Konzept zum innovativen Facility-Management wurden weitestgehend entsprechend der ursprünglichen Planung umgesetzt. Auf der Basis

autonom arbeitender, jedoch in die Gebäudeleittechnik eingebundener Einzelraumregler wurden die 3. und 4. Etage des Bauteils Forschungszentrum mit Ambient Intelligence-Technologie ausgestattet und eine webbasierte Nutzerschnittstelle für das Smartphone, kommunikationstheoretisch fundiert (Tribel et al. 2014), entwickelt. Die Beauftragung der im Projekt entwickelten App / Webanwendung erfolgt im Monitoring-Anschlussprojekt.

- Eine flexible Abwärme- und Speichernutzung ist aufgrund der Wärmenutzung auf insgesamt drei unterschiedlichen Temperaturniveaus möglich. Im Zentralgebäude wird Wärme auf dem Temperaturniveau 55/35°C in den statischen Heizflächen, Unterflurkonvektoren und für die Trinkwassererwärmung (Küche über Frischwasserstationen) genutzt. Niedrigtemperaturwärme auf dem Niveau 35/25°C wird für die raumluftechnischen Anlagen verwendet. Es konnten Anregungen für die Entwicklung intelligenter Steuerungsstrategien gegeben werden, die von ausführenden Firmen in eigenen Produkten umgesetzt wurden.
- Die durch den Bau des neuen Gebäudes hervorgerufenen Emissionen von etwa 12.500 t CO<sub>2</sub> (graue Energie) werden durch extern vermiedene Emissionen (Überschussstromspeisung) des Campussystems nach Kompensation aller Tier 3-Emissionen bis etwa 2024 kompensiert.

## 1.2 Bearbeitung des Arbeitsplanes und bedeutende Ergebnisse

### 1.2.1 *Teil EnEff:Stadt*

#### 1.2.1.1 Umsetzung Einsparmaßnahmen der Bestandsgebäude / Energiecontracting

Zunächst erfolgte die Aufnahme der Campusgebäude und der vorhandenen Technik zur Abschätzung der zukünftigen Energiebedarfe und Vorbereitung der Ausschreibung

Hierfür wurde eine komplette Dokumentation der Campusliegenschaft als Bieterinformation erstellt.

Eine wesentliche Herausforderung war die Einbeziehung der Forschungsziele in die wirtschaftliche Ausschreibung. Dies gelang durch die gewählte Verfahrensform, wobei in Verhandlungsgesprächen und durch einen für alle Bieter zugänglichen Datenraum jeweils die neuesten Informationen zur Verfügung gestellt und in die Verhandlungen eingebracht wurden.

Nach Eröffnung des Verfahrens wurde das Verfahren und die Verhandlungen vom Team begleitet und die Schnittstellen zwischen Einspar- und Liefercontracting integral bearbeitet.

Basierend auf einem Bewertungsschema, in das der Preis zu 40 % und Nachhaltigkeitskriterien (Anteil erneuerbarer Energien und Exergieeffizienz) zu insgesamt 60 % eingingen, konnte die Vergabe wie geplant im Vergleich zu einem Referenzszenario erfolgen.

Ein echtes Problem stellte die gleichzeitige Vergabe und gegenseitige Integration hinsichtlich Energieliefer- und Einsparcontracting dar, die als zwei Lose vergeben wurden. Während mögliche Energieeinsparungen zunächst nur geschätzt in die Ausschreibung hinsichtlich des Liefercontractings einfließen konnten, was jedoch bei allen Bietern verhältnismäßig unproblematisch aufgenommen wurde, ergaben sich für das Energieeinsparcontracting deutlich größere Hürden, da die gemäß dena-Leitfaden vorgesehene Kostenbaseline nicht angegeben werden konnte. Ursache hierfür war die gleichzeitige Vergabe des Liefercontractings, wodurch die zukünftigen Energiebezugskosten zum Zeitpunkt der Ausschreibung des Einsparcontractings nicht bekannt waren und sich auch nicht abschätzen ließen. Eine Wirtschaftlichkeitsberechnung eines etwaigen Maßnahmenpaketes auf Grundlage der bestehenden Bezugspreise wäre somit nach Vergabe des Liefercontractings in jedem Fall mit den neuen Energiebezugskosten zu wiederholen. Weiterhin sollten die derzeitigen Energiebezugspreise, die für die kostenseitige Bewertung der Liefercontracting-Angebote als Maßstab herangezogen wurden, nicht bekannt gemacht werden, um zielgenaues Unterbieten der für das Erreichen einer entsprechenden Punktebewertung ermittelten spezifischen Kosten (Arbeits- und Leistungspreis) zu verhindern. Statt einer Kostenbaseline sollte daher eine Energieverbrauchsbaseline genutzt werden. Die Bieter waren aufgefordert, für etwaige interne Kalkulationen marktübliche Wärme- und Strompreise anzunehmen und die einzelnen geplanten Maßnahmen in Einsparpotential und € / kWh spezifischen Einsparkosten anzugeben, was jedoch seitens der Bieter überwiegend nicht positiv aufgenommen wurde, obwohl eine Bewertung der Angebote bezüglich des Einsparcontractings alleine auf der Summe der identifizierten Primärenergieeinsparungspotentiale sowie weiteren, nur indirekt die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen betreffenden Kriterien durchgeführt wurde. Letztlich sah sich aufgrund des ungewöhnlichen Verfahrens nur ein Bieter in der Lage, ein entsprechendes Angebot abzugeben.

Im Rahmen des Verhandlungsverfahrens konnten viele Aspekte des Projekts bereits mit den möglichen späteren Partnern thematisiert werden, insbesondere auch die Einbindung des Gebietes Bockelsberg und die Aquiferwärmespeicherung, für die erste Ergebnisse der geologischen Kenntnisstandsanalyse und Energiesystembetrachtungen bereitgestellt wurden. Es wurde deutlich, dass sowohl die wirtschaftliche Machbarkeit als auch die

Wärmerückgewinnungsraten eines Aquiferspeichers ohne Betrachtung des Gebietes Bockelsberg voraussichtlich aufgrund der geringen Abnahmekapazität ungenügend wären. Aufgrund der rechtlichen Konstellationen konnte die Universität die Energieversorgung des Bockelsberg-Gebietes jedoch nicht zum Bestandteil der Ausschreibung und der Angebotsbewertung machen. Es wurde sich daher darauf verständigt, dass entweder seitens der Bieter selbständig während des Verfahrens oder nach Vergabe eine Einigung mit dem Netzeigentümer und Betreiber/Versorger des Gebietes Bockelsberg gefunden werden und die Herstellung eines Aquiferspeichers als Option, die seitens des Versorgers nach Vergabe wahrgenommen werden kann, in den Wärmeliefervertrag integriert werden sollte. Insgesamt wurde von einer Mehrheit der Bieter jedoch die Herstellung und der Betrieb eines Aquiferwärmespeichers dennoch im Verlauf des Verfahrens kalkuliert und angeboten, wobei letztlich eine zum Status Quo kostenneutrale Lösung mit Aquiferwärmespeicher auch für eine isolierte Betrachtung des Campus angeboten und als Nebenangebot auch (letztlich zweitplatziert aufgrund der hohen Investitionskosten und daher Leistungspreise) bewertet wurde.

Letztlich erschien es jedoch sinnvoller, die Kosten und den spezifischen Nutzen einer Aquiferspeicherlösung nach Vergabe gemeinsam mit dem obsiegenden Bieter im Rahmen der Detailplanung mithilfe der Forschungspartner zu optimieren, da hier viele spezifische, je nach Partnerkonstellation unterschiedliche Kosten und Potentiale auftreten, die während des Verfahrensverlaufes aufgrund des nur eingeschränkt möglichen Informationsaustausches nur schlecht abzubilden waren. Die Machbarkeitsstudie, die ebenfalls als Referenzmodell genutzt wurde, ergab jedoch mit den vorläufig verwendeten, nicht spezifizierten Parametern sowie einem geschätzten Lastverlauf im Gebiet Bockelsberg eine gute technisch/geologische sowie wirtschaftliche Machbarkeit für den Fall des großen Abnehmersystems inklusive Bockelsberg bei gleichzeitig durchgeführten Maßnahmen zur exergetisch effizienteren Wärmekaskadierung und Rücklaufauskühlung (Anhang I). Die Ergebnisse der Machbarkeitsstudie wurden allen Bietern zur Verfügung gestellt.

Die Modellierung seitens EPA-Aachen (Anhang II) zeigte eine mögliche Rücklaufabsenkung von derzeit 55°C auf ca. 40°C im Campusnetz.

Da für das ESC ein Finanzierungskonzept auf der Basis einer 70%-igen Forfaitierung (Forderungsverkauf an die finanzierende Bank) gewählt wurde und es sich somit um ein kreditähnliches Geschäft handelt, musste die Zustimmung des nur ¼-jährlich

zusammentreffenden Stiftungsrats eingeholt werden, ein beschleunigtes Zustimmungersuchen im Umlaufverfahren schlug aufgrund auftretenden Diskussionsbedarfs fehl. Letztlich konnte das Konzept den Stiftungsrat jedoch überzeugen, der im Rahmen seiner Sitzung am 30. August 2012 seine Zustimmung zu dem Konzept gab.

Nach erfolgter Zustimmung durch den Stiftungsrat konnte das Energieeinsparcontracting (ESC) vergeben werden. Obsiegender Bieter war die Cofely Deutschland GmbH (inzwischen engie Deutschland GmbH). In der dem Angebot zugrundeliegenden Grobanalyse wurden im Bereich der Bestandsgebäude wirtschaftliche Einsparpotentiale von ca. 1,5 GWh/a Wärme (entsprechend 25%) sowie 857 MWh/a Strom (30%) bei einem Investitionsvolumen von ca. 2,5 Mio. € ausgewiesen. Durch den Einsatz von Photovoltaik und einem dezentralen klein-BHKW für die Warmwassererzeugung der Mensa sollten insgesamt 39% Reduktion des Primärenergiebedarfs (bewertet aufgrund der bestehenden, noch nicht auf EE umgestellten Erzeugung) erreicht werden.

Durch die Hinzunahme baulicher Maßnahmen (Innendämmung, Fenster, Kellerdeckendämmung, ggf. Dachgeschosse, Invest zusätzlich 4 Mio. €), die nochmals eine Verringerung des Wärmebedarfs um 1,5 GWh erbringen würden, hätte dieses Potential auf ca. 47,4 % Primärenergieeinsparung gesteigert werden können. Diese Maßnahmen sind aus sich heraus jedoch nicht wirtschaftlich. Im Rahmen der Feinanalyse wurde geprüft, welche Maßnahmen in der integralen Betrachtung sinnvoll sind. Innendämmung stellte sich als nicht praktikabel heraus. Kellerdeckendämmung, Dachgeschosse und Fenster sind demgegenüber zu geringeren Kosten umsetzbar und sollen wie ein Austausch der Fenster seitens der Universität aus den Einsparungen, auch im Rahmen der neuen Energielieferkonditionen, refinanziert werden. Zu lösen ist noch die sich ergebende Anforderung zur Erstellung eines Lüftungskonzepts für die Bestandsgebäude, das die etwa 4 Mio. € Kosten für den Austausch der Fenster signifikant erhöht.

In der Feinanalyse durch den EE-Contractor Cofely ergaben sich vorrangig wirtschaftliche Maßnahmen im Bereich der TGA-Systeme (Heizung (Neuberechnung Lastkurven, hydraulischer Abgleich, Pumpen, Isolation und Rücklaufabsenkung, optimierte Nutzungsregelung), Lüftung (verbesserte Wärmerückgewinnung, Frequenzumformer), Beleuchtung (Ersatz Leuchtmittel, Präsenz- und Tageslichtsteuerung), Einzelraumregelung in ausgewählten Bereichen (für Heizung, Beleuchtung) sowie der weitere Einsatz von Photovoltaik auch auf ost- und westausgerichteten Dächern (insgesamt installiert August 2014: 720 kWp). Eine weitere

wesentliche Maßnahme ergab sich mit der Abschaltung des Wärmenetzes im Sommer und Deckung des geringen Warmwasserbedarfs auf dem Campus (nur Putzmittelräume) durch dezentrale Warmwasserbereiter, die Option eines separaten BHKW für die Warmwasserbereitung der Mensa wurde verworfen, stattdessen wurde ein Ersatz des abgängigen Dampferzeugers durch einen Schnelldampferzeuger und die Warmwasserbereitung über Dampf eingerichtet. Bauliche Maßnahmen ergaben demgegenüber nur eine geringe zusätzliche Einsparung (Fenster etwa 10 % Wärme bei etwa doppelten Kosten verglichen mit den durchgeführten Maßnahmen, ohne Lüftungskonzept) bei schlechter Wirtschaftlichkeit und wurden daher nicht im Rahmen des Einsparcontractings durchgeführt. Eine Durchführung weiterer baulicher Maßnahmen ist vielmehr im Rahmen der Bauunterhaltung geplant.

Die Bestandsgebäude auf dem Campus wurden im Rahmen der Umsetzung des Energieeinsparcontractings mit neuen Wärmemengenzählern je Gebäude ausgestattet.

Die Umsetzung war rechtzeitig vor der EEG-Novelle 2014 (EEG-Umlagepflicht für Eigenverbrauch) im Sommer 2014 abgeschlossen (Abb. 21), als letzte Maßnahme wurde die Beleuchtung komplettiert.



Abb. 21: Abnahme der Photovoltaikinstallation am 18.12.2013.

Mit Beginn der ersten Heizperiode nach Umsetzung der Einsparmaßnahmen gab es seitens der Nutzer massive Beschwerden über zu geringe Temperaturen, insbesondere war die Einzelraumregelung noch nicht voll in Betrieb genommen. Weiterhin mussten mit der

Präsenzerfassung zusammenhängende Datenschutzfragen nachträglich in Kooperation mit dem Personalrat gelöst werden. Die durch den hydraulischen Abgleich zwar gleichmäßigeren, in vielen vorher sehr gut beheizten Räumen jedoch abgesenkten Temperaturen sorgten für anhaltende Beschwerden einer geringen Anzahl an Nutzern. Hinzu kamen verschiedene Offsets der Außentemperaturfühler, die in einzelnen Gebäuden zu deutlich zu geringen Raumtemperaturen führten. Hierauf wurde durch Verwendung eines zentralen Fühlers, intensive Nachmessung der Temperaturen, Anpassung der Ventil-Voreinstellungen, der Heizkurven und teilweise Nachrüstung von Heizflächen reagiert. Einzelne Bestands-MSR-Schränke einer älteren Siemens DDC-3000 Baureihe waren zudem nicht wie vorgesehen steuerbar bzw. wiesen Defekte auf, aufgrund nicht mehr verfügbarer Ersatzteile musste auf eine Vorlauftemperaturregelung verzichtet und die Anlagen im Handbetrieb betrieben werden. Erst in 2016 konnten die abgängigen MSR-Schränke ersetzt werden, die Außentemperaturregelung war in der Heizperiode 2016/2017 außer Betrieb. Das Gebäudemanagement der Leuphana einigte sich zur Vereinfachung der Prozesse mit dem Contractor engie auf die erneute Einregulierung der betroffenen Heizsysteme durch das Betriebspersonal der Leuphana.

#### 1.2.1.2 Vergabe Energieliefercontracting und Umsetzung Energiesystem

Das Energieliefercontracting (ELC) wurde an den örtlichen Versorger Eon-Avacon Wärme vergeben, der aufgrund der vor Ort bereits vorhandenen Infrastruktur letztlich das wirtschaftlichste Angebot abgeben konnte. Dieser Versorger betreibt ebenfalls das Nahwärmenetz Bockelsberg sowie 2 weitere Nahwärmenetze in Lüneburg, die bereits auf Biogas umgestellt sind. Aufgrund des somit den Bockelsberg umfassenden, größeren Abnehmersystems können laut Angebot 92% KWK-Wärme aus Biogas erreicht werden, womit das Angebot sich auch hinsichtlich der Nutzung regenerativer Energien besser platzieren konnte als die Mitbewerber. Die Ansätze zur Kaskadierung der Wärmeversorgung wurden weitestgehend in das angebotene Versorgungskonzept integriert, die Option einer Aquiferwärmespeicherung wird mit spezifischen Daten zum Abnehmersystem sowie zur Kostenstruktur des Energiesystempartners wirtschaftlich bewertet. Einbezogen werden hier zudem bereits die Potentiale in den Bestandsgebäuden zur Energieeinsparung, Rücklaufabsenkung und Niedrigexergienutzung.

Eine Variantenbewertung ergab bereits für die KWK-Grundlastauslegung eine gute Exergieeffizienz, sowohl Konzepte mit Kurzzeitspeicherung als auch mit Langzeitspeicherung (Aquiferspeicher). Die Ergebnisse sind in Abb. 22 dargestellt. Es ergibt sich ein starker Einfluss der exergetischen Bewertung der Eingangsgröße (Bio-)gas. Chemisch liegt diese sehr hoch (ca.  $\eta_c=0,89$ ), die maximale energieökonomische Nutzbarkeit wird jedoch durch den technischen Best-Case definiert, den derzeit GuD-KWK-Kraftwerke erreichen (Lüking 2011, Opel et al. 2017).

	Exergieeffizienz $\eta_c$	Exergieaufwand
Heizkessel	0,03	$0,68 \cdot Q_{\text{Wärme}}$
Grundlast-BHKW	0,49	$0,66 \cdot Q_{\text{Wärme}}$
BHKW stromgeführt	0,63	$0,53 \cdot Q_{\text{Wärme}}$
BHKW mit Aquifer	0,68	$0,52 \cdot Q_{\text{Wärme}}$

- Grundlast-BHKW: 60% KWK-Wärme, 40% Kessel, 50 m<sup>3</sup> Speicher
- BHKW stromgeführt: 90% KWK-Wärme, 10% Kessel, 200 m<sup>3</sup> Speicher, Auslegung auf mittlere Last
- BHKW mit Aquifer: 100% KWK, 60% Speicherwirkungsgrad, 33% gespeicherte Wärme

Bewertung  $\eta_c$  (Biogas) = 0,62 (Entspricht GuD-FW  $\eta_{el.} = 0,59$  und  $\eta_{th.} = 0,03$ )  
[Lüking 2011]

Abb. 22: Exergetische Bewertung verschiedener Wärmeerzeugungskonzepte (Opel et al. 2017)

Neben der Exergieeffizienz wird der Exergieaufwand bezogen auf die Wärmeversorgungsaufgabe ermittelt. Hier bedeutet ein Faktor kleiner 1, dass weniger Exergie eingesetzt als Nutzenergie für die Wärmeversorgung benötigt wird. Der Exergieaufwandsfaktor ist abhängiger vom Wärmebedarf und der Endenergieeffizienz als die Exergieeffizienz, bei der die Wärme aufgrund des geringen Carnotfaktors kaum eine Rolle spielt. Er eignet sich daher zum Vergleich verschiedener Konzepte, deren primärer Sinn die effiziente Wärmeversorgung ist. Die Wärmeversorgung auf der Basis biogener Brennstoffe stellt aus Nachhaltigkeitssicht deutlich größere Anforderungen an Energieeffizienz als solare Systeme, da die Umweltauswirkungen der Biogas- (und auch Windgas-) Produktion höher als diejenigen solarer Systeme sind.

Vom Standpunkt des Klimaschutzes aus ist Biomethan dennoch ein geeigneter Energieträger für die Energiewende. Den aktuellen landwirtschaftlichen Vorgaben und in dem Stand der Technik entsprechenden Anlagen erzeugtes und eingespeistes Biomethan weist spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen von ca. 60-80 g CO<sub>2</sub> / kWh auf, deutlich weniger als Erdgas. Der Energiemaisanbau hingegen ist aufgrund der hohen spezifischen Erträge hinsichtlich der spezifischen Klimagasemissionen hinter Kurzumtriebsplantagen die klimafreundlichste Biomasse und zudem vergleichsweise wenig wasserintensiv, Probleme stellen jedoch teilweise Erosion und bei großen zusammenhängenden Flächen Artenverarmung dar. Aus diesen Gründen wird eine Fruchtfolge mit nur geringfügig höheren spezifischen Klimagasemissionen aber verbesserter Bodenverträglichkeit praktiziert (Lutzenberger 2009, Arnold et al. 2010, Vetter & Arnold 2010, Adelt 2011). Auf die Belange des Naturschutzes muss durch separate Regelungen Rücksicht genommen werden. Aus Sicht des Klima- aber auch des Naturschutzes besonders zu vermeiden ist der (nicht subventionierte und daher zunächst unwirtschaftliche, durch zeitweise sehr hohe Nachfrage und Preise für Biogas-Maissilage jedoch teilweise lukrative) Grünlandumbruch, wobei nicht überall alle Flächen erfasst sind, die zur Nutzung für den Biomasseanbau genutzt werden, und somit ein unbekannter Teil der erzeugten Biomasse offenbar dennoch auf ehemaligem Grünland erzeugt wird.

Der Austausch der BHKW durch neue Aggregate fand in 2013 statt (Abb. 23 u. 24). Der Betrieb mit Biomethan begann im Januar 2014.



Abb. 23: Modernisierung der Heizzentrale



Abb. 24: Modernisierung der Heizzentrale

Die Integration eines Aquiferwärmespeichers (Abb. 25) wurde in mehreren Varianten untersucht. Parameter waren die Art der Einbindung in das Energiesystem (Auspeicherung für Bockelsberg, Campus und Zentralgebäude separat oder zusammengefasst), die BHKW-Leistung sowie die Anordnung der Bohrungen. Modelliert wurde hierfür neben der klassischen, thermisch-hydraulisch getrennten Anordnung die an einem Bohrplatz zusammengefasste Anordnung der zwei Bohrungen (warm und kalt). Bei dieser Anordnung werden durch den wegfallenden zweiten Bohrplatz und kürzerer oberirdischer Verrohrung deutlich Kosten und oberirdische Verluste verringert. Zudem wird ein höherer Wirkungsgrad erreicht. Abb. 11 zeigt die beiden Varianten.

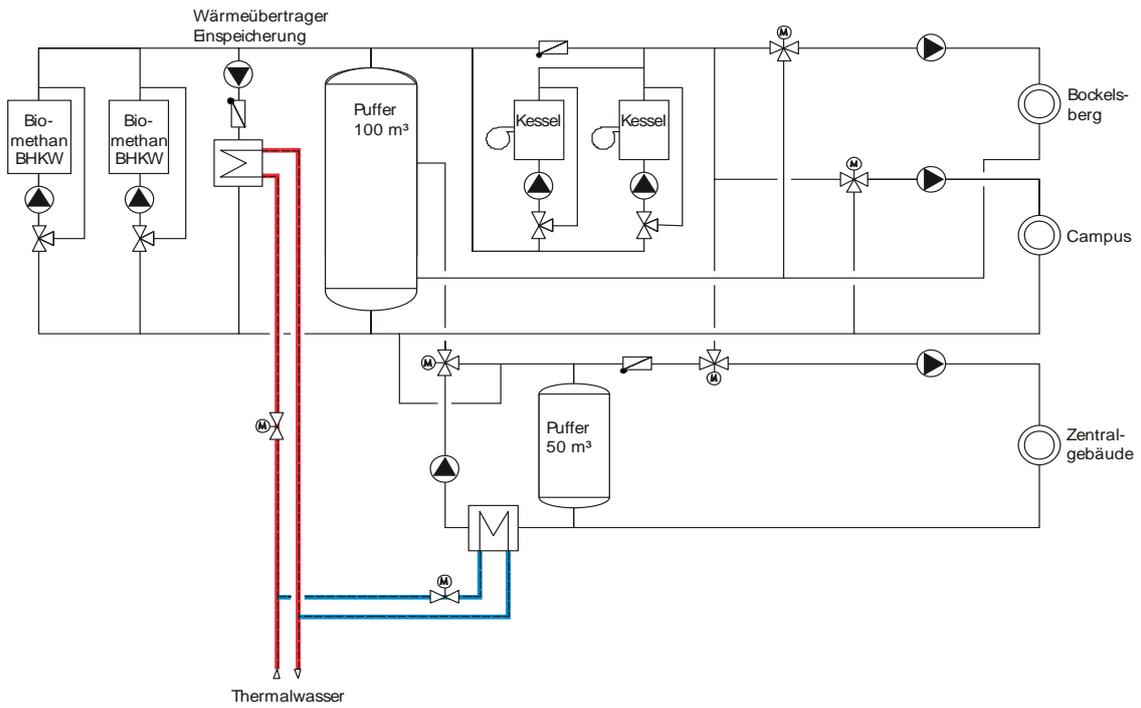


Abb. 25: Integration Aquiferspeicher

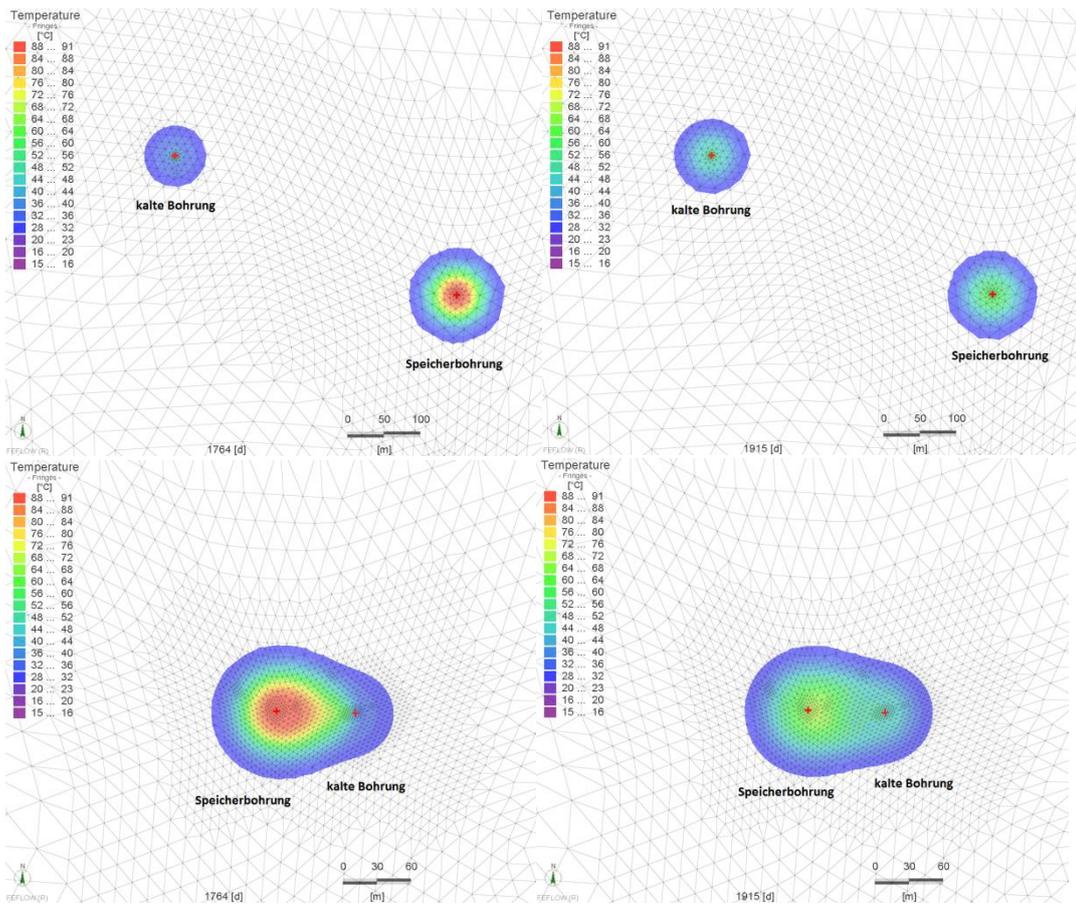


Abb. 26: oben: Variante mit thermisch-hydraulisch getrennten Bohrungen, unten Variante mit thermisch-hydraulisch nicht getrennten Bohrungen.

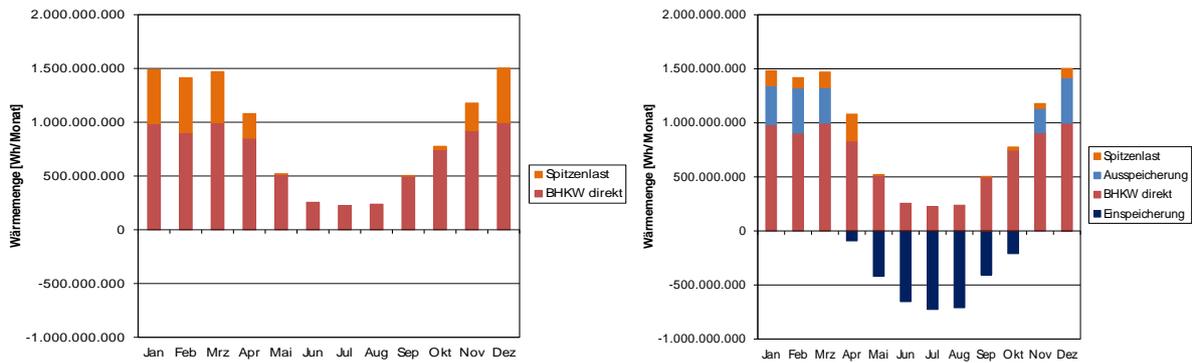


Abb. 27: li.: Wärmebereitstellung ohne, re.: Wärmebereitstellung mit Aquiferspeicher (Blau)

Durch die Integration des Speichers kann der Spitzenlast-Bedarf stark reduziert werden. Abb. 27 zeigt die Energiebereitstellung für das Quartier ohne und mit Aquiferspeicher.

In der Arbeit von Nikolai Strodel wurde das von der GTN Neubrandenburg erstellte und anhand von Daten aus der geologischen Kenntnisstandsanalyse parametrisiert und mit FeFlow validierte TRNAST-Modell des Aquiferspeichers nochmals verfeinert. Das gesamte Energiesystem wurde mithilfe auf der Basis gemessener Lastgänge und historischer Wetterdaten zufällig generierten Lastgängen und der tatsächlichen Automationsprogramme in TRNSYS simuliert und optimiert. In diesen Simulationen wurden sehr gute Speichereffizienzen von über 70 % erreicht (Abb. 28).

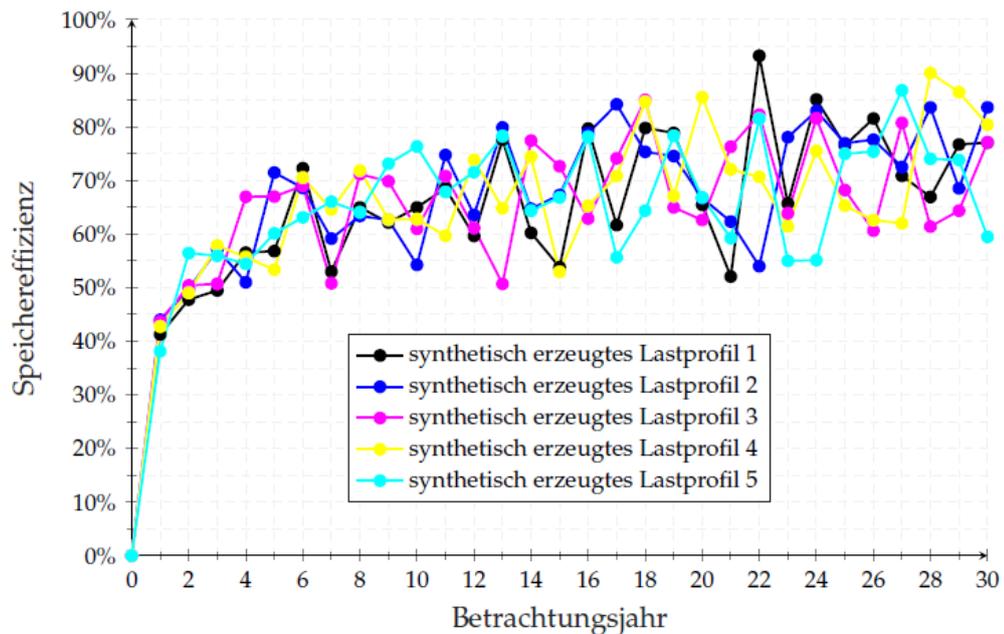


Abb. 28: Wahrscheinlichkeitsbasierte Simulation des Aquiferwärmespeichers nach Monte-Carlo

Weiterhin wurde das Energiesystemmodell mit Zahlungsströmen gekoppelt. Auf dieser Basis konnte die Wirtschaftlichkeit mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation über etwa 200 simulierte Jahre inkl. Wartungskosten und Versicherung gerechnet und eine exakte Risikobewertung gegeben werden (Abb. 29).

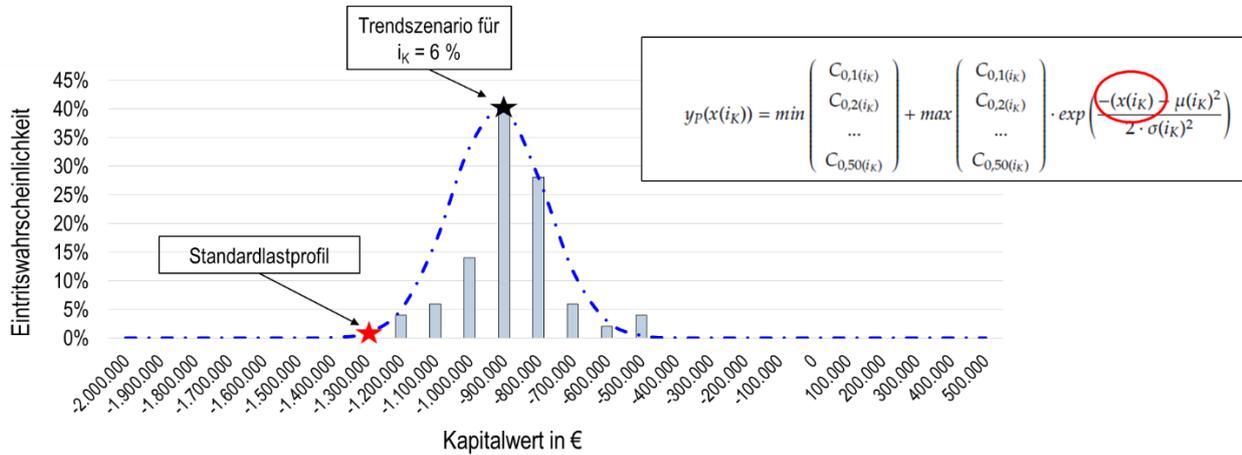


Abb. 29: Wahrscheinlichkeitsbasierte Wirtschaftlichkeitsanalyse (Strodel 2018), Beispiel mit großer Streuung der Ergebnisse für einen hohen Zinssatz von 6 %.

Spezifische Speicherkosten ohne den Einbezug von Förderung lägen beim betrachteten System bei etwa 6 c/kWh, was jedoch auf die nur geringe jährlich speicherbare Energiemenge aus den zwei BHKW (etwa 3 GWh) zurückzuführen ist. Bei Ausnutzung der gesamten Kapazität von etwa 15 GWh lägen die Speicherkosten dementsprechend bei deutlich unter 2 c/kWh. Trotz der hohen Speicherkosten im betrachteten Beispiel wäre das System durch die EEG-Vergütung des aus Biomethan erzeugten Stroms bei Beantragung von Fördermitteln für die zu tätigen Investitionen i.H.v. mindestens 20 % am Standort wirtschaftlich zu betreiben. Die Ergebnisse werden für weitere Gespräche zur Umsetzung des Konzepts verwendet.

Die Treibhausgasbilanzierung wurde auf der Basis für die Versorgung des Campus und des Gebietes Bockelsberg eingesetzter Biomethan- und Erdgasmengen vorgenommen. Die Endenergieströme EE wurden hierfür mit den entsprechenden Emissionsfaktoren  $f_{EM}$  multipliziert und nach Gleichung (1) aufsummiert, wobei für eingespeisten Strom negative Emissionen entsprechend dem Verdrängungsstrommix angesetzt wurden (Opel et al. 2017).

$$CO_2eq_{total} = \sum_{i=1}^i (f_{EM} \cdot EE) \quad (1)$$

Tabelle 3 zeigt die sich ergebende Treibhausgasbilanz mit und ohne die Integration eines Aquiferspeichers.

Tabelle 3: Treibhausgasbilanz der Energieversorgung des Campus inkl. Bockelsberg

	w/o ATES	with ATES	$f_{EM}$	w/o ATES	with ATES
Biomethane (CHP)	16.6 GWh	23.3 GWh	80 g/kWh	1,328 t	1,864 t
Natural gas (vessels)	3.4 GWh	0.7 GWh	245 g/kWh	833 t	172 t
Electricity production (CHP)	6.4 GWh	9.2 GWh	- 821 g/kWh	- 5,254 t	- 7,553 t
Electricity consumption (campus, renewable)	2.7 GWh 0.55 GWh PV	2.7 GWh 0.55 GWh PV	5 g/kWh 80 g/kWh	14 t 44 t	14 t 44 t
Cars and business trips				599 t	599 t
other				≈ 800 t	≈ 800 t
<b>Balance</b>				<b>-1,636 t</b>	<b>-4,060 t</b>

Für Biomethan können über den gesamten Entstehungsprozess je nach Substrat und Anlagentechnik 40-80 g CO<sub>2</sub>äq/kWh angenommen werden (Lutzenberger 2009, Arnold et al. 2010, Adelt 2011), Erdgas wird mit 245 g CO<sub>2</sub>äq/kWh bilanziert. Durch eingespeisten KWK-Strom werden 821-921 g CO<sub>2</sub>äq/kWh vermieden (Memmler et al. 2013, Mauch et al. 2010, Gores et al. 2015).

Adelt, M. LCA of Biomethane. International Gas Union Research Conference (IGRC), 19-21 Okt. 2011, Seoul, Korea. ISBN: 978-1-6227-6385-6

Arnold, K., Dienst, C., Lechtenböhmer, S. Integrierte Treibhausgasbewertung der Prozessketten von Erdgas und industriellem Biomethan in Deutschland. In: Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung 2010;22:135-152. DOI: 10.1007/s12302-010-0125-6

Gores, S., Emele, L., Harthan, R., Jöb, W., Loreck, C., Cook, V. Methodenpapier zur Bewertung von KWK-Anlagen in mittelfristiger Perspektive bis 2030. Öko-Institut, Berlin, Germany, 2015.

Lüking, R.-M. (2011): Die Effizienz von Kraft-Wärme-Kopplung: ein Vorschlag zu einem neuen Bewertungsansatz. Bauphysik 2011;33: 329–337. doi:10.1002/bapi.201110798

Lutzenberger, A. Nachwachsende Rohstoffe zur Substitution von Mineralkraftstoffen. SVH Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften. Dissertation. ISBN 973-3-8381-0076-0, Germany 2009.

Mauch, W., Corradini, R., Wiesemeyer, K., & Schwentzek, M. (2010). Allokationsmethoden für spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen von Strom und Wärme aus KWK-Anlagen. *ET. Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 2010;60(9):12-14.

Memmler, M., Schrempf, L., Hermann, S., Schneider, S., Pabst, J., & Dreher, M. (2014). Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger– Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2013. *Climate Change* 2014;29:1-145.

Vetter, A., Arnold, K. (2010): Klima- und Umwelteffekte von Biomethan: Anlagentechnik und Substratauswahl. Wuppertal Papers Nr. 182, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, ISSN 0949-5266

### 1.2.1.3 Öffentlichkeitsarbeit, Einbindung in die Lehre und Klimaschutzbestrebungen der Stadt Lüneburg

Im Rahmen verschiedenster Seminare und Besuche durch Politik und interessierte Fachöffentlichkeit wurden das Konzept und der jeweilige Stand vorgestellt und eine Campus- und Baustellenführung angeboten und durchgeführt. Es gab ein Presseevent zur Unterzeichnung der Verträge zum ESC und ELC am 15.11.2012. Im Zusammenhang mit dem Projekt wurden auch die anderen Nahwärmesysteme der Stadt auf Biomethan umgestellt. Das Projekt leistete weiterhin Beiträge zu einer „100% EE-Studie“ für Stadt und Landkreis Lüneburg (nachhaltige Wärmeversorgung, Nahwärme und Aquiferspeicher).

[http://www.lueneburg.de/desktopdefault.aspx/tabid-4433/8862\\_read-37094/](http://www.lueneburg.de/desktopdefault.aspx/tabid-4433/8862_read-37094/)

Lüneburg ist seitdem 100 % EE-Zielregion. Im Strombereich wird Lüneburg bereits bilanziell zu über 50 % mit Strom aus erneuerbaren Energien versorgt (2021 werden über 100 % des Stroms regional aus erneuerbaren Energien kommen). Im Vergleich dazu ist die Versorgung mit Wärme nur zu ca. 7% aus EE angegeben (inklusive Prozess- und Industriewärme. Für Haushalte stammen bereits etwa 20 % der Wärme aus EE). Das Projekt klimaneutraler Campus Scharnhorststraße/Bockelsberg wurde hierbei als Kristallisationskeim einer nachhaltigen Wärmeversorgung in Lüneburg gesehen. Im Mai 2014 gab es eine Pressemitteilung zum klimaneutralen Campus mit überregionaler Resonanz. Das neue Zentralgebäude war zudem auf der Titelseite der New York Times zu sehen. Im gleichen Jahr gewann das Projekt den Deutschen Solarpreis für solare Architektur und Städtebau.

Das Aquiferspeicherkonzept wurde 2016 dem Umweltausschuss der Stadt vorgestellt.

Auf den Internetseiten zur Campuserwicklung werden vielfältige Informationen bereitgestellt. Während der Bauphase gab es eine stündlich aktualisierte Webcam-Aufnahme der Baustelle. Im Bau-Blog wurden Projektthemen populärwissenschaftlich aufbereitet. Hier sind bereits Beiträge zum Konzept „klimaneutraler Campus“ und „Exergieeffizienz“ veröffentlicht worden.

In der Lehre wurden verschiedene Veranstaltungen zu Themen der Energieeffizienz, Nutzereinbindung und nachhaltigen Campuserwicklung durchgeführt, insbesondere die transdisziplinären Lehrforschungsprojekte „NaCaVi – nachhaltiges Campusviertel“, „Energiewende in Quartieren“ und „Nachhaltige Mobilität“. Weiterhin wurden eine Masterarbeit zur Ambient-Intelligence-Umsetzung (Anhang III), eine Bachelorarbeit zur Gestaltung der Smartphone-App (Anhang IV) sowie ein Promotionsvorhaben zur Energiesystemplanung durchgeführt (Anhang V).

## 1.2.2 Teil EnOB

### 1.2.2.1 Prozess Zentralgebäudeneubau

Der Prozess bezüglich des Zentralgebäudeneubaus, der verschiedenen dort geplanten Maßnahmen und der Einbindung in das Campus-Versorgungssystem verlief aufgrund des bereits hohen Detaillierungsgrads der Vorplanung und dem professionellen Projektmanagement zunächst verhältnismäßig reibungslos. Abb. 30 - 32 zeigt den Grundriss des EG mit Cafeteria und Auditorium/Veranstaltungsflächen sowie Schnitte durch das Gebäude. Die Tribüne des Auditoriums ist verfahrbar, die Veranstaltungsflächen können zusammen oder durch große Brandschutztüren getrennt in 3 Abschnitten genutzt werden.

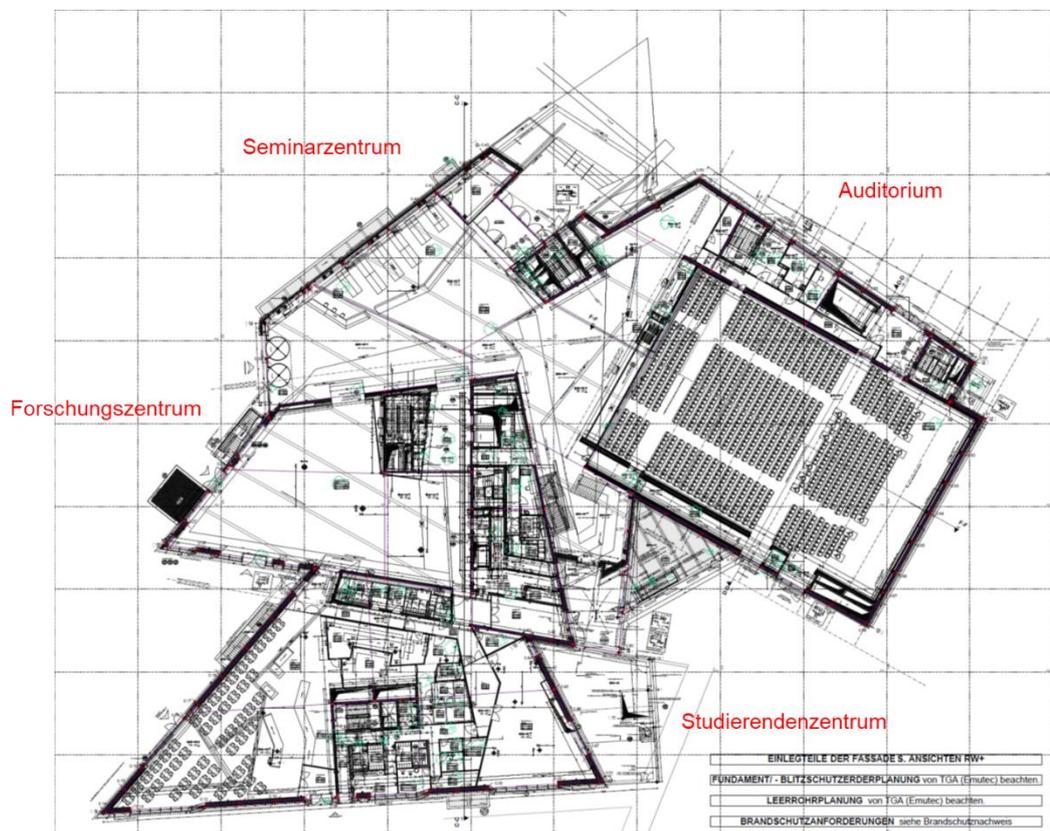


Abb. 30: Grundriss des Erdgeschosses mit den vier Bauteilen.

Das Auditorium mit 1.200 Sitzplätzen ist hinsichtlich Akustik und Medientechnik anspruchsvoll ausgestattet und bei verfahrbarer Tribüne für Veranstaltungen mit bis zu 2.500 Besuchern ausgelegt

Das Seminarzentrum bietet Räume zur Nutzung mit bis zu 50 Personen für Lehrveranstaltungen und Kongresse, mit abgeschlossenen Teilfluren und direktem Zugang zum Auditorium. Außerdem sind hier der Raum der Stille, ein interkonfessioneller Betraum und vermietete bzw. an interne und externe Gruppen vergebene Flächen untergebracht.

Forschungszentrum

Seminarzentrum



Abb. 31: Schnitt in Ost-West-Richtung

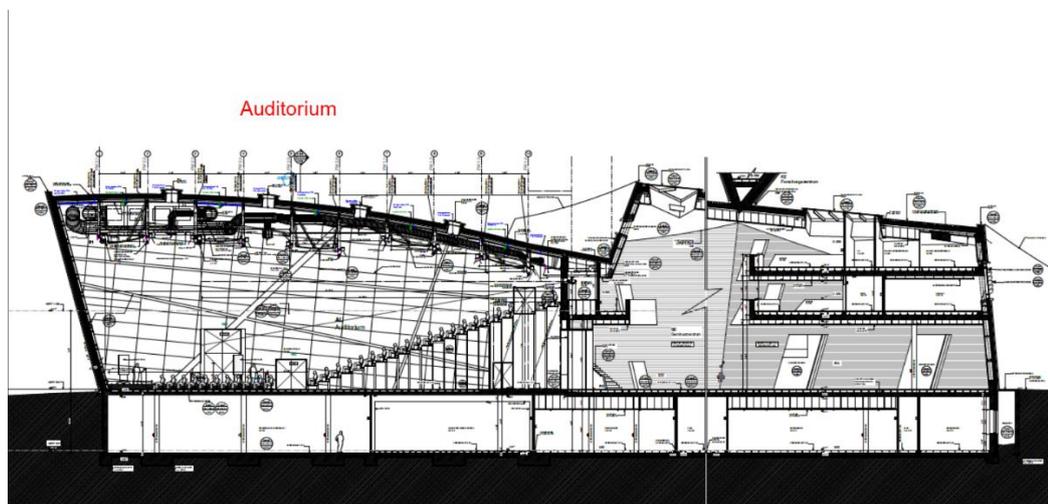


Abb. 32: Schnitt durch Auditorium und Foyer in Süd-Nord-Richtung

Das Studierendenzentrum bietet im Erdgeschoss Platz für Küche sowie Cafeteria, im Mezzanin ist das Transferzentrum untergebracht. Weiterhin finden sich Arbeitsräume für Studierende, Seminar- und Tagungsräume um einen Lichthof angesiedelt im 1. OG.

Der zentrale Bauteil Forschungszentrum bietet neben einem großen Seminarraum im 1. OG Büros und Besprechungsräume sowie im 5. und 6. Stock Open-Space-Flächen mit Dachterrasse, im 7. Stock ist ein weiterer großer Seminarraum für bis zu 50 Personen untergebracht.

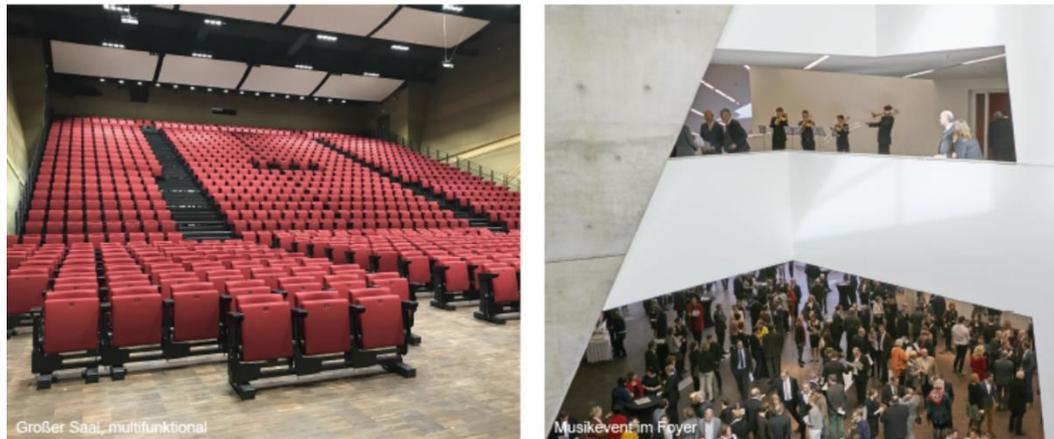


Abb. 33: Auditorium und Blick ins Foyer / Lüneburger Skyline

Die Auslastung des Gebäudes in den vorlesungsfreien Zeiten sollte durch ein Nutzungskonzept erhöht werden, das insbesondere die Stadt als Nutzer des Zentralgebäudes als neues Veranstaltungszentrum für Ausstellungen, Konzerte und Konferenzen vorsieht. Daneben können auch private Veranstalter die Räumlichkeiten nutzen.

Das Gebäude verfügt durch seinen hinterlüfteten Fassadenaufbau mit Titanzinkfassade, hervorragender Dämmung und die Vermeidung einer Südfassade beim Bauteil Forschungszentrum über eine vorteilhafte passive Energieeffizienz (Abb. 34). Die Südost- und Südwestfassaden des Forschungszentrums verschatten sich durch die Neigung zur Sonne hin selbst.

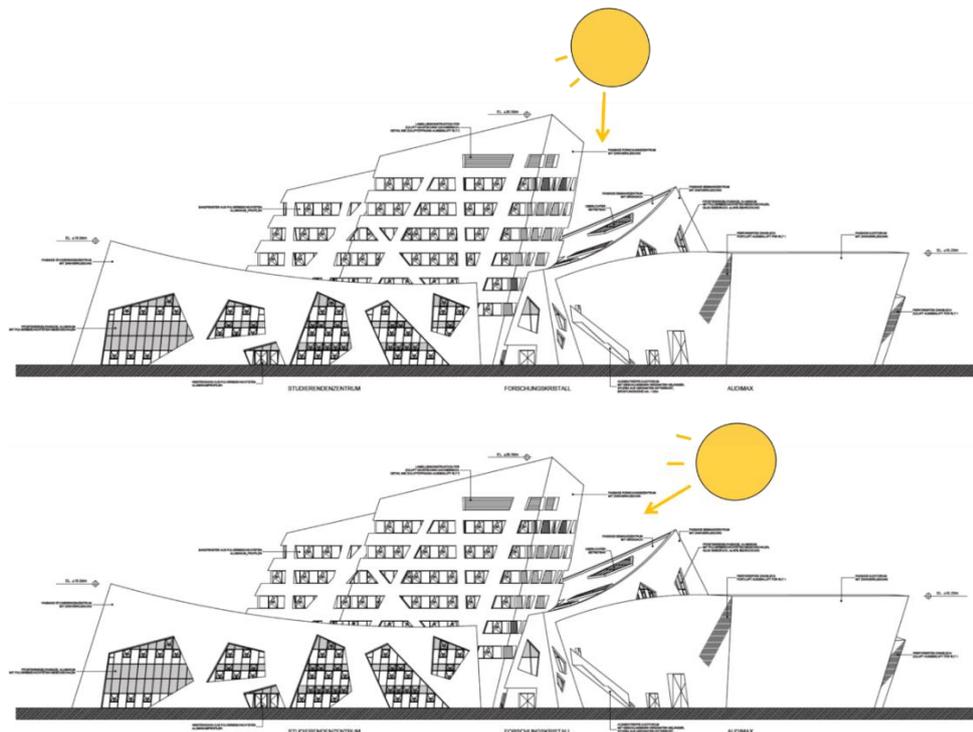


Abb. 34: Sommerlicher Wärmeschutz durch selbstverschattende Fassade

Der Übergang vom ursprünglich verfolgten PPP-Verfahren auf den Bau in Eigenregie führte zu einer deutlich reduzierteren Komplexität und kürzeren Abstimmungswegen. Umgegangen werden musste vor allem mit dem unvorhergesehen notwendig gewordenen Planerwechsel im Bereich TGA, der neuerliche Abstimmungs- und Informationsbedarfe hervorrief, sowie mit der Änderung in der Fassaden- und Fensterplanung. Das Forscherteam war in regelmäßigen Bausitzungen sowie im direkten Kontakt mit den Planern in den Prozess eingebunden, beriet den Bauherren, war aktiv an den Entscheidungen im Projektverlauf beteiligt, die jeweils im Einzelfall vorbereitet, begründet dargestellt, erläutert und oft verteidigt werden mussten. Alle für die Integration der innovativen Bauteile sowie des Gebäudes in das Campussystem wesentlichen Planungsschritte, insbesondere aber Monitoring, Gebäudeautomation und energetische Bewertung, aber auch die Ausschreibung (LVs) und Ausführung wurden intensiv begleitet.

Da die geplante Vakuum-Isolierverglasung zu Baubeginn noch nicht Marktreife erlangt hatte, wurde eine neuerliche Bewertung durchgeführt. Da die Vakuum-Isolierverglasung als Zweischeiben-Verglasung sich zwar deutlich leichter und damit potentiell kostensparend, aber thermisch mit einer guten Dreischeibenverglasung vergleichbar darstellte, wurde in der Reduzierung von Kühlbedarfen das größere Potential gesehen.

Die schaltbare Verglasung des Herstellers E-Control lässt sich in 5 Stufen von hell nach dunkel schalten. Dabei werden Lithium-Ionen durch Anlagen eines Magnetfelds in und aus einer Wolframoxidmatrix bewegt. Das System benötigt nur während des Schaltvorganges Strom, etwa 1 W/m<sup>2</sup>. Das System wird als einer Dreischeibenverglasung entsprechende Vierscheibenkonstruktion angeboten, wobei die äußere Doppelscheibe in einer Gelschicht die schaltbare Komponente enthält. Der Gesamtenergie-Durchlassgrad entspricht im ungeschalteten Zustand dem einer Sonnenschutzverglasung (g-Wert von 0,32) und lässt sich auf einen g-Wert von 0,09 verringern. Abb. 35 zeigt die unterschiedlichen Schaltstufen.



Bild 2: Ungeschaltet - Stufe 1



Bild 3: Geschaltet - Stufe 5



Bild 4: Stufe 2



Bild 5: Stufe 3 - mittel



Bild 6: Stufe 4

		Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5
Lichttransmission	$\tau_v$ -Wert (%)	46	38	27	19	13
Gesamtenergie- durchlassgrad	g-Wert (%)	32	24	18	13	9
Reflexion außen	Re-Wert (%)	13	12	11	10	9

Abb. 35: Schaltstufen der E-Control-Verglasung im Vergleich mit einer 33/25-Sonnenschutzverglasung.

Die Strahlungseinträge werden auf ein Maß reduziert, das sich mit dem einer steuerbaren außenliegenden Verschattung vergleichen lässt, ohne die Anfälligkeit mechanisch bewegter Teile aufzuweisen. Zwar wird ein zusätzlicher Blendschutz benötigt, dennoch wurde die Verwendung gegenüber einer Dreischeibenverglasung mit starrer außenliegender Verschattung aufgrund der energetischen Effekte und gegenüber einer Verschattung im Scheibenzwischenraum aufgrund der mangelnden Wartungsfreundlichkeit vorgezogen.

Die energetische Bewertung auf der Basis einer dynamischen Simulation (siehe Anhang VI) ergab absolut nur geringe Einsparungen bei der Kühlenergie, jedoch höhere Wärmeeinträge im Winter verglichen mit einer starren, anfänglich geplanten außenliegenden Verschattung.

Die E-Control-Verglasung wurde entsprechend einer Expertise des Fassadenplaners in den Oberlichtern Auditorium und Foyer sowie in den Südost- und Südwestfassadenbereichen des Bauteils Forschungszentrum eingesetzt. Während die hohe Raumhöhe im Foyer und Auditorium den sichtbaren Effekt der Verdunkelung wenig wirksam erscheinen lassen (die Energieeinträge können dennoch vermindert werden, der Beitrag ist im Vergleich zu den inneren Lasten in diesen Bereichen jedoch eher gering), entfaltet die schaltbare Verglasung in den Südost- und Südwestfassadenbereichen des Bauteils Forschungszentrum die gewünschten, sehr deutlich spürbaren Effekte. Die bislang vorliegenden Raumtemperaturdaten bestätigen trotz der sehr hohen Temperaturen im Frühjahr/Sommer 2018 die nur geringe Aufheizung der entsprechend ausgestatteten Räume trotz direkter Sonneneinstrahlung und fehlender aktiver Kühlung. Im Gegensatz dazu sind vergleichbare Räume an der Nordost-Fassade zu sehen, die sich im Sommer 2017 frühmorgens extrem aufheizten und entsprechend nachgerüstet werden mussten. Auch im direkten Vergleich ungeschalteter zu geschalteten Gläsern ist der Effekt der starken Verringerung des g-Werts deutlich spürbar. Abb. 36 zeigt die Temperaturen in einem mit E-Control ausgestatteten Schlechtraum.

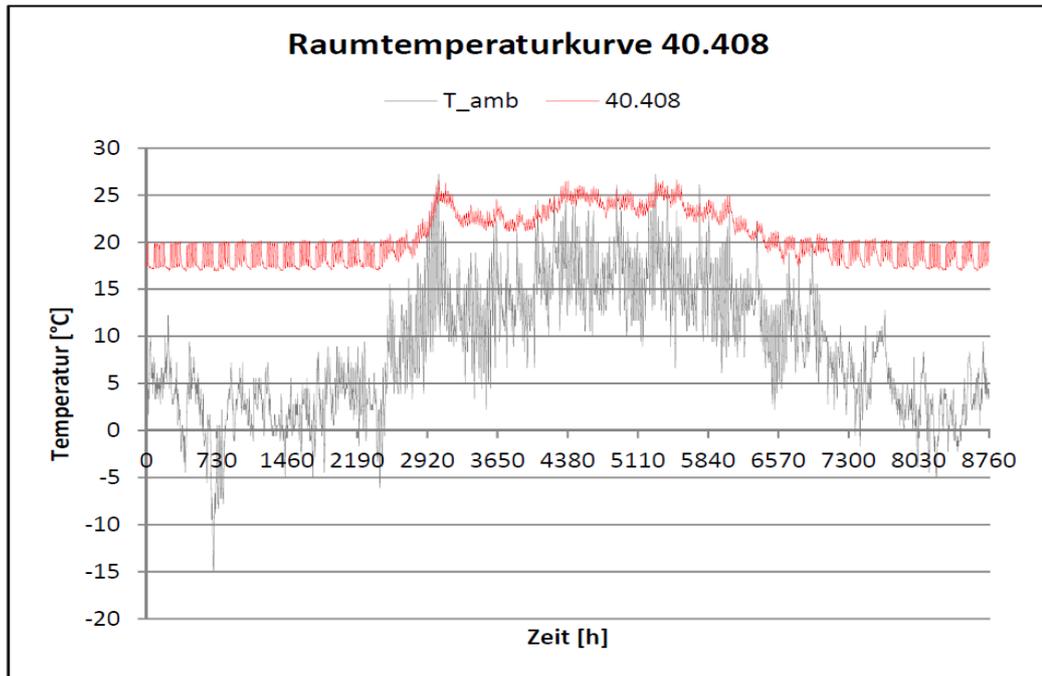


Abb. 36: Modellierter Raumtemperatur in einem mit E-Control ausgestatteten Schlechtraum

Die Steuerung der E-Control-Verglasung erfolgt fassadenweise in Abhängigkeit der Betriebssituation (Heiz-/Kühlfall), Raumtemperatur sowie Einstrahlung und funktioniert nach anfänglichen Schwierigkeiten bei der Inbetriebnahme reibungslos. Abb. 37-41 zeigt die entsprechenden Einstellungen.



Abb. 37: Abdunkelungssollwerte für die 5 Stufen der E-Control-Verglasung

⋮



Abb. 38: Temperaturabhängige Auswahl der helligkeitsabhängigen Regelung



Abb. 39: E-Control-Regelung im Sommerfall > 24°C (max. Wärmeschutz)



Abb. 40: E-Control-Regelung im Sommerfall < 20°C (Verschattung)



Abb. 41: E-Control-Regelung im Winterfall (max. Stufe 3, Verschattung)

Vakuumdämmung wurde wie vorgesehen in der Laibung der Bandfenster in Kombination mit der E-Control-Verglasung verbaut. Weitere Bereiche, in denen Vakuumdämmung geplant war, wie der Dachterrasse im 5. OG, mussten aus baulichen Gründen entfallen.

Infolge insgesamt gestiegener Kosten für den Zentralgebäudeneubau mussten Anfang 2014 in enger Begleitung durch die Oberfinanzdirektion Niedersachsen und den Landesrechnungshof Einsparpotenziale identifiziert werden, die sich mit den energetischen Zielen und Nachhaltigkeitszielen vereinbaren lassen. Neben Änderungen in der geplanten Ausstattung

sowie in der Raumaufteilung (Open-Space-Bereiche im 5. und 6. OG) gab es ebenfalls Änderungen in der TGA-Ausstattung und eine Überarbeitung der TGA-Planung. Diese betreffen vor allem eine Reduzierung der Ausstattung im Bereich Gebäudeautomation (EZR/Vollautomatisierung nur noch im 3. und 4. OG als Forschungsgeschosse mit den intensiv bemonitorten Modellräumen), der Kühldecken sowie der auch baulich in Frage stehenden BKT (Einsatz für Kühlung nur noch in Decke über EG), wobei Synergien mit der E-Control-Verglasung genutzt wurden, die zu niedrigeren Kühlbedarfen führt. Zudem wurden die Planungsansätze für die Lüftungsanlage nochmals überprüft und das Kanalnetz sowie die Lüftungsanlagenauslegung optimiert. Die Niedrigexergienutzung auf zwei Temperaturniveaus  $55^{\circ}\text{C}$  und  $35^{\circ}\text{C}$  (Abb. 42) bleibt über die statischen Heizflächen in Verbindung mit der RLT erhalten.



Abb. 42: Übergabestation mit interner Kaskadierung  $55/35^{\circ}\text{C}$  (u.) und  $35/25^{\circ}\text{C}$  (RLT, o.)

Die ursprünglich geplanten PCM-Kühldecken (Abb. 43) in den Bereichen Studierenden- und Seminarzentrum mussten entfallen, obwohl eigentlich technisch insbesondere in den Bereichen des Studierendenzentrums mit südwestlicher Fassadenausrichtung ohne E-Control-Verglasung erforderlich (Die Prüfung des sommerlichen Wärmeschutzes ergab gerade noch ausreichende Werte mit Sonnenschutzverglasung, ohne E-Control und aktive Kühlung).



Abb. 43: PCM-Kühldecken in den Besprechungsräumen des Bauteils Forschungszentrum

Die Kühldecken wurden nunmehr hauptsächlich in den Besprechungsräumen im Bauteil Forschungszentrum eingesetzt. Die Flächen wurden mit Temperaturfühlern zur detaillierten Untersuchung im Rahmen des Monitorings ausgestattet.

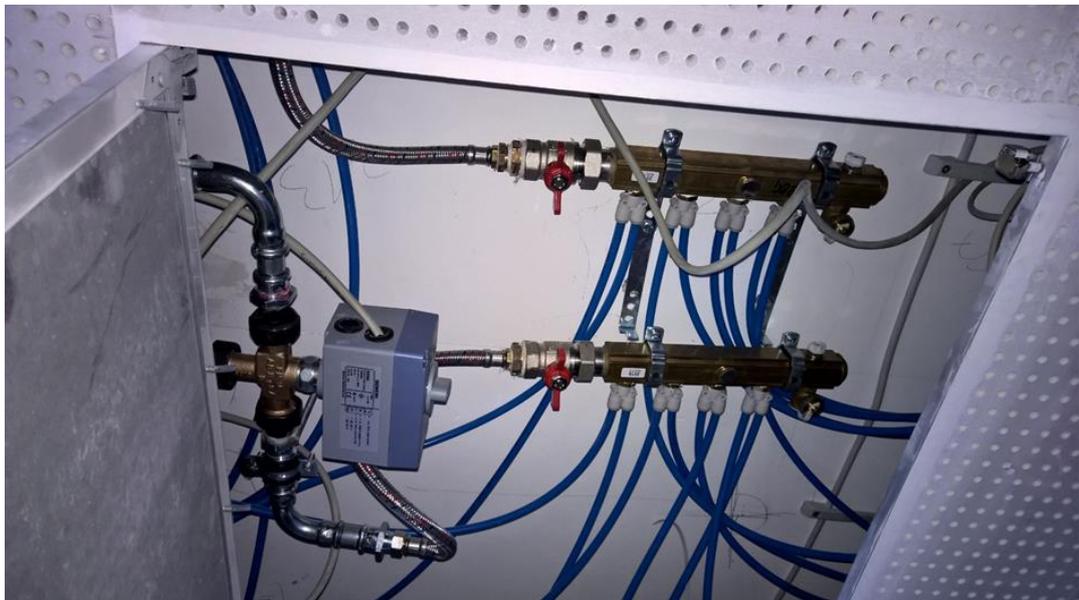


Abb. 44: Kühldecken-Anschluss mit Flexschläuchen

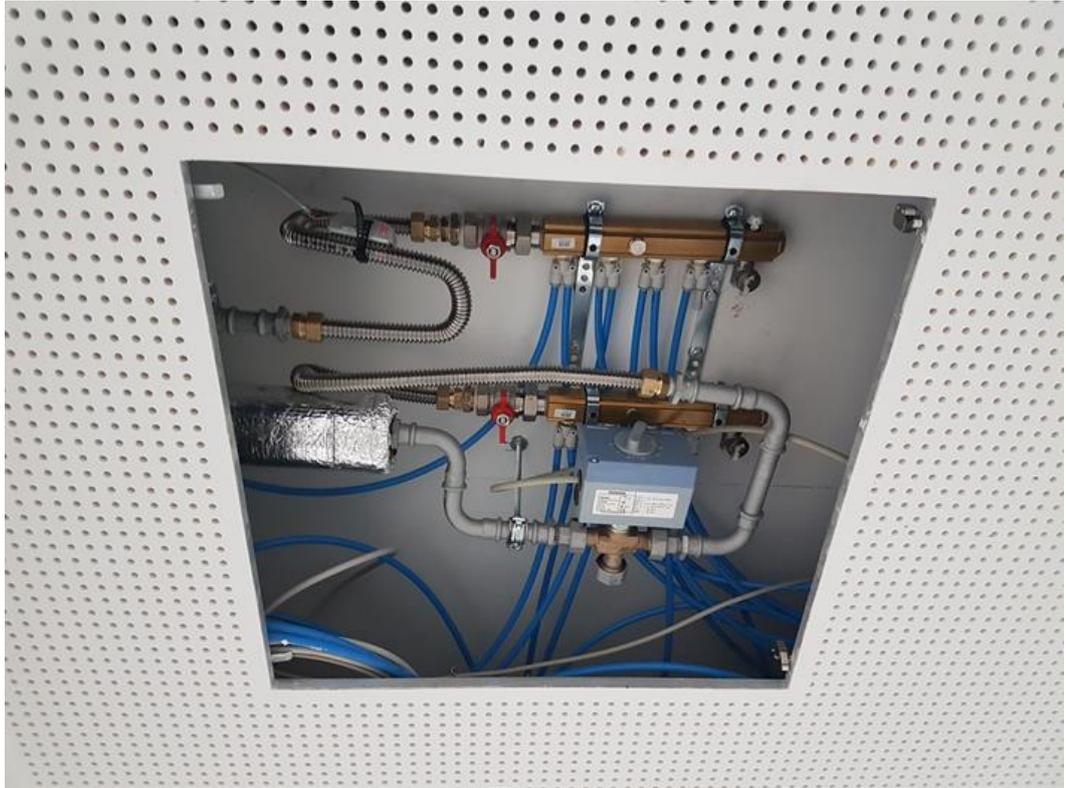


Abb. 45: Kühldecken-Anschluss mit Edelstahl-Wellrohr

Hier konnte das Forscherteam zudem korrosionstechnische Expertise einbringen, zunächst verwendete, metallummantelte sauerstoffdurchlässige EPDM-Gummischläuche (sog. Stahlflex-Schläuche, Abb. 44), die auch zur Anbindung von Umluftkühlgeräten verwendet wurden, wurden noch vor Befüllung und Inbetriebnahme durch Edelstahlwellrohr ersetzt (Abb. 45). Weiterhin erfolge eine wasserchemisch/korrosionstechnische Beurteilung des Füllwassers vor Befüllung. Die Wasserqualität wird online im Projekt EQM:Hydraulik 03ET1270A überwacht.

Im Bereich Gebäudeautomation war ursprünglich für den gesamten Bereich Forschungszentrum sowie Seminar- und Studierendenzentrum eine Einzelraumregelung geplant. Diese wurde auf die Forschungsflächen im 3. und 4. OG reduziert, die Open-Space-Flächen im 5. und 6. OG sind in jeweils 3 bzw. 4 Zonen automatisiert. Zum Einsatz kommen neben den Raumreglern mit Raumbediengerät mit Temperatur- und teilweise CO<sub>2</sub>-Fühlern und Fensterkontakten zur automatischen Abschaltung der Heizung Aktoren zur Steuerung der Heizungsventile und der Kühldecken, weiterhin sind die E-Control-Fenster angebunden. Wärmemengenzähler wurden zur raumweisen Erfassung in den Modellräumen sowie zur Erfassung unterschiedlicher Nutzungsbereiche bauteils-, etagen und abschnittsweise

eingesetzt. Elektrozähler wurden ebenfalls in den Modellräumen für die raumweise Erfassung sowie zur Differenzierung unterschiedlicher Nutzungseinheiten und Verbraucher je Bauteil und Unterverteilung sowie zur Differenzierung verschiedener Verbraucher und Hilfsenergiebedarfe (Lüftungsanlagen, Heizungspumpen, Beleuchtung, Umluftkühlgeräte, farbkodierte Steckdosen für verschiedene Anwendungen) eingesetzt und stehen für das differenzierte Monitoring zur Verfügung.

Das Lüftungsnetz wurde insbesondere im Foyerbereich vereinfacht. In den (nach Landesstandard auszuführenden) Bauteilen mit vergleichsweise stetiger Auslastung, Studierenden- und Seminarzentrum, ist die CO<sub>2</sub>- und nutzungsabhängige Lüftung entfallen, das Konzept wurde auf Mischlüftung unter Einbezug motorisch öffentlicher Fenster umgestellt. In diesen Bereichen sind zur Luftverteilung statische Volumenstromregler verbaut. Variable Volumenstromregler sind zur CO<sub>2</sub>- und nutzungsabhängigen, effizienten Belüftung in den Veranstaltungsbereichen Foyer und Auditorium mit stark nutzungsabhängigen Bedarfen sowie Forschungszentrum mit stark schwankendem Bedarf (Besprechungsräume) verbaut. Die verschiedenen Konzepte werden im Monitoringprojekt untersucht und verglichen. Die freie Luftverteilung im Doppelboden ist aus hygienischen Gründen entfallen, der Doppelboden wurde dennoch als Installationsraum für die Luftverteilanlagen und Quellluftauslässe genutzt.

Die (nicht in der Förderung enthaltene aber ursprünglich zum Gebäudekonzept gehörende) Betonkerntemperierung musste zudem aus baulichen Gründen entfallen, da die statischen Verhältnisse die Verwendung einer Cobiax-Deckenkonstruktion erforderlich machten. Diese Konstruktion, die erstmals in diesem Umfang mit bauaufsichtlicher Einzelzulassung (und später in der Elbphilharmonie im Dach der Plaza ebenfalls) verwendet wurde, spart durch die Integration dicht gepackter 200 mm-Polyethylenkugeln in die Betondecke massiv Gewicht und CO<sub>2</sub>-Emissionen durch vermiedenen Bedarf an Beton und Stahl ein und ermöglicht säulenfrei über große Flächen gespannte Stahlbeton-Deckenkonstruktionen (Abb. 46).



Abb. 46: Cobiax-Deckenkonstruktion zur Einsparung von Beton und Stahl

Weiterhin wurden Planungsänderungen hinsichtlich der Flächennutzung (Integration einer Maschinenhalle, Vollküche) durchgeführt, die auch energetisch bewertet werden mussten. Die Maschinenhalle floss bereits in die dynamische Simulation ein, die Nutzung wurde mit einer Anschlussleistung von  $2 \text{ kW/m}^2$  abgeschätzt. Andere nutzungsspezifische Energiebedarfe und innere Lasten wurden in die dynamische Modellierung mit einbezogen.

Die Beleuchtung wurde wie vorgesehen ausgeführt. Für das Konzept zentral ist die ausschließliche Beleuchtung der Büros mit LED-Stehleuchten (Abb. 47). Die Arbeitsplätze des Gebäudes wurden mit autark gesteuerten, dimmbaren LED-Stehleuchten des Herstellers Tobias Grau GmbH mit Tageslicht- und Präsenzsensoren ausgestattet. Die Leuchten mit Direkt- und Indirektanteil dienen konzeptgemäß in den Büros als alleinige Lichtquelle. Zwar wurden seitens des Haustechnikplaners an einigen Stellen ungenügend ausgeleuchtete Räume angemerkt und daher zusätzliche schaltbare Wandauslässe für Nachrüstungen vorgesehen, durch die flexible Aufstellung am Arbeitsplatz und den hohen Indirektlichtanteil ist die Nutzerzufriedenheit mit diesen Leuchten jedoch hoch. Zusätzliche Beleuchtung wird nicht benötigt.



Abb. 47: Mit E-Control ausgestattete Bereiche im Forschungszentrum: Flur (l.) mit Kommunikationsinsel (im hinteren Bildbereich), Open-Space-Bereich im 5. OG mit Tages- und Kunstlichtsystem (Bereichsweise DALI-gesteuerte Leuchten mit Präsenz- und Tageslichtsensor) zu erkennen ist außerdem die fassadenweise gesteuerte E-Control-Verglasung) sowie mit E-Control und LED-Stehleuchte ausgestattetes Einzelbüro.

Durch die Präsenz- und Tageslichtschaltung wird der Raum bei Bedarf automatisch angenehm ausgeleuchtet, am Arbeitsplatz ist sofort die erforderliche Lichtstärke vorhanden. Ein Suchen des Schalters im Dunklen o.ä. entfällt. In Kombination mit der schaltbaren Verglasung fällt bei höchster Abdunkelungsstufe der Fenster und vorgezogenem Blendschutz auf, dass sich die Stehleuchte auch bei als ausreichend empfundenem Tageslicht stark gedimmt zuschaltet. In diesen Fällen stört die unterschiedliche Lichtfarbe durch die stark blau gefärbten Fenstergläser, die Stehleuchte kann jedoch manuell abgeschaltet werden, die nur geringfügig unter 500 Lux liegende Beleuchtungsstärke reicht dann normalerweise aus.

Die Verkehrsflächen, vor allem im Foyer, aber auch die Open-Space-Bereiche im 5. und 6. OG wurden mit einem aufwendigen, präsenz- und tageslichtgesteuerten LED-Beleuchtungssystem ausgestattet. Das System ist über knx/DALI gruppenweise steuer- und programmierbar. Damit können Ein- und Ausschaltsschwellen, die Anfangs- und Zielbeleuchtungsstärke sowie Dimmcharakteristik und verschiedene Lichtszenen programmiert werden. In den Open-Space-

Bereichen mit schaltbarer Verglasung sowie den Bereichen im Mezzanin und Studierendenzentrum mit Lichthöfen und großflächigen Oberlichtern sowie im Foyer (Abb. 48) ist das System offensichtlich von großem Nutzen und bietet durch bereichsweise Steuerung wie die Stehleuchten eine komfortable und effiziente Beleuchtung.



Abb. 48: Tageslichtabhängig gesteuerte Lichtbänder im Foyer (gedimmter Zustand bei mittlerem Tageslichtangebot)

Die Einbindung in das Campusnetz auf Niedrigexergieniveau konnte durch interne Kaskadierung und Verwendung von Durchflusssystemen für die Trinkwarmwasserbereitung der Küche wie geplant umgesetzt werden.

#### 1.2.2.2 Energetische Bewertung

Die Erstellung des EnEV-Ausweises, der mehrfach nachgeführt wurde, wurde intensiv von der Forschergruppe begleitet.

Die aktuelle EnEV-Berechnung ergibt einen Primärenergiebedarf von 86 kWh/m<sup>2</sup>a (NGF, Basis PEF Strom von 2,6), was 52 % vom Soll-Wert entspricht. Dabei sind einige Annahmen bspw.

zur teilweisen Belüftung durch Fenster (die in der Heizperiode geschlossen bleiben werden und nur zu Zwecken der Entrauchung und ggf. Nachtauskühlung geöffnet werden) im Auditorium sehr konservativ. Für die Lüftung kann ebenfalls ein geringerer Bedarf als berechnet angenommen werden (Berechnung mit vollständiger Beheizung durch Belüftung, tatsächlich befindet sich das Auditorium in einer von statischen Systemen beheizten Hülle). Werden diese und andere mögliche Optimierungen betrachtet ergibt sich ein Wert von unter 50 % des Referenzgebäudes. Das Ziel < 100 kWh/m<sup>2</sup>a (NGF) Endenergie wird mit 86 kWh/m<sup>2</sup>a (NGF) voraussichtlich erreicht (Tab. 4).

Tab. 4: Gebäudeergebnisse Energiebedarf

Jährlicher Nutzenergiebedarf	spezifisch [kWh/(m <sup>2</sup> a)]	absolut [kWh/a]
Heizung	44.37	761,061.63
Trinkwarmwasser	8.41	144,324.00
Beleuchtung	7.79	133,577.78
Belüftung	0.00	0.00
Kühlung	11.36	194,889.66
<b>Gesamt</b>	<b>71.93</b>	<b>1,233,852.88</b>

Jährlicher Endenergiebedarf (brennwertbezogen)	spezifisch [kWh/(m <sup>2</sup> a)]	absolut [kWh/a]
Heizung	52.38	898,436.31
Trinkwarmwasser	11.00	188,604.31
Beleuchtung	7.79	133,577.78
Belüftung	15.14	259,704.70
Kühlung	0.04	750.29
<b>Gesamt</b>	<b>86.35</b>	<b>1,481,073.25</b>

Endenergiebedarf nach Energieträgern (brennwertbezogen)	spezifisch [kWh/(m <sup>2</sup> a)]	absolut [kWh/a]
Nah/Fernwärme aus Heizwerken - erneuerbarer Brennstoff	59.08	1,013,279.8
Strom-Mix	27.27	467,793.5
<b>Gesamt</b>	<b>86.35</b>	<b>1,481,073.3</b>

Jährlicher Primärenergiebedarf (heizwertbezogen)	spezifisch [kWh/(m <sup>2</sup> a)]	absolut [kWh/a]
Heizung	13.82	237,111.52
Trinkwarmwasser	12.13	207,986.19
Beleuchtung	20.25	347,302.19
Belüftung	39.37	675,232.31
Kühlung	0.11	1,950.74
<b>Gesamt</b>	<b>85.68</b>	<b>1,469,582.88</b>

EnEV-Werte	Ist-Wert	Soll-Wert	% vom Soll-Wert
spez. Transmissionswärmeverlust H <sub>T</sub> [W/(m <sup>2</sup> K)] (für KfW)	0.363	–	–
spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m <sup>2</sup> a)]	85.68	163.97	52.3 %

Unwägbarkeiten in der Berechnung sind neben den genannten Punkten hauptsächlich auf den hohen Heizwärmebedarf der Zonen mit Fensterlüftung zurückzuführen. Die Heizwärmebedarfe dieser Zonen liegen mit 120-180 kWh/m<sup>2</sup>a (NGF) Endenergie für die Heizung deutlich über den mechanisch belüfteten Bereichen, die mit ca. 30 kWh/m<sup>2</sup>a (NGF) in der Größenordnung der

ursprünglichen Planung liegen. Im Mittel führt dies zu einem deutlich höheren spezifischen Heizwärmebedarf von 44 kWh/m<sup>2</sup>a verglichen mit den Bedarfen vollständig mechanisch belüfteter Bereiche. Die zur Verminderung des Heizwärmebedarfs in diesen Bereichen geplanten Maßnahmen wie Fensterkontakte, motorisch betriebene Fenster und mögliche positive Auswirkungen des Ambient-Intelligence-Systems sind in der Berechnung jedoch noch nicht berücksichtigt.

Zudem macht sich der Warmwasserbedarf der geplanten Vollküche, hauptsächlich zu Reinigungszwecken, sowie die elektrische Warmwasserbereitung bemerkbar.

Zusätzlich zur EnEV-Berechnung (Anhang VII) erfolgte eine dynamische Modellierung des Energiebedarfs des neuen Zentralgebäudes (Anhang VI). Die Strombedarfe für die spätere spezifische Gebäudenutzung – Rechner, Drucker, Kopierer, Technikhalle, Küche – aber auch Aufzüge sind in der EnEV-Berechnung nicht enthalten. Die dynamische Modellierung hatte zum Ziel, diese mit zu erfassen.

Die Lüftung stellt sich in der EnEV-Berechnung mit 39 kWh/m<sup>2</sup>a Primärenergiebedarf (PEF Strom 2,6) als größter Primärenergieverbraucher dar. In der dynamischen Modellierung wird der Wärmebedarf höher eingeschätzt, während die Bedarfe für die Lüftung geringer ausfallen.

Abb. 49 zeigt einen Vergleich der verschiedenen Modellierungen mit einer Hochrechnung der Bedarfe aus 2017.

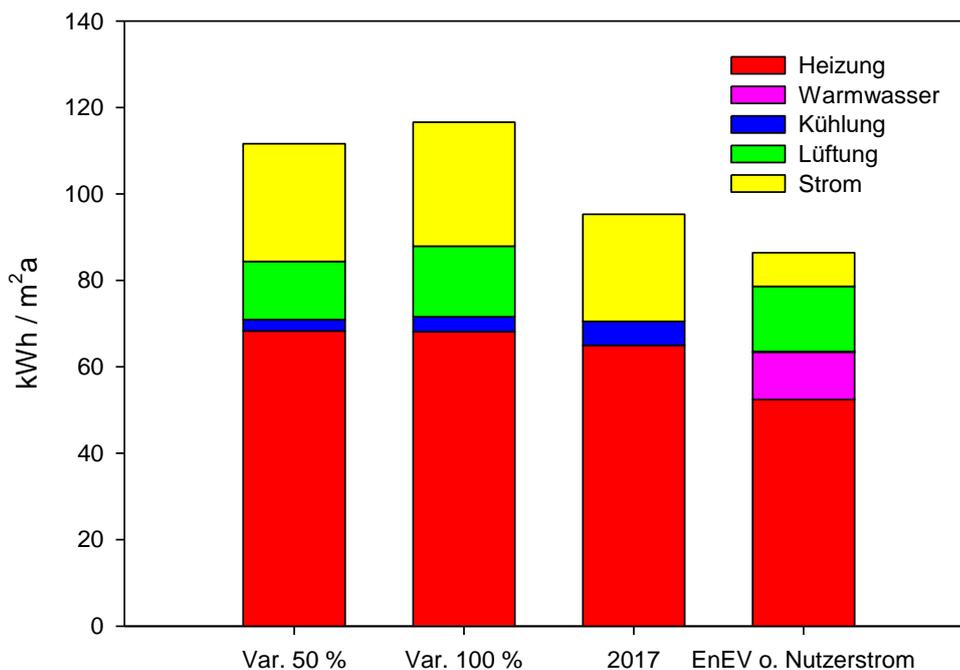


Abb. 49: EnEV-Berechnung (Endenergie) im Vergleich mit der dynamischen Modellierung.

Die Qualität der Gebäudehülle liegt im angestrebten Bereich zwischen 26-35 % (opake Außenbauteile) und 64% (Vorhangfassaden) unter EnEV 2009 (Tab. 5).

Tab. 5: Qualität der Gebäudehülle im Vergleich zu EnEV 2009.

Mittlere U-Werte [W/(m²K)]	Ist-Wert	Soll-Wert	% vom Soll-Wert
Opake Außenbauteile (17 °C)	0.130	0.500	26.0 %
Transparente Außenbauteile (17 °C)	1.066	2.800	38.1 %
Vorhangfassaden (17 °C)	1.000	3.000	33.3 %
Glasdächer, Lichtbänder, Lichtkuppeln (17 °C)	1.600	3.100	51.6 %
Opake Außenbauteile (21 °C)	0.123	0.350	35.1 %
Transparente Außenbauteile (21 °C)	1.053	1.900	55.4 %
Vorhangfassaden (21 °C)	1.209	1.900	63.6 %
Glasdächer, Lichtbänder, Lichtkuppeln (21 °C)	1.600	3.100	51.6 %

Die Daten aus der dynamischen Simulation waren insbesondere auch für die Bewertung der Option „Aquiferspeicher“ wesentlich, da das Zentralgebäude als Haupt-Niedrigexergieabnehmer in das System eingebunden wird. Abb. 50 zeigt den Lastgang eines Referenzjahres. Der Gesamtbedarf fällt in der dynamischen Modellierung mit 1184-1189 MWh/a Wärme (ca. 68 kWh/m²a) etwas höher aus als in der EnEV-Berechnung, da hier die Warmwasserbereitung vollständig als Heizwärme mit einbezogen wurde. Die maximal benötigte Heizlast beläuft sich je nach betrachteter Variante auf 905-908 kW. Der Strombedarf für die Lüftung deckt sich mit 13,5 – 16,3 kWh/m²a gut mit der EnEV-Berechnung.

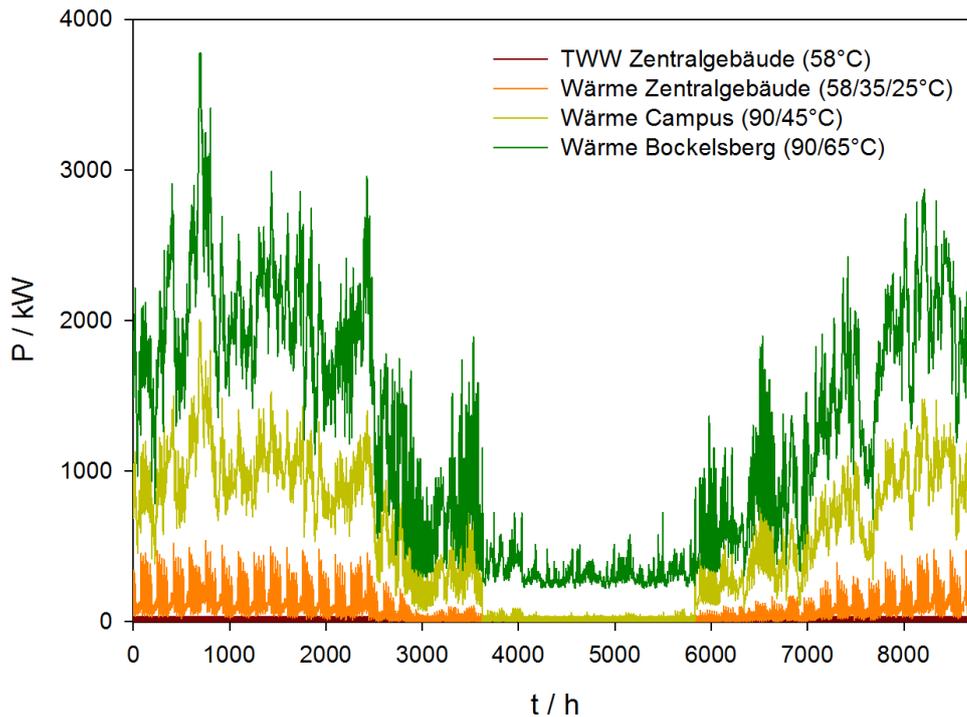


Abb. 50: Modellierter Jahreslastgänge Wärmebedarf (Referenzjahr)

Die durch die Planung angenommenen Kühlbedarfe konnten ebenfalls auf Basis der dynamischen Modellierung überprüft und deutlich verringert werden. Der hohen maximalen Kühllast (nach Reduktion im Zusammenhang mit Einsparmaßnahmen im 1. HJ 2014) von ca. 500 kW stand ein vergleichsweise geringer Bedarf von nur ca. 125 MWh/a gegenüber, der zu einem großen Teil durch freie Kühlung gedeckt werden sollte. Dies verringert im Jahresverlauf insbesondere den Bedarf an Kälte für Technik- und Kopierräume sowie Veranstaltungen. Die Kältemaschine muss demnach nur im Sommer arbeiten, wiederum hauptsächlich zur Kühlung von Veranstaltungstechnik, des großen Hörsaals, der Technikräume sowie der Zuluft. Die innenliegenden Besprechungsräume besitzen Kühldecken mit PCMs die überwiegend nachts ebenfalls aus freier Kühlung regeneriert werden sollen, die außenliegenden Büro- und Gruppenarbeitsräume sowie Open-Space-Bereiche besitzen keine Kühlung (hier wird der Wärmeeintrag in den Südost- und Südwestfassadenbereichen durch Selbstverschattung und das E-Control-Glas verringert).

Im Ergebnis wies die dynamische Modellierung eine Grundkühllast von etwa 50 kW auf, nur an wenigen Tagen im Jahr bei gleichzeitiger Vollauslastung wurden Spitzen bis zu 250 kW erreicht. Auf dieser Basis stimmte der Bauherr einer Reduzierung auf 350 kW zu.

Zusätzlich zur energetischen Bewertung erfolgte für den Einbezug in die Campus-Gesamtbilanz eine Bewertung der eingesetzten grauen Energie und damit verbundenen Emissionen, für die hauptsächlich 14.000 m<sup>3</sup> Beton, 2.750 t Stahl und 2300 m<sup>2</sup> (86,3 t) Glas verantwortlich sind.

Durch die Treibhausgas-negative Wärmeversorgung ergeben sich für den Zentralgebäude Betrieb negative CO<sub>2</sub>-Emissionen (derzeit – 207 t/a), die die graue Energie im Laufe der Nutzungszeit kompensieren könnten. Da die negative Treibhausgasbilanz jedoch hauptsächlich vom Verdrängungsmix (Kohleverstromung im derzeitigen System) abhängt, nehmen die negativen Emissionen mit zunehmendem Umbau der Energiesysteme ab, durch Wartung und Abbruch sowie ggf. (Beton-)Recycling entstehen weitere Emissionen, die sich nur schwer abschätzen lassen. In der Gesamtbilanz ist das Zentralgebäude über eine Nutzungszeit von 50 Jahren mit 250 t/a bilanziert. Damit ergeben sich negative Emissionen von – 1.636 t/a. Abzüglich der Emissionen der beiden weiteren Universitätsstandorte von ebenfalls etwa 1.000 t/a verbleiben somit 636 t/a. Werden die jährlich extern vermiedenen Emissionen durch Überschussstromspeisung (ohne vermiedene Emissionen durch die Umstellung am Campus) prioritär für die Kompensation des Neubaus einbezogen, die seit 2014 durch die neue Energieversorgung des Campus nach Kompensation weiterer Tier 3-Emissionen (auch der Emissionen der weiteren Universitätsstandorte) verbleiben, ist das Zentralgebäude etwa 2024 kompensiert. Es besteht also eine hohe Chance, dieses Ziel zu erreichen.

#### 1.2.2.3 Monitoringkonzept und Ambient Intelligence

Das Messkonzept (Anhang VIII) hinsichtlich des Zentralgebäudeneubaus sieht neben der Erfassung der gelieferten Wärme, Kälte und Elektrizität die einzelne Erfassung der verschiedenen Nutzungseinheiten (Hörsaal, Foyer, Seminarzentrum, Studierendenzentrum, Technikräume), der einzelnen Modellräume (mit Ultraschall-WMZ) und der Open-Space-Bereiche, der Kühldecken (raumgruppenweise bzw. raumweise (Modellräume)) vor. Zudem werden die Hilfsenergiebedarfe (Pumpen, Lüftung) erfasst.

Die Positionierung der Messfühler erfolgte angelehnt an die Vorgaben aus dem EnOB-Leitfaden Monitoring, so dass eine systematische Erfassung und Bilanzierung aller relevanten Energieströme erfolgt. Somit wird eine Allokation des Energieverbrauchs auf die einzelnen Nutzenergien für Heizung, Kühlung, Lüftung, Beleuchtung sowie Hilfsenergien in den einzelnen

Gebäudeteilen und Nutzungseinheiten ermöglicht. Zudem werden die Zustände der schaltbaren Verglasung erfasst.

Über das „Ambient-Intelligence“-System werden zudem Daten über die Nutzerzufriedenheit gesammelt (Anzahl und Richtung der Eingriffe).

Die Modellräume (Abb. 51) wurden wie die anderen Räume der 3. und 4. Etage mit einer autark regelnden, über die Gebäudeleittechnik ausles- und parametrierbaren Einzelraumregelung ausgestattet. Weiterhin wurden raumweise Elektro-Wirkenergie und Leistungszähler sowie Wärmemengenzähler sowie entsprechende Aktoren und Bediengeräte verbaut. Diese Ausstattung findet sich nicht in dieser Position sondern in den Positionen Wärmemengenzähleinrichtungen, LON-Sensoren/Aktoren/Raumbediengeräte und Elektrozähler (s.u.). Darüber hinaus wurden in den Modellräumen zusätzlich CO<sub>2</sub>/VOC/Feuchte/Temperatur-Kombifühler (enOcean-System) sowie Türkontakte und Präsenzmelder verbaut und der Untersuchung des Nutzerverhaltens, der Raumluftqualität und –Behaglichkeit in den Modellräumen dienen (Abb. 52).



Abb. 51: Anordnung der Modellräume

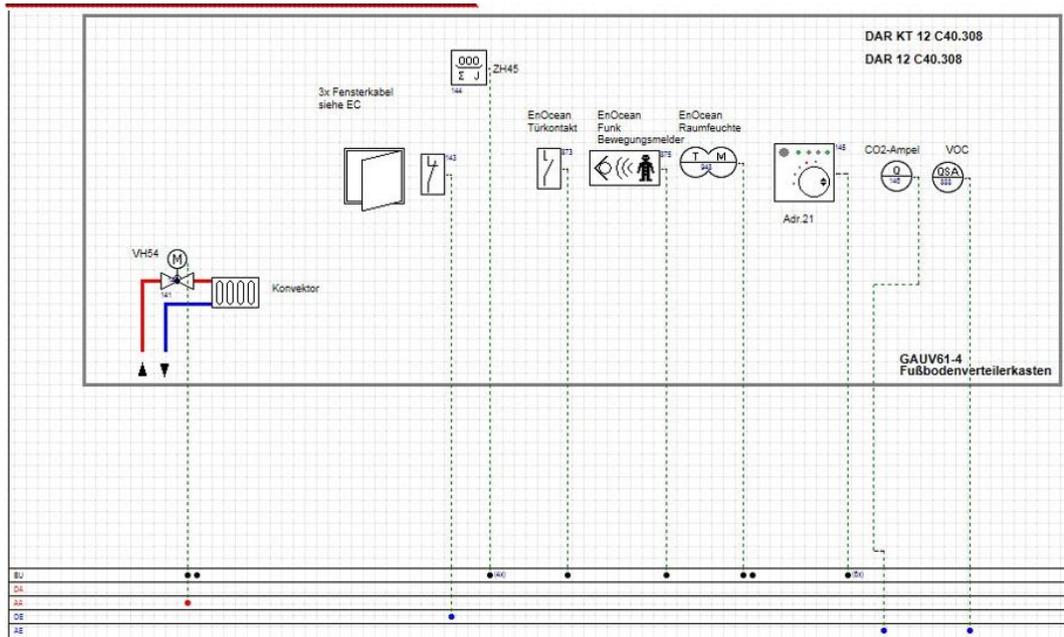


Abb. 52: Schema Sensoren/Aktoren Modellräume



Abb. 53: CO<sub>2</sub>-Ampel zur direkten Information der Nutzer mit Aufzeichnung durch die GLT.

Weiterhin wurden alle mit öffenbaren Fenstern und ausschließlicher Fenster- oder Mischlüftung ausgestatteten Räume mit CO<sub>2</sub>-Ampeln ausgestattet (Abb. 53). Über eine Exportschnittstelle, die auch für das Monitoring genutzt wird, können die Daten dem Ambient-Intelligence-System zugänglich gemacht werden und Steuerbefehle an die GLT gesandt werden.

Das Ambient-Intelligence-Konzept hat zum Ziel, nicht nur eine „smarte“ Bedienung des Zentralgebäudes über eine App zu ermöglichen und hierüber Komfortfunktionen wie Erhöhung und Absenkung der Raumtemperatur bis zu jeweils 1,5-3 K, die Hinterlegung von Profilen, um eine effizientere Betriebsweise zu ermöglichen und die Potentiale der Nachtabsenkung besser auszunutzen sondern wurde vor allem als Maßnahme zur beeinflussung des Nutzerverhaltens erdacht. Abb. 54 zeigt Möglichkeiten zur Beeinflussung des Nutzerverhaltens.



Abb. 54: Beeinflussungsmöglichkeiten des Nutzerverhaltens

Neben den Monitoring- und Energiecontrollingbedarfen bedient das Ambient Intelligence-System den Bereich Visualisierung, Feedback und Information der Nutzer. Hier werden Monitoringdaten aktiv in verbrauchsoptimierende individualisierte Kampagnen zum Nutzerverhalten übersetzt werden. Diese Methode besitzt deutliche Vorteile gegenüber klassischen nutzerbasierten Maßnahmen, da über eine interaktive, auch zur Gebäudesteuerung verwendete Oberfläche jeweils aktuelle, der Bedienungs- und Energieverbrauchssituation angepasste Rückmeldungen an den Nutzer gegeben werden, die gegenüber klassischen Maßnahmen eine hohe Relevanz und Aufmerksamkeit und damit hohe Wirkung versprechen (Abb. 55). Neben einer bedarfsangepassten Steuerung von Heizung, Kühlung und Beleuchtung ist insbesondere die Meldung und Auswertung von CO<sub>2</sub>-Werten zur Optimierung des

Lüftungsverhaltens, analog zu den in den Bestandsgebäuden bereits verwendeten CO<sub>2</sub>-Ampeln.

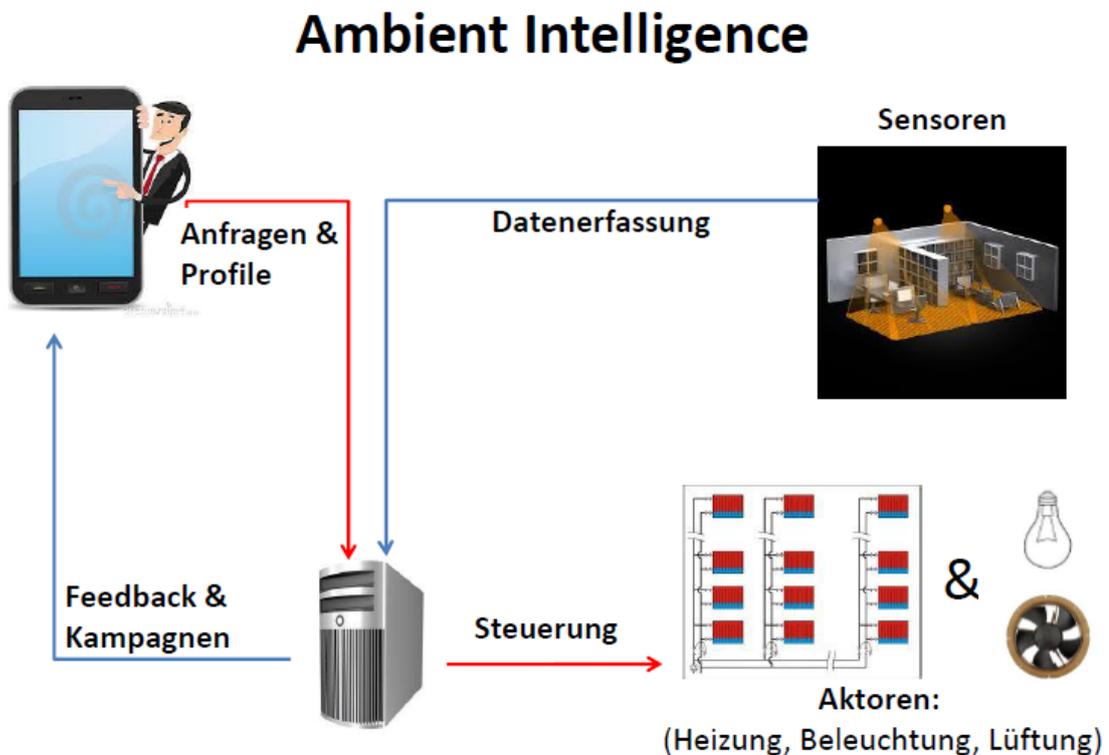


Abb. 55: Funktionsschema Ambient Intelligence

Hinsichtlich der Umsetzung des AI-Systems wurden Gespräche mit mehreren Herstellern geführt. Diese ergaben, dass einige Hersteller bereits gute Voraussetzungen für eine derartige Umsetzung mitbringen. Bei der Ausschreibung wird explizit auf eine offene Architektur und die Eignung für die AI-Umsetzung Wert gelegt.

Die Voraussetzungen für die Umsetzung wurden mit der Programmierung der Schnittstelle GLT-seitig geschaffen und ein Lastenheft für die Programmierung der App erstellt, das für die Ausschreibung verwendet wird.

Die theoretische Fundierung sieht computergestützte Systeme als Medien für kommunikativen Austausch. Wenn Nutzerinnen durch Interaktion und Kommunikation nicht nur über das Artefakt oder System im weitesten Sinne Erkenntnisse generieren, bedeutet das ein in der Evaluation erfolgreich funktionierendes System sowie eine erfolgreiche Metakommunikation zwischen Entwickler und Nutzerinnen. Hierfür wird Semeiotik(sic) verwendet. Das semeiotische Konzept, die Zeichentheorie, operiert mit der Methode der Logik und der Repräsentation

abstrakter Konzepte durch Zeichen. Die zugrunde gelegte Zeichentheorie Peirces (daher auch die im deutschen nicht gängige Bezeichnung Semeiotik, die Peirce eigen war), ist eine Kommunikationstheorie in welcher die Semeiose, die unendlichen Prozesse der Zeichen ergo codierte Bedeutungseinheiten, das linguistische Paradigma verlässt und zum sozialen Handeln wird. Das triadische Zeichenkorrelat erweitert das rein technische Kommunikationsparadigma von Shannon und Weaver indem Ikon, Index und Symbol alle Prozessbestandteile abbilden. Das Ikon dient als Objekt und der Index als Indikator und Stellvertreter für das prozesshafte in einem System. Symbole bezeichnen die erweiterten, neuen Episteme und beinhalten zugleich die Strukturen des Ikons und Indexes in sich. Im Kontext der Repräsentation können sämtliche Prozessbestandteile als „Text“ beziehungsweise als Sprache aufgefasst werden und somit Kommunikationsprozesse abgebildet, dekonstruiert und untersucht werden. Diese bilden kulturell geprägte Muster und formalisierte Handlungen ab. Mit der Verwendung von Symbolen kann die Usability für das System dahingehend verbessert werden, als dass Symbole Bedeutung für den Menschen entwickeln, für Sinnentstehung, Sinnverankerung, Selbstreflexion, Erkenntnis und schöpferische Prozesse der Ideenfindung verantwortlich sind. Zusätzlich ergibt sich aufgrund der mitgedachten kulturellen und sozialen Einflüsse die Möglichkeit, die anfangs genannten Themen wie Rassismus und Misogynie mitzudenken und zu umgehen. Das Zeichensystem und die Zeichensphäre, die als beispielhaftes Untersuchungsobjekt dient, ist Social Media.

Die derzeit etablierte Definition von Social Media, die als Begriff 2013 in den Duden aufgenommen wurde, betrachtet diese als Instrument im Unternehmen. Social Media ermöglicht die Erstellung und Verbreitung von User Generated Content (UGC). Der Mensch und seine Interaktionssphäre wird in dieser Definition beschränkt, da es den Menschen als Konsumenten darstellt, dessen von ihm erstellten Inhalte dazu verwendet werden, das Unternehmen zu bereichern, sei es durch Analyse für bessere Werbung und Verkaufsstrategien oder sei es als Instrument für Suchmaschinenoptimierung. Eine ausreichend beschreibende Definition von Social Media betont die Möglichkeit seine Identität zu gestalten und sich auszudrücken, verbunden mit der Möglichkeit Bedeutungen und Funktionen eines Kulturraumes zu gestalten und zu ändern. Zusammenfassend kann Social Media als technische, uns umgebende (ambient) Sphäre betrachtet werden, in der Bedeutung verhandelt wird, sowohl individuell als auch von einer Gruppe, und in welcher Bedeutungen wachsen. In der Sphäre des Social Media finden sich aufgrund der technischen Einbettung sehr unterschiedliche Arten von Interaktionen. Das Nutzungsmuster aus Social Media wird sowohl

der genuin technischen Sphäre gerecht als auch einer nachhaltigen Entwicklung. Aufgrund der Verwendung von Social Media im Alltag und auf größtenteils mobilen Geräten, sind dort anzutreffende Bedingungen für eine sich stetig entwickelnde Kommunikation einer stark heterogenen Masse von Nutzern beispielhaft für einen Prozess, der zwischen Adaption und Innovation oszilliert. Social Media Plattformen wie Twitter zeigen deutlich, wie eine positiv konnotierte, der Interpretation des Nutzers überlassene Kommunikation erfolgreich sein kann und zu infiniten Prozessen führt. Dabei gibt es, rein technisch betrachtet, ein enges Korsett für diese Prozesse. Die Möglichkeiten für UGC sind stark eingeschränkt (280 Zeichen, es gibt keine Möglichkeit die Inhalte nachträglich zu editieren, Medieneinbindung ist jedoch möglich). Unter gemeinsam verwendeten Hashtags werden Diskussionen zu einem Thema sichtbar. Die Teilnahme ist optional, man kann die Nachrichten nur lesen, aber entsprechend nicht eingreifen, wenn man sich nicht äußert. Man kann selbst eine Diskussion starten. Positive Das Teilen von Inhalten im eigenen Netzwerk ist positiv konnotiert und zeigt Empathie und Interesse an der eigenen Gruppe. Auch schnelle, positive Reaktionen werden technisch unterstützt. Diese Art von Feedback innerhalb einer Gruppe oder zu einem Thema trägt dazu bei, dass sich eine Solidargemeinschaft beziehungsweise eine neue Gruppe bildet. Was alle Plattformen gemeinsam haben und somit zur ersten Bedingung einer gelungenen Kommunikation gezählt werden muss, ist die Möglichkeit der ersten Aktion. Als Teilnehmerin im Prozess ist man ermächtigt, diesen Prozess zu starten. Hinzu kommt, dass man durch diese Aktion selbst zu einem Netzwerkknoten wird oder, anders ausgedrückt, zu einem Prozeß anstößt. Hierin findet sich der Teil des Empowerments und der Bestätigung als Subjekt für die Menschen, sowie die Möglichkeit zur Gestaltung und Darstellung der eigenen Identität.

Die Analyse von Social Media Nutzung ermöglicht es, abstrahierte Muster und Kommunikationsprozesse sowohl auf technischer als auf sozialer Seite nachzuvollziehen. Es ist neues Paradigma ist entstanden, das im Bereich von Gebäudemanagement das Bewusstsein für Energieverbräuche und –ersparnisse am Arbeitsplatz sowie in Gemeinschaftsräumen entwickeln kann, mit dem Ziel durch erfolgreiche Nutzungserfahrung, eine langfristige Verhaltensänderung herbeizuführen und vor allem Rebound-Effekte zu vermeiden oder abzuschwächen. Ein Gebäudemanagementsystem kann als umwelttechnologische Schnittstelle zwischen Industrie und Alltag verstanden werden. Zu den Nutzern solcher Systeme zählen sehr heterogene Gruppen, von Experten und Ingenieuren die das System einrichten und bedienen bis hin zu den Nutzern des Gebäudes, die als Nicht-Experten die Möglichkeit haben, das System für eine ihnen angenehme Umgebung zu manipulieren. Dieser Teil wird in der Modellumsetzung

betrachtet. Das Konzept soll idealerweise eine Kommunikationssituation zwischen Raum und Gruppe ermöglichen und eine Anpassung an sich ändernde Verhältnisse. Die Gruppe muss agieren und reagieren können und das System muss abweichendes Verhalten (im Rahmen) zulassen. Idealerweise würden auf der Seite des Systems nicht nur messbare Umweltverhältnisse wie Luftfeuchtigkeit und Temperatur des Raums berücksichtigt werden, sondern auch eine Messung der Lautstärke. Hierbei würde es sich zeigen ob es sich um eine verstreute Gruppe handelt, um eine Präsentationssituation mit punktueller Geräuschemission oder ob die Gruppe stark interagiert wie im Falle einer Gruppenarbeit. Von Seiten der Gebäudebewohner wird für die von ihnen zu manipulierenden Daten und Situationen eine einfache und schnell begreifbare Bedienung benötigt. Hierfür ist die Akzeptanz der Umgebungssystems wesentlich. Das System muss für die Gebäudebewohner in seiner Existenz wahrnehmbar sein und sich ihnen erschließen. Wird die Kommunikation transparent gestaltet, kann sie als Komponente der Umgebung, die diskret im Hintergrund für mehr Komfort sorgt, akzeptiert und genutzt werden. Im Falle der Nutzung von Social Media ergeben sich Kommunikationsmuster, die optimal für technologisch geprägte Umgebungen sind und sich kulturell etabliert haben.

1. Die Nutzerinnen müssen die Möglichkeit haben, den ersten Content zu erstellen. Über das Erstellen eines Profils hinaus, sollte eine positiv konnotierte Aktion erfolgen können. Beispielsweise: Mein Tag wird heute schöner wenn es wärmer/sonniger wäre. Die Übersetzung für das System wäre das Licht im Raum anders zu regeln (Helligkeit erhöhen) und Raumtemperatur erhöhen.
2. Innerhalb einer Gruppe von „Frostbeulen“, demnach ähnlich erstellter Profile, einen Austausch und Kommentarfunktion zu den Diensten des Systems zu ermöglichen. Das gemeinsame Thema zeigt dem System an, wie viele Nutzerinnen sich beteiligen und ob insgesamt eine Aktion notwendig wird. Wenn ein großer Teil der Gruppe eine zum Teil subjektive Kälte verspürt, muss das System reagieren oder zumindest sichtbar kommunizieren, dass eine dem Nutzerinnenwunsch entsprechende Aktion unternommen wird. Die Mitteilung darüber, dass die Temperatur nach oben angepaßt wird, kann schon ausreichen, um zu signalisieren, dass die individuellen Bedürfnisse ernst genommen werden.
3. Zusätzlich wird der Initiierung des Kommunikationsprozesses auf positivem Wege Rechnung getragen mit der Möglichkeit der Einflussnahme in verschiedenen Modi: Einfache Benutzerinnenführung oder Expertenansicht. Die erste, pragmatische

Möglichkeit ist eine schlang gestaltete Version, während im Expertensystem ausgewählte Datensätze angezeigt werden, während eine Datenbank Informationen zu den technischen Hintergründen liefern kann.

4. Empowerment durch eine (eingeschränkte) Möglichkeit der Manipulation. Zusätzlich sollten die Nutzerinnen in der Lage sein, Informationen zu teilen, falls gewünscht. Dieses können personenbezogen sein (Ich bin heute sehr müde, wer noch?) oder ergänzend zum System (Ich habe heute Strom für drei Ladungen Waschmaschine eingespart). Diese auf den Alltag der Menschen gerichteten Dinge sind nicht redundant, sondern bestätigen das handelnde Subjekt, den sich im Raum befindenden Menschen, in seiner individuellen Selbstwahrnehmung. Das System wird zudem zum kurzweiligen Informationsaustausch innerhalb der Gruppe genutzt, eine positiv konnotierte Aktion, die eine langfristige Nutzung des Systems verspricht.
5. Im Rahmen eines nachhaltigen Facility-Managements können Energiebudgets auf einzelne Nutzergruppen übertragen und gemanaged werden. Auch die Partizipation an Einsparungen und umgekehrt die Beteiligung an Kosten können Energieverbräuche im öffentlichen Raum aus der Allmende-Falle holen. Problematisch stellen sich dabei individuell unterschiedliche, wie auch immer begründete Bedürfnisse dar, die bei der Zuteilung starrer Budgets einzelne Personen bevor- oder benachteiligen können. Besser geeignet sind Ansätze, die Verbesserungen ausgehend von einem individuell ermittelten Ausgangspunkt anreizen. Auch derartige Systeme sind jedoch zum einen vor Manipulationen (bspw. bewusster Mehrverbrauch während einer bekannten Messphase, durchgängiger Verbrauch auf hohem Niveau durch ausbleibende Sanktionierung und unzureichende positive Inzentivierung, Gefahr der Sanktionierung erneuten wie auch immer begründeten Mehrverbrauchs nach einer Phase mit Einsparungen) nicht geschützt und werden jedoch von Personalräten, wie schon die Datenerfassung als solche, stark kritisiert. Nicht an monetäre Anreize gekoppelte, „weiche“ Boni und Mali werden als unproblematischer gesehen, könnten von der Wirkung jedoch hinter monetären Anreizen und Sanktionen zurückbleiben. Aktuell sind Energiepreise und personalisierte Verbräuche dabei jedoch eher niedrig, so dass monetäre Anreize ebenfalls leicht ignorierbar sind und psychologische Anreizsysteme ggf. sogar stärkere Wirkungen entfalten

könnten. Hierzu sind Modellversuche bzw. die Auswertung von Praxiserfahrungen notwendig.

6. Die Möglichkeit, positives Feedback zu verteilen und zu bekommen, um Rebound-Effekte vorzubeugen. Diese geschehen ebenfalls in der Gruppe und können als positiv erfahrene Wettbewerbssituation, Distinktionsmerkmal oder Motivation angesehen werden.

## 2. Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

AZA 0812: Wissenschaftliches Personal: Insgesamt entstanden im Projekt Kosten i.H.v. 642.197,05 € für die Betreuung der Themen Bau- und Energietechnik mit Herrn Karl Werner (Teil A, 50 % TV-L-E13), Energiesystem und Integration sowie Projektkoordination Herrn Oliver Opel (Teil A, 50 % TV-L E13), zeitweise Modellierung Aquiferspeicher Herrn Nikolai Strodel (Teil A, TV-L E13 50 %), sowie zu Projektbeginn Kommunikation und Akteursansprache Frau Irmhild Brügggen (Teil A, 25 % TV-L E13), Monitoring und Ambient Intelligence mit Herrn Jan Geffken (vorher Herr Eric Alexander Naumann und Herrn Andreas Carlos Meier, zeitweise Oliver Opel) (Teile A/B 50 % TV-L E13) sozialwissenschaftliche Fundierung Ambient-Intelligence Frau Andreea Tribel (Teile B/C TV-L E13)

AZA 0817: Für die Projektadministration entstanden Kosten i.H.v. 27.364,51 € (Frau Bibiana Iliev)

AZA 0822: Zur Unterstützung des Projektteams wurden SHK beschäftigt, die Kosten betragen 15.618,45 €.

AZA 0835: Aufträge i.H.v. insgesamt 874.088,01 € wurden an die Fassadenplaner Arup GmbH, die Haustechnikplaner emutec GmbH, das Studio Dinnebier sowie die Architekten rw+ für die Mitwirkung im integrativen Planungsprozess bzw. Planung des Einsatzes innovativer, geförderter Bauteile vergeben. Weiterhin wurde die GTN Neubrandenburg mit der geologischen Machbarkeitsstudie und einer Modellierung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Aquiferspeichers beauftragt, das GFZ Potsdam mit der Betrachtung des Energiesystems unter Integration des Aquiferspeichers, das EON ERC der RWTH Aachen mit der Begleitung der Energiesystemmodellierung durch die EPA Aachen, die die dynamische Modellierung des Bestands-Energiesystems sowie der Campusgebäude sowie des Zentralgebäudeneubaus übernahm. Anstelle des an die HS Karlsruhe vergebenen jedoch durch Verzögerungen im Projektablauf nicht

ausgeführten Auftrags für das Komfort-Monitoring der Modellräume wurde das SIZ energie+ aus Braunschweig mit der Erstellung des Monitoringkonzepts beauftragt. Weiterhin ergibt ein Auftrag an das I.F.I Institut für Industrieaerodynamik GmbH Aachen für die akustische und energieeffiziente Optimierung der Zuluft- und Abluftschächte des Auditoriums.

AZA 0843: In dieser Positionen wurden Kosten i.H.v. 602,42 € für Verwaltungsausgaben wie Telefongebühren, EDV-Kleinteile und Software, die augenärztliche Untersuchung von Herrn Karl Werner, Plotterkosten für die Präsentation von Postern auf Tagungen, sowie Wetterdaten für die Erstellung des zufallsbasierten Lastprofilgenerators gebucht.

AZA 0846: Kosten für Dienstreisen zu Projektpartnern, Teilnahme an EnEff:Stadt-Begleitforschungsveranstaltungen sowie nationalen und internationalen Tagungen fielen in Höhe von 16.688,54 € an.

AZA 0850: Investitionen in Gegenstände von mehr als 410 € im Einzelfall stellen die wichtigste Position des zahlenmäßigen Nachweises dar. Hier fielen Kosten i.H.v. 3.492.300,43 € für Investitionen für innovative Bauteile und Technologien entsprechend der Geräteliste an, die im Folgenden im Einzelnen dargestellt werden:

Komponenten Modellräume (25.632,25 €): Die Modellräume wurden wie die anderen Räume der 3. und 4. Etage mit einer autark regelnden, über die Gebäudeleittechnik ausles- und parametrierbaren Einzelraumregelung ausgestattet. Weiterhin wurden raumweise Elektro-Wirkenergie und Leistungszähler sowie Wärmemengenzähler sowie entsprechende Aktoren und Bediengeräte verbaut. Diese Ausstattung findet sich nicht in dieser Position sondern in den Positionen Wärmemengenzähleinrichtungen, LON-Sensoren/Aktoren/Raumbediengeräte und Elektrozähler (s.u.). Darüber hinaus wurden in den Modellräumen zusätzlich CO<sub>2</sub>/VOC/Feuchte/Temperatur-Kombifühler (enOcean-System) sowie Türkontakte und Präsenzmelder verbaut, die dieser Position zugeordnet wurden und der Untersuchung des Nutzerverhaltens, der Raumluftqualität und –Behaglichkeit in den Modellräumen dienen. Weiterhin wurden alle mit offenbaren Fenstern und ausschließlicher Fenster- oder Mischlüftung ausgestatteten Räume mit CO<sub>2</sub>-Ampeln ausgestattet. Die energienavigator-Software der synavision GmbH wurde zur Erarbeitung von Monitoring- und Visualisierungskonzepten genutzt.

Tages- und Kunstlichtsystem Stehleuchten (130.623,79 €): Die Arbeitsplätze des Gebäudes wurden wie vorgesehen mit autark gesteuerten, dimmbaren LED-Stehleuchten des Herstellers Tobias Grau GmbH mit Tageslicht- und Präsenzsensoren ausgestattet. Die Leuchten mit Direkt- und Indirektanteil dienen konzeptgemäß in den Büros als alleinige Lichtquelle. Zwar wurden seitens des Haustechnikplaners an einigen Stellen ungenügend ausgeleuchtete Räume angemerkt und daher zusätzliche schaltbare Wandauslässe für Nachrüstungen vorgesehen, durch die flexible Aufstellung am Arbeitsplatz und den hohen Indirektlichtanteil ist die Nutzerzufriedenheit mit diesen Leuchten jedoch hoch. Zusätzliche Beleuchtung wird nicht benötigt. Durch die Präsenz- und Tageslichtschaltung wird der Raum bei Bedarf automatisch angenehm ausgeleuchtet, am Arbeitsplatz ist sofort die erforderliche Lichtstärke vorhanden. Ein Suchen des Schalters im Dunklen o.ä. entfällt. In Kombination mit der schaltbaren Verglasung fällt bei höchster Abdunkelungsstufe der Fenster und vorgezogenem Blendschutz auf, dass sich die Stehleuchte auch bei als ausreichend empfundenem Tageslicht stark gedimmt zuschaltet. In diesen Fällen stört die unterschiedliche Lichtfarbe durch die stark blau gefärbten Fenstergläser, die Stehleuchte kann jedoch manuell abgeschaltet werden, die nur geringfügig unter 500 Lux liegende Beleuchtungsstärke reicht dann normalerweise aus.

Tages- und Kunstlichtsystem Verkehrsflächen (1.091.197,96 €): Die Verkehrsflächen, vor allem im Foyer, aber auch die Open-Space-Bereiche im 5. und 6. OG wurden mit einem aufwendigen, präsenz- und tageslichtgesteuerten LED-Beleuchtungssystem ausgestattet. Das System ist über knx/DALI gruppenweise steuer- und programmierbar. Damit können Ein- und Ausschaltsschwellen, die Anfangs- und Zielbeleuchtungsstärke sowie Dimmcharakteristik und verschiedene Lichtszenen programmiert werden. In den Open-Space-Bereichen mit schaltbarer Verglasung sowie den Bereichen im Mezzanin und Studierendenzentrum mit Lichthöfen und großflächigen Oberlichtern sowie im ebenfalls hohe Tageslichtanteile aufweisenden Foyer ist das System offensichtlich von großem Nutzen und bietet durch bereichsweise Steuerung wie die Stehleuchten eine komfortable und effiziente Beleuchtung.

Einsatz E-Control/Vakuumdämmung (1.218.643,66 €): Die E-Control-Verglasung wurde entsprechend einer Expertise des Fassadenplaners in den Oberlichtern Auditorium und Foyer sowie in den Südost- und Südwestfassadenbereichen des Bauteils Forschungszentrum eingesetzt. Während die hohe Raumhöhe im Foyer und Auditorium den sichtbaren Effekt der Verdunkelung wenig wirksam erscheinen lassen (die Energieeinträge können dennoch vermindert werden, der Beitrag ist im Vergleich zu den inneren Lasten in diesen Bereichen jedoch eher gering), entfaltet

die schaltbare Verglasung in den Südost- und Südwestfassadenbereichen des Bauteils Forschungszentrum die gewünschten, sehr deutlich spürbaren Effekte. Die bislang vorliegenden Raumtemperaturdaten bestätigen trotz der sehr hohen Temperaturen im Frühjahr/Sommer 2018 die nur geringe Aufheizung der entsprechend ausgestatteten Räume trotz direkter Sonneneinstrahlung und fehlender aktiver Kühlung. Im Gegensatz dazu sind vergleichbare Räume an der Nordost-Fassade zu sehen, die sich im Sommer 2017 frühmorgens extrem aufheizten und entsprechend nachgerüstet werden mussten. Auch im direkten Vergleich ungeschalteter zu geschalteten Gläsern ist der Effekt, ein in der höchsten Schaltstufe von 0,32 auf 0,09 abgesenkter g-Wert der Verglasung, deutlich spürbar. In dieser Position ebenfalls enthalten ist die Vakuumdämmung der Laibung der Bandfenster sowie die Steuerung der E-Control-Verglasung, die fassadenweise in Abhängigkeit der Betriebssituation (Heiz-/Kühlfall), Raumtemperatur sowie Einstrahlung erfolgt und nach anfänglichen Schwierigkeiten bei der Inbetriebnahme reibungslos funktioniert. Weitere Bereiche, in denen Vakuumdämmung geplant war, wie der Dachterrasse im 5. OG, mussten entfallen.

PCM-Kühldecken (211.783,67 €): Im Bereich PCM-Kühldecken sind im Rahmen der durch das Land Niedersachsen geforderten Einsparungen Mengenkürzungen erfolgt. In der Folge sind diese in den Bereichen Studierenden- und Seminarzentrum entfallen, obwohl technisch insbesondere in den Bereichen des Studierendenzentrums mit südwestlicher Fassadenausrichtung ohne E-Control-Verglasung erforderlich. Die Kühldecken wurden nunmehr hauptsächlich in den Besprechungsräumen im Bauteil Forschungszentrum eingesetzt. Die Flächen wurden mit Temperaturfühlern zur detaillierten Untersuchung im Rahmen des Monitorings ausgestattet.

Volumenstromregler (42.511,30 €): Der Bereich Gebäudeautomation und Lüftungskonzept wurde in 2014 ebenfalls zwecks Generierung von Einsparungen überplant, das Lüftungsnetz insbesondere im Foyerbereich vereinfacht. In den (nach Landesstandard auszuführenden) Bauteilen mit vergleichsweise stetiger Auslastung Studierenden- und Seminarzentrum ist die CO<sub>2</sub>- und nutzungsabhängige Lüftung entfallen, das Konzept wurde auf Mischlüftung umgestellt. In diesen Bereichen sind zur Luftverteilung statische Volumenstromregler verbaut. Variable Volumenstromregler sind zur CO<sub>2</sub>- und nutzungsabhängigen, effizienten Belüftung in den Veranstaltungsbereichen Foyer und Auditorium mit stark nutzungsabhängigen Bedarfen sowie Forschungszentrum mit stark schwankendem Bedarf (Besprechungsräume) verbaut.

Frequenzumrichter (11.000,23 €): Frequenzumrichter sind wie vorgesehen zur effizienten Regelung der Lüftungsanlagen verbaut worden.

Unterflurkonvektoren (303.217,72 €): Unterflurkonvektoren wurden wie vorgesehen zur Nutzung von Mitteltemperaturwärme zur Raumheizung eingesetzt. Im Bereich Forschungszentrum konnten anstelle von Unterflurkonvektoren Radiatoren eingesetzt werden.

Luftverteilung im Doppelboden: Die freie Luftverteilung im Doppelboden ist aus hygienischen Gründen entfallen, der Doppelboden wurde dennoch als Installationsraum für die Luftverteilanlagen und Quellluftauslässe genutzt.

Wärmemengenzähleinrichtungen, LON-Sensoren und Aktoren, Raumbediengeräte und Elektrozähler (326.002,40 €): In diesem Bereich sind ebenfalls deutliche Einsparungen erfolgt. Ursprünglich war für den gesamten Bereich Forschungszentrum sowie Seminar- und Studierendenzentrum eine Einzelraumregelung geplant. Diese wurde auf die Forschungsflächen im 3. und 4. OG reduziert, die Open-Space-Flächen im 5. und 6. OG sind in jeweils 3 bzw. 4 Zonen automatisiert. Zum Einsatz kommen neben den Raumreglern mit Raumbediengerät mit Temperatur- und teilweise CO<sub>2</sub>-Fühlern Aktoren zur Steuerung der Heizungsventile und der Kühldecken, weiterhin sind die E-Control-Fenster angebunden. Wärmemengenzähler wurden zur raumweisen Erfassung in den Modellräumen sowie zur Erfassung unterschiedlicher Nutzungsbereiche bauteils-, etagen und abschnittsweise eingesetzt. Elektrozähler wurden ebenfalls in den Modellräumen für die raumweise Erfassung sowie zur Differenzierung unterschiedlicher Nutzungseinheiten und Verbraucher je Bauteil und Unterverteilung sowie zur Differenzierung verschiedener Verbraucher und Hilfsenergiebedarfe (Lüftungsanlagen, Heizungspumpen, Beleuchtung, Umluftkühlgeräte, farb-kodierte Steckdosen für verschiedene Anwendungen) eingesetzt und stehen für das differenzierte Monitoring zur Verfügung.

GLT-Ebene für AI-System (131.687,45 €): Für die Steuerung des Gebäudes und Realisierung des Ambient-Intelligence-Ansatzes sowie der Monitoringanforderungen wurde eine GLT-Software mit Leitreechner der Firma INGA GmbH eingesetzt, die durch ihre offene Konzeption die Möglichkeiten des automatischen Messwerteexports sowie Möglichkeiten für die Einrichtung von Schnittstellen für die Steuerung per App besitzt. Hier kam es zu einer Mehrung von Datenpunkten u.a. durch zusätzliche Brandschutzklappen.

### 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die an der Leuphana verorteten Arbeitspakete Teil A, B und C sowie Unteraufträge waren erforderlich, um die Projektziele zu erreichen. Von besonderer Bedeutung war die Begleitung des Vergabeverfahrens und der Umsetzung der Einsparcontractings sowie des integralen Planungsprozesses des Zentralgebäudeneubaus, der bedingt durch die baubegleitenden Planungsprozesse mit wiederkehrenden intensiven Abstimmungen, Umplanungen, regelmäßigen sowie bei Bedarf durchgeführten Planungs- und Baubesprechungen sowie ab 2014 zusätzlichen zweiwöchentlichen Sitzungen der Steuerungsrunde mit allen wesentlichen Akteuren deutlich aufwändiger als geplant verlief. Ohne die intensive Betreuung durch das Projektteam wäre die Zielerreichung in vielen Bereichen gefährdet gewesen. Dies betraf vor allem den Wechsel von Vakuumverglasung auf das E-Control-System in Verbindung mit dem Wegfall der Betonkerntemperierung, den einsparungsbedingten Umplanungsprozess in 2014, die Integration des Gebäudes in das Campusenergiesystem auf Mitteltemperaturebene, wobei die Warmwasserbereitung von der ursprünglich vorgesehenen Hochtemperatur-Anbindung mit TWW-Speicher und Zirkulation auf Trinkwassererwärmung auf Mitteltemperaturniveau mit Frischwasserstationen und Pufferung heizkreisseitig umgestellt wurde und die Umsetzung des Monitoringkonzepts, zu dem Festlegungen trotz schriftlicher Vorlagen wie zu weiteren Bereichen auch oftmals ad-hoc in den Planungssitzungen getroffen und diskutiert wurden. Aufwendig war hierbei weniger die Erarbeitung von Lösungsvorschlägen und Erstellung entsprechender Konzepte als vielmehr die damit verbundene Überzeugungsarbeit und Vertretung in den entsprechenden Entscheidungsrunden. Auch nicht im Sinne der Projektkonzeption verlaufene Abstimmungen wie der Einsatz von BKT, dezentralen Lüftungsgeräten in Teilen des Forschungszentrums, Luftverteilung im Doppelboden etc. müssen hierzu gezählt werden.

Ähnliches traf auf die Begleitung und Umsetzung der Einsparmaßnahmen in den Bestandsgebäuden zu. Hier sind insbesondere Abstimmungsprozesse mit dem technischen Personal, aber auch betriebswirtschaftlich-organisatorisch zu nennen. Die Durchführung eines Einsparcontractings lässt sich rückblickend am ehesten als eine gewaltige Gemeinschaftsaufgabe von Forschung, Verwaltung, Personalvertretung und Nutzern verstehen, die durch die Schnittstellen zu externen Contractoren und entsprechenden Reibungsverlusten (flexible, auf gegenseitigem Verständnis beruhende vs. beiderseitig starre Vertragserfüllung) fast so aufwändig wie die Durchführung von Einsparmaßnahmen in Eigenregie anmutet, wobei das technische Personal ebenso wie Hochschulleitung und Verwaltung im konkreten Fall durch die enormen Anstrengungen der Neuausrichtung und baulichen Campuserweiterung ohnehin an der Belastungsgrenze stand.

Das Projektteam fungierte hier als fachliche Zwischeninstanz und nach Umsetzung in der Erstellung der ersten Abrechnungen als wichtiges Bindeglied, um den teilweise aufgrund des externen Zugriffs kritisch empfundenen Contractingvertrag mit Leben zu füllen, Nutzer zu informieren und die unweigerlichen Anlaufprobleme einer neuen Heizungssteuerung zu bewältigen. Unbedingt notwendig waren für den Prozess der Vergabe des Energieeinspar- und Liefercontractings außerdem die Unteraufträge für die Modellierung des Campussystems, der Bestandsgebäude und des Neubaus, ohne die eine Ermittlung der Bedarfe nicht vergleichbar hätte erfolgen können. Besonders deutlich wurde dies bei der Kältebereitstellung, bei der erst die dynamische Modellierung ausreichend Planungssicherheit für die Anpassung der Leistung der Kältemaschine von 700 kW auf 350 kW lieferte. Ebenso waren die Planungsleistungen und Beiträge der Fachplaner und Architekten unbedingt notwendig für die Umsetzung des Konzepts und die Integration der innovativen Bauteile.

Angemessen waren die Arbeiten mindestens angesichts des so erreichten Ziels der Klimaneutralität mit in die Stadt und international ausstrahlenden Effekten des entstandenen Pilotprojekts und den umgesetzten Maßnahmen mit über die Vertragslaufzeit von 20 Jahren für das Contracting und die EMAS-Zertifizierung langfristig gesicherten Effizienzgewinnen und Einsparungen sowie der im Rahmen des Monitorings des Zentralgebäudes und der Campusliegenschaft noch zu erwartenden Erkenntnisse.

Die Arbeiten zur Nutzereinbindung/Ambient-Intelligence ebenso wie zum Aquiferspeicher werden nach finaler Umsetzung im Rahmen des Monitorings weiter untersucht bzw. noch für die weitere Konzeptumsetzung benötigt. Angesichts der Bedeutung der Nutzerintegration, nachhaltigen Facility-Managements und saisonaler Energiespeicherung ist ihre Angemessenheit ebenfalls vollumfänglich gegeben.

#### 4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des Verwertungsplanes

Wirtschaftliche Verwertung und Potentiale: Sowohl das Einsparcontracting als auch die Energiesystemkonzeption zeigen beispielhaft die wirtschaftliche Verwertbarkeit. Dies gilt ebenso für die schaltbare Verglasung, PCM-Kühldecken sowie weitere innovative Technologien, die bereits wirtschaftlich verwertet werden. Das Projekt dient hierbei als Referenz mit besonderer internationaler Sichtbarkeit. Hinsichtlich des E-Control-Systems kamen bereits Anfragen aus dem öffentlichen wie privaten Bereich, hier konnten direkt Erfahrungen weitergegeben werden, die zu positiven Investitionsentscheidungen führten. Die beteiligten Firmen konnten im Planungsprozess

diskutierte und erarbeitete Ansätze umsetzen und in die wirtschaftliche Verwertung bringen. So entwickelte der am Projekt beteiligte Gebäudeautomationshersteller GfR ein intelligentes Lüftungssteuerungssystem, das selbstständig flexibel Heizungs-, Kühlungs- oder Befeuchtungssysteme nutzt und automatisch den wahlweise energieeffizientesten oder kosteneffizientesten Weg einer behaglichen Klimatisierung in Abhängigkeit der Außenluftqualität ermittelt sowie ein Tool zum dynamischen hydraulischen Abgleich von Heiz- und Kühlsystemen. Die entsprechende Technologie kann ebenso für die Optimierung von Heizsystemen auf verschiedenen Temperaturniveaus genutzt werden. Der Gebäudetechnikplaner emutec nutzte ebenso Projekterfahrungen für das eigene Wachstum und die Identifikation neuer Geschäftsfelder. Die Projektergebnisse zur Einbindung des Aquiferspeichers in Niedrigtemperatursysteme mit direkter Wärmenutzung sowie die Entwicklung des zufallsbasierten Lastprofilgenerators sind wirtschaftlich in weiteren Umsetzungsprojekten verwertbar.

Wissenschaftliche Verwertung und Potentiale: Insbesondere die Demonstration einer klimaneutralen Energieversorgung ganzer Stadtteile entfaltete bereits internationale Wirkung und wurde auf Tagungen sowie in einem internationalen high-ranked Journal veröffentlicht. Dies gilt eingeschränkt ebenso für die Arbeiten zur Integration von Aquiferspeichern in Energiesysteme sowie den Ambient-Intelligence bzw. sustainable ambient computing (SAC)-Ansatz zur Nutzerintegration. Weitere Ergebnisse werden im Rahmen des Monitorings des Zentralgebäudes und des Campussystems erwartet.

## 5. Während der Durchführung an anderen Stellen bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens

Während der Laufzeit des Vorhabens wurde, neben unzählbaren Weiterentwicklungen und Innovationen im allgemeinen Bereich Bauprodukte und technische Gebäudeausrüstung, insbesondere die quartiersweite Bestandsaufnahme, Energie- und Exergie-Bilanzierung und energieeffiziente Versorgung weiterentwickelt (bspw. Erhorn-Kluttig et al. 2013, Kilkış et al. 2017). Durch die quartiersweite Betrachtung werden Lastgänge geglättet und es können Synergien bei der Energieversorgung genutzt werden, die die Energie- und Kosteneffizienz steigern. Diese Ansätze sind im Zusammenhang mit der Weiterentwicklung von Energienetzen zu sehen, deren Nutzung größere Klimaschutzpotentiale bietet als die gebäudespezifische Betrachtung. Bei Wärmenetzen geht die Entwicklung hin zu Netzen der 3. (niedrigere Temperaturen) und 4. Generation (smart

heating grids), die sich durch die Integration von Speichern und Elementen der Sektorenkopplung auszeichnen (Lund et al. 2012, 2014, 2016).

Im Bereich öffentliche Gebäude mit einer mit dem Zentralgebäude zu vergleichenden Nutzung sind insbesondere die Projekte des Bereichs EnEff:Schule zu nennen, hier wurde in mehreren Pilotprojekten die wirtschaftlich-technische Machbarkeit energieeffizienter bzw. Plusenergie-Schulgebäude gezeigt. Gemessen an diesen Gebäuden mit typischen Endenergiebedarfen von etwa 40 kWh/m<sup>2</sup>a liegt das Zentralgebäude deutlich höher, was der vorherrschenden Wärmepumpennutzung in den Schulgebäuden geschuldet ist. Primärenergetisch sind die Gebäude (ohne Bilanzierung von PV-Eigenerzeugung) in etwa vergleichbar. Eine detaillierte Auswertung und Analyse wird im Rahmen des Monitoringprojekts O3ET1415A/B erarbeitet.

Ganze Universitätscampi, die mehrere Lehrgebäude sowie Gebäude mit besonderer Nutzung in sich vereinen und teils äußerst heterogen gestaltet sein können, wurden im Forschungsschwerpunkt EnEff:Campus betrachtet. Diese grundsätzlich besonders vergleichbaren Projekte stellen sich durch ihre Größe und Heterogenität im Vergleich mit der Leuphana Universität in der Regel nochmals deutlich anspruchsvoller dar. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse ist in Erhorn-Kluttig et al. 2016 gegeben.

Der große Einfluss von Nutzer\_innen auf die Effizienz hocheffizienter Gebäude und der positive Effekt von Visualisierungen bezüglich der Nutzung von Wohngebäuden wurde von Volker Stockinger im Rahmen seiner Promotion untersucht (vgl. Stockinger 2015, Ingenieurspiegel 01/2015)

Während saisonale Wärmespeicherung im Aquifer im europäischen Ausmaß, insbesondere in den Niederlanden für Neubauten mittlerweile fast obligatorisch ist, ist der Fortschritt auf diesem Gebiet in Deutschland äußerst überschaubar. Seit Projektbeginn wurden keine saisonalen Wärmespeicher auf mittlerem oder hohem Temperaturniveau auf Quartiersebene mehr umgesetzt. Der Grund hierfür ist vor allem in den stark gesunkenen Öl- und Gaspreisen und den im Vergleich hohen Kosten sowie der Erreichbarkeit der notwendigen Anforderungen durch die Nutzung von Wärmepumpen zu sehen. Mit der EnEV-Novelle 2014 wurde die Umsetzung von Null- oder Plusenergiekonzepten durch die Verankerung einer monatsweisen Bilanzierung deutlich erschwert, die auf nationaler Ebene umzusetzende Gebäudeeffizienzrichtlinie wird die Bedeutung saisonaler Wärmespeicherung vermutlich wieder steigern.

Erhorn-Kluttig, Heike; Erhorn, Hans; Weber, Juri; Wössner, Simon; Budde, Eike (2013): EnEff: Stadt - Energiekonzept-Berater für Stadtquartiere. Bauphysik 35/3, S.172-180.

Erhorn-Kluttig, H., Doster, S., Erhorn, H. (2016): Der energieeffiziente Universitätscampus: Pilotprojekte der Forschungsinitiative EnEff:Stadt. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

Kılıç Ş, Wang C, Björk F, Martinac I. (2017): Cleaner energy scenarios for building clusters in campus areas based on the Rational Energy Management Model. Journal of Cleaner Production 2017;155(1):72-82.

Lund H, Andersen AN, Østergaard PA, Mathiesen BV, Connolly D. (2012): From electricity smart grids to smart energy systems – A market operation based approach and understanding. *Energy* 2012;42(1):96–102.

Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R., Svendsen, S., Thorsen, J. E., Hvelplund, F., & Mathiesen, B. V. 4th Generation District Heating (4GDH) (2014): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy* 2014;68:1–11.

Lund, H., Duic, N., Østergaard, P. A., & Mathiesen, B. V. (2016). Smart energy systems and 4th generation district heating. *Energy* 2016;110:1–4.

Stockinger, V. (2015): Gebäudeautomation und Verbrauchs-Visualisierung in Energieplus-Gebäuden. *Ingenieurspiegel* 1/2015. S. 18-20.

## 6. Wissenschaftliche Veröffentlichungen

Strodel, N. (2018): Wahrscheinlichkeitsbasierte Energiesystem- und Wirtschaftlichkeitsanalyse eines Energieverbundsystems unter Einbeziehung eines Aquiferwärmespeichers. Dissertation, Leuphana Universität Lüneburg.

Opel, O., Strodel, N., Werner, K.F., Geffken, J., Tribel, A., Ruck, W.K.L. (2017): Climate-neutral and sustainable campus Leuphana University of Lueneburg. *Energy* 141, 2628 – 2639

Strodel, N., Opel, O., Kranz, S., Werner, K.F., Ruck, W.K.L. (2016): Optimization of Cogeneration by Seasonal Heat Storage in an Aquifer. In: Schulz, D. (Ed.): *Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern*, Chapter: Energy Storage Systems, Springer, Berlin, Heidelberg.

Opel, O., Werner, K.F., Ohse, S. (2016): Campusprojekt Leuphana Universität Lüneburg. In: Erhorn-Kluttig, H., Doster, S., Erhorn, H. (Ed.): *Der energieeffiziente Universitätscampus: Pilotprojekte der Forschungsinitiative EnEff:Stadt* (pp. 54-64). Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

### **Konferenzbeiträge**

Opel, O., Werner, K., Strodel, N., Geffken, J., Tribel, A., Ruck, W., Rischmüller, S., Wussler, M., Plessner, S., Fisch, M.N. (2017): Klimaneutraler Campus Leuphana Universität Lüneburg. 5. Kongress ZUKUNFTSRAUM SCHULE, 14. - 15. November 2017, Stuttgart.

Opel, O. (2017): Participation in the project “Climate-Neutral Campus“ - experience and lessons learned. UAS Spring Campus/Management Workshop 2017, March 28th, HU Berlin.

Opel, O., Strodel, N., Werner, K.F., Geffken, J., Tribel, A., Ruck, W.K.L. (2016): Climate-neutral and sustainable campus Leuphana University of Lueneburg. SDEWES SEE 2nd South East European

Conference on Sustainable Development of Energy Water and Environment System, June 18th at Piran, Slovenia.

Strodel, N., Opel, O., Kranz, S., Werner, K.F., Ruck, W.K.L. (2016): Erhöhung des regenerativen Anteils der Wärmeversorgung eines Nahwärmenetzes durch die saisonale Wärmespeicherung in einem Aquifer. Thermische Energiespeicher, At Neumarkt i. d. Oberpfalz, Juni 2016, Volume: 5

Strodel, N., Opel, O., Werner, K.F., Ruck, W. (2016): Investigations on the integration of a Low-Exergy-Building in a District Heating System and effects on the thermal stratification within the buffer storage. IRES 2016, 13th-15th March, Düsseldorf.

Strodel, N., Opel, O., Werner, K.F., Ruck, W.K.L. (2015): Ausbau und Energieeffizienzerhöhung des Energiesystems der Leuphana Universität Lüneburg. Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern - NEIS, 10. – 11. September, Hamburg, Germany.

Strodel, N., Werner, K.F., Opel, O., Ruck, W.K.L. (2015): Integrales Energiekonzept für eine klimaneutrale Universität – Projekt "klimaneutraler Campus " Einordnung in den Gesamtkontext. OTTI Fachforum Thermische Energiespeicher, 2. – 3. Juli 2015, Neumarkt in der Oberpfalz, Germany.

Tribel, A. & Opel, O. (2014): Like! You saved #energy today. Fostering Energy Efficiency in Buildings – The implementation of social media patterns as symbols in Building Management Systems' Graphical User Interfaces using Peirce's semeiosis as a communication concept. Beitrag in EnviroInfo 2014, Oldenburg, Deutschland.

Opel O., Werner K.F., Brüggem I., Ruck W.K.L. (2013): Sustainability on Campus - Overview, Implementation and Outlook. 10/2013; In proceeding of: 2nd Workshop Energy for Sustainable Science at Research Infrastructures, At CERN, Geneva, Switzerland





# *Dokumentation*

## **Machbarkeitsstudie**

**zur Bewertung der Möglichkeit  
der Speicherung von Abwärme einer  
Kraft-Wärme-Kopplung im Erdboden  
im Rahmen der klimaneutralen  
Campusentwicklung der  
Universität Lüneburg**

Datum: 30.01.2014  
Projektleiter: Dr. Frank Kabus  
Geschäftsführer: Dr. Peter Seibt

Ausfertigung:

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10

---

<b>Titel:</b>	Machbarkeitsstudie zur Bewertung der Möglichkeit der Speicherung von Abwärme einer Kraft-Wärme-Kopplung im Erdboden im Rahmen der klimaneutralen Campuserwicklung der Universität Lüneburg
<b>Auftraggeber:</b>	Leuphana Universität Lüneburg Stiftung öffentlichen Rechts
<b>Bearbeitungszeitraum:</b>	05/2011 – 12/2013
<b>Auftragsnummer:</b>	4732
<b>Textumfang:</b>	118 Seiten
<b>Anlagenzahl:</b>	-
<b>Tabellenzahl:</b>	28
<b>Abbildungszahl:</b>	80
<b>Bearbeiter:</b>	Dr. Markus Wolfgramm Dipl.-Geol. Gerhard Lenz Dr. Jörn Bartels Dipl.-Geol. Susanne Diaz Dipl.-Ing. Frank Hoffmann Dr. Frank Kabus Dipl.-Ing. Stephan Mertens Dipl.-Ing. Bärbel Kabus

Geothermie Neubrandenburg GmbH

PF 11 01 20  
17041 Neubrandenburg

Seestraße 7 A  
17033 Neubrandenburg

Tel.: (0395) 367 74 - 0  
Fax: (0395) 367 74 - 11  
gtn@gtn-online.de

---

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Einführung .....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Geologische Kenntnisstandsanalyse.....</b>	<b>9</b>
2.1	Einführung .....	9
2.2	Datenlage .....	9
2.3	Regionalgeologische Situation.....	10
2.3.1	Aquifere im Norddeutschen Becken.....	12
2.4	Geologische Situation im Untersuchungsgebiet.....	14
2.4.1	Weitere Speicherhorizonte .....	18
2.4.2	Geologisches Vorprofil .....	18
2.5	Temperatur .....	18
2.5.1	Wasserchemismus .....	20
2.5.2	Eigenschaften Nutzhorizont.....	22
2.5.3	Abschätzung der maximal möglichen Einspeichertemperatur ....	22
<b>3</b>	<b>Wärmebedarf und Heiznetzverhalten.....</b>	<b>33</b>
3.1	Variante 1 - Aktueller Status.....	33
3.1.1	Wärmebedarf.....	33
3.1.2	Heiznetztemperaturen .....	43
3.2	Variante 2 – Verbesserung der Energieeffizienz im Heizsystem für den Uni-Campus .....	46
3.2.1	Wärmebedarf.....	46
3.2.2	Heiznetztemperaturen .....	48
<b>4</b>	<b>Modellierung .....</b>	<b>49</b>
4.1	Modellbeschreibung .....	49
4.2	Thermische Initialisierung.....	52
4.3	Modellverifizierung .....	54
4.3.1	Verifikationsszenario 1: Variante 1 (Campus Ist-Zustand) mit $Q_{\max} = 30 \text{ m}^3/\text{h}$ und 2 Bohrplätzen .....	55
4.3.2	Verifikationsszenario 2 zur Variante 2 (energieeffizienteres Campus-Heiznetz) mit $Q_{\max} = 50 \text{ m}^3/\text{h}$ und 2 Bohrplätzen .....	57

---

---

4.4	Vergleichsszenarien von Varianten mit 2 Bohrplätzen und 1 Bohrplatz („Sammelbohrplatz“) .....	60
4.4.1	Simulationsszenario 3: Variante 1 (Campus Ist-Zustand) mit $Q_{\max} = 30 \text{ m}^3/\text{h}$ und 1 Bohrplatz.....	61
4.4.2	Simulationsszenario 4: Variante 2 (energieeffizienteres Campus-Heiznetz) mit $Q_{\max} = 50 \text{ m}^3/\text{h}$ und 1 Bohrplatz.....	64
4.5	Simulationsergebnisse für die energetischen Varianten 1 und 2.....	66
4.5.1	Simulationsszenario 5: Variante 1 (Campus Ist-Zustand) mit $Q_{\max} = 30 \text{ m}^3/\text{h}$ und 1 Bohrplatz.....	67
4.5.2	Simulationsszenario 6: Variante 1 (Campus Ist-Zustand) mit $Q_{\max} = 25 \text{ m}^3/\text{h}$ und 1 Bohrplatz.....	67
4.5.3	Simulationsszenario 7: Variante 1 (Campus Ist-Zustand) mit $Q_{\max} = 35 \text{ m}^3/\text{h}$ und 1 Bohrplatz.....	68
4.5.4	Simulationsszenario 8: Variante 2 (energieeffizienteres Campus-Heiznetz) mit $Q_{\max} = 50 \text{ m}^3/\text{h}$ und 1 Bohrplatz.....	68
4.5.5	Simulationsszenario 9: Variante 2 (energieeffizienteres Campus-Heiznetz) mit $Q_{\max} = 20 \text{ m}^3/\text{h}$ und 1 Bohrplatz.....	69
4.5.6	Simulationsszenario 10: Variante 2 (energieeffizienteres Campus-Heiznetz) mit $Q_{\max} = 40 \text{ m}^3/\text{h}$ und 1 Bohrplatz .....	69
<b>5</b>	<b>Bohrungen</b> .....	<b>70</b>
5.1	Geologische Aufgabenstellung.....	70
5.1.1	Aufgabenstellung der Bohrungen .....	70
5.1.2	Lage der Bohrungen .....	70
5.1.3	Qualitätsanforderungen.....	70
5.1.4	Spülprobenentnahme .....	71
5.1.5	Kernstrecken.....	71
5.1.6	Geophysikalische Bohrlochmessungen .....	71
5.1.7	Aufschlussintervalle und Rohreinbauten .....	72
5.1.8	Zementation und Dichtepfung .....	72
5.1.9	Filterkomplettierung.....	72
5.1.10	Geologisch bedingte bohrtechnische Komplikationen .....	72
5.2	Testprogramm.....	73
5.2.1	Zielstellung.....	73
5.2.2	Reinigungslift nach dem Aufschluss des Nutzhorizontes.....	73

---

---

5.2.3	Casingliffstest.....	73
5.2.4	Laboruntersuchungen (Gestein und Schichtwasser) .....	74
5.3	Aufschluss und Komplettierung der Bohrungen .....	74
5.3.1	Bohrplatz.....	74
5.3.2	Bohren und Komplettieren .....	75
5.3.3	Korrosionsschutz.....	76
5.4	Endinstallation.....	76
5.5	Kostenschätzung.....	79
<b>6</b>	<b>Übertägiger Thermalwasserkreislauf.....</b>	<b>80</b>
6.1	Verfahrensbeschreibung .....	80
6.2	Lage und Platzbedarf der technischen Anlagen .....	83
6.3	Investitionen .....	85
<b>7</b>	<b>Einbindung der Aquiferspeicher in das Wärmeversorgungssystem .....</b>	<b>86</b>
7.1.1	Verfahrensbeschreibung .....	86
7.1.2	Investitionen .....	89
<b>8</b>	<b>Energetische Bilanzierung .....</b>	<b>91</b>
8.1	Ohne Berücksichtigung eines Aquiferwärmespeichers .....	91
8.2	Variante 1 - Aktueller Status.....	91
8.3	Variante 2 – Verbesserung der Energieeffizienz im Heizsystem für den Uni-Campus .....	92
8.3.1	Zusammenfassung .....	93
8.4	Mit Integration des Aquiferwärmespeichers.....	93
8.4.1	Variante 1 - Aktueller Status.....	94
8.5	Variante 2 – Verbesserung der Energieeffizienz im Heizsystem für den Uni-Campus .....	101
<b>9</b>	<b>Wirtschaftlichkeitsbetrachtung .....</b>	<b>107</b>
9.1	Randbedingungen der Wirtschaftlichkeitsbewertung.....	107
9.1.1	Kapitalbezogene Kosten.....	108
9.1.2	Verbrauchsgebundene Kosten bzw. Erlöse aus Energieverkauf .....	109

---

9.1.3	Betriebsgebundene Kosten .....	109
9.1.4	Sonstige Kosten .....	109
9.2	Zusammenfassung der Investitionen in den Aquiferspeicher und seine Einbindung in das Gesamtsystem .....	110
9.3	Zusammenfassung der energetischen Parameter der Untersuchungsvarianten .....	110
9.4	Ergebnisse.....	111
10	<b>Zusammenfassung</b> .....	114
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	118

---

---

## **1 Einführung**

Die Leuphana Universität Lüneburg hat sich die Erreichung der Klimaneutralität zum Ziel gesetzt. Vorgesehen ist die vollständige Versorgung der Universitäts-Liegenschaften mit regenerativer Energie sowie die Einsparung von mindestens 55 % Heizwärme und ca. 23 % Strom am Campus Scharnhorststraße (Universität und Drittnutzer). Der Vorbereitung und Umsetzung dieses Zieles dient die zwischen dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (Zuwendungsgeber) und der Leuphana abgeschlossene Hauptvereinbarung „Klimaneutraler Campus Leuphana Universität Lüneburg – Scharnhorststraße/Bockelsberg“.

Die hier präsentierte Studie ordnet sich in vorgenanntes Vorhaben ein.

Kernstück auf der Erzeugerseite des Energieversorgungskonzeptes für den Campus und umliegende Abnehmer sind Bioerdgas-Blockheizkraftwerke (BHKW).

Durch den Bau eines Aquifer-Wärmespeichers könnte die Laufzeit des bestehenden BHKW der E.ON-Avacon ausgeweitet und die Nutzung der in das Nahwärmesystem einspeisenden Spitzenlastkessel verringert werden.

Ein Hauptaugenmerk liegt auf der optimalen Nutzung der BHKW-Abwärme. Bei gut gedämmten Gebäuden ist in der Jahresbilanz in der Regel ein Überschuss an Wärmeenergie bei der Nutzung von KWK vorhanden. Diese überschüssige Wärme soll im Sommer möglichst umfänglich direkt genutzt werden (z. B. für die Kälteerzeugung der Leuphana Universität). Für den verbleibenden Rest bietet sich eine saisonale Speicherung an. Dies kann u. a. untertägig in einem Aquifer geschehen. Nach Informationen des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie am Geozentrum Hannover bestehen dazu im Untergrund die geologischen Möglichkeiten. Im ersten Teil der präsentierten Studie, der geologischen Kenntnisstandsanalyse, wird diese Aussage präzisiert.

Daraufhin werden dann im zweiten Schritt der Studie Aussagen zur technischen Gestaltung und Machbarkeit sowie zur erreichbaren Wirtschaftlichkeit eines derartigen Wärmespeichers im Erdboden getroffen.

In die Machbarkeitsuntersuchungen integriert und hier dokumentiert sind Forschungs- und Entwicklungsleistungen, die im Wesentlichen die Modellierung des Aquiferspeicherverhaltens betreffen.

Auf Basis der Ergebnisse der geologischen Kenntnisstandsanalyse wurden alle Daten für eine hydraulische Modellierung aufgearbeitet. So wurde ein 3D-Schichtmodell des relevanten Untergrundes erstellt und alle für die Modellierung notwendigen Parameter ermittelt, dokumentiert und diskutiert. Das 3D-Schichtmodell beinhaltet ein Faziesmodell, welches die Verbreitung und Lage des Grundwasserleiters detailliert widerspiegelt.

---

Auf Basis des geologischen Strukturmodells, eines Temperaturprofils für den Untergrund und der Resultate für die hydrogeologischen und thermophysikalischen Modellparameter wird ein 3-dimensionales numerisches Modell des durch den Speicherbetrieb beeinflussten Untergrundes erstellt.

Grundlage der Simulationen war der Simulator FEFLOW (DHI Wasy GmbH Berlin). Die 3D-Simulationen dienten auch zur Verifizierung der in der Arbeitsgruppe am Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungs-Zentrum-GFZ, für die Simulation des Gesamtsystemverhaltens notwendigerweise vereinfachten Modellansätze für den Aquiferspeicher.

---

## 2 Geologische Kenntnisstandsanalyse

### 2.1 Einführung

Am Standort Lüneburg (Leuphana Universität Lüneburg) ist geplant, eine Wärmespeicherung zu installieren. Mit einer geologischen Kenntnisstandsanalyse sollen die Möglichkeiten der Speicherung in den eozänen Sanden überprüft und dargelegt werden.

### 2.2 Datenlage

Die Datenbasis für die Interpretation der Geologie des tieferen Untergrundes im Bereich des Untersuchungsstandortes Lüneburg ist als gut einzuschätzen. So sind im Umkreis einige Tiefbohrungen vorhanden, von denen die wichtigsten in Tabelle 2-1 dokumentiert sind.

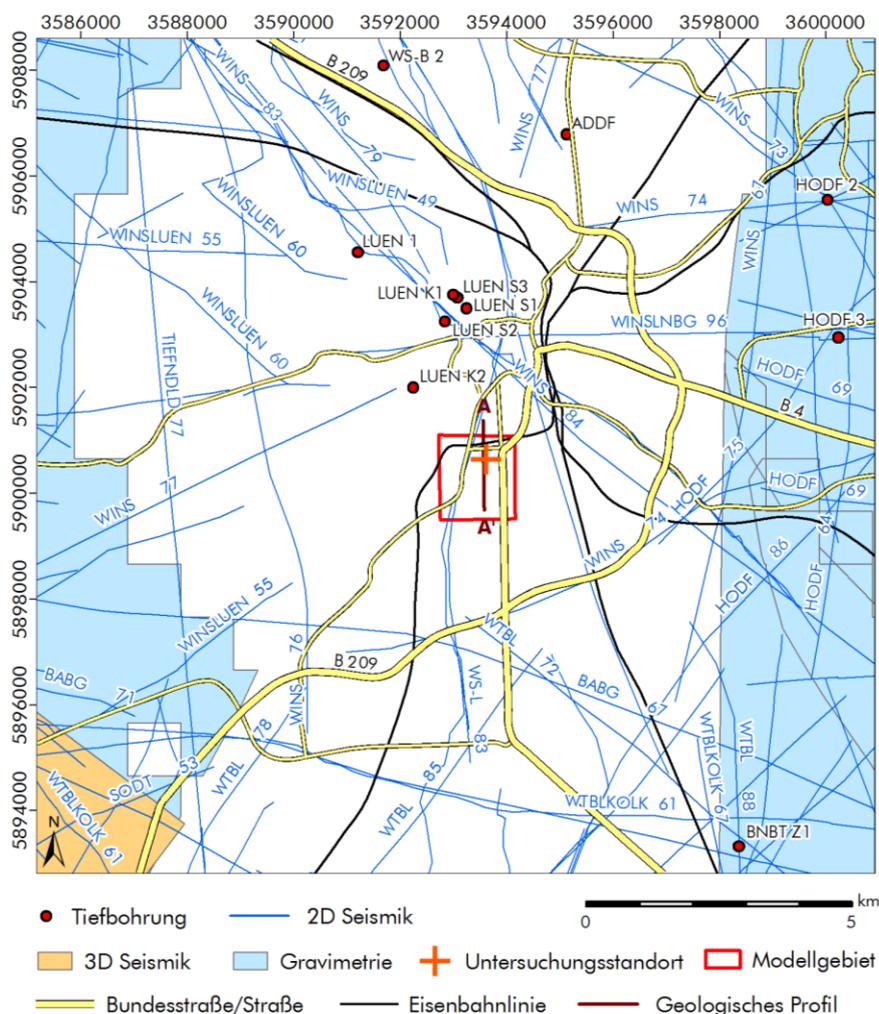


Abbildung 2-1: Übersichtskarte zu vorhandenen Tiefbohrungen und seismischen Tiefenprofilierungen im Raum Lüneburg

Alle für eine wärmetechnische Nutzung vorhandenen relevanten Untersuchungsergebnisse (Profilaufnahme, Bohrlochmessungen) der Erdöl-Erdgasbohrungen sind komplex bewertet und interpretiert worden.

Tabelle 2-1: Die wichtigsten Tiefbohrungen für den Bereich des Untersuchungsgebietes (vgl. Abbildung 2-1)

Bohrung	Koordinaten		Tiefster Horizont	Endtiefe [m u. GOK]
	Hochwert	Rechtswert		
Winsen-Bardowick 2	5908086	3591690	Rhät	1798,0
Winsen-Bardowick 1	5909600	3591003	Dogger beta	2043,0
Horndorf 2	5905550	3600040	Dogger alpha	1797,0
Horndorf 3	5902945	4400025	Dogger alpha	1906,0
Bienenbüttel Z1	5893315	3598370	Rotliegend	4946,5
Lüneburg K2	5902000	3592250	Unterkreide	595,0
Lüneburg S2	5903250	3592850	Buntsandstein	1208,0
Lüneburg S1	5903500	3593250	Muschelkalk	501,0
Lüneburg S3	5903700	3593080	Buntsandstein	1333,0
Lüneburg K1	5903750	3593000	Muschelkalk	700,0
Lüneburg 1	5904550	3591210	Unterkreide	424,0

Mit Hilfe seismischer Vermessungen lassen sich die Strukturen (Verlauf von geologischen Schichten, Störungen etc.) im tieferen Untergrund entsprechend auf den vermessenen Spurlinien abbilden. Im Rahmen der Erdöl- und Erdgaserkundung wurden einige reflexionsseismische Messungen im Untersuchungsgebiet durchgeführt. Zur Klärung der Lagerungsverhältnisse ist auf die Ergebnisse der Messungen Winsen-Lüneburg 1983 und Winsen-Lüneburg 1996 zurückgegriffen worden.

### **2.3 Regionalgeologische Situation**

Das Untersuchungsgebiet ist Teil des Norddeutschen Beckens und befindet sich im zentralen Beckenbereich (Abbildung 2-2). Die wichtigsten geologischen Strukturen sind NW-SE orientiert. Parallel zu diesen Strukturen sind die geologischen Verhältnisse häufig vergleichbar. Dies trifft auch für das vorliegende Projekt zu. Die Störungen streichen NNW-SSE.

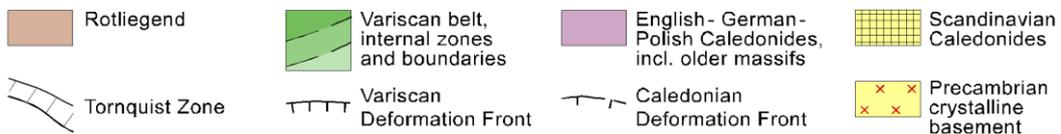
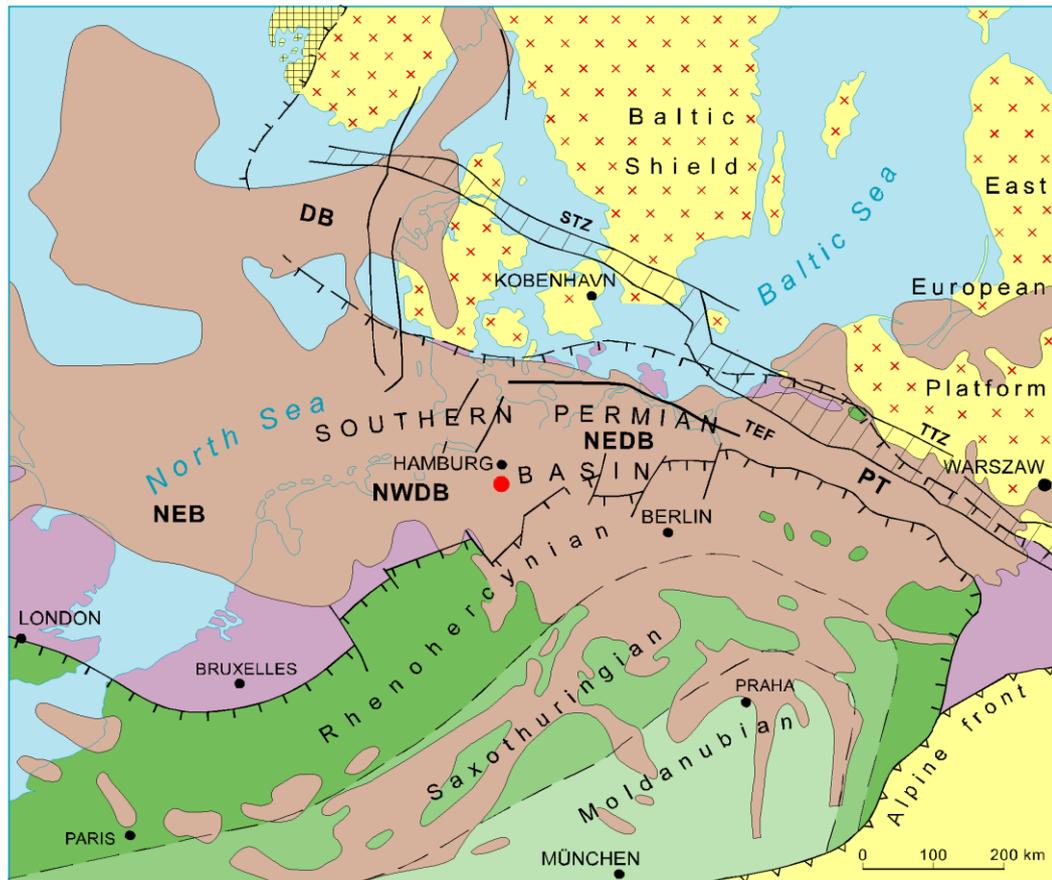


Abbildung 2-2: Tektonische Hauptelemente des Zentraleuropäischen Grundgebirges und Verbreitung des Rotliegend (nach ZIEGLER 1990, BERTHELSEN 1992a, PLEIN 1993, BENECK et al. 1996); die Lage des Untersuchungsgebiets ist in etwa durch das rote Viereck markiert

- |                                 |  |
|---------------------------------|--|
| NWDB = Nordwestdeutsches Becken | NEDB = Nordostdeutsches Becken         |
| DB = Dänisches Becken           | PT = Polnischer Trog                   |
| TTZ = Tornquist-Teisseyre-Zone  | STZ = Sorgenfrei-Tornquist-Zone        |
| TEF = Transeuropäische Störung  | NEB = Niederländisch-Englisches Becken |

Seit dem Perm vor ca. 300 Mio. Jahren wurde das Norddeutsche Becken mit Sedimenten gefüllt. Dabei gelangten Sand- und Tonsteine, aber auch Karbonate und Evaporite (Salz- und Anhydritgesteine) zur Ablagerung. Die Mächtigkeit der sedimentären Füllung nimmt vom Rand im Norden (etwa Tornquist-Teisseyre-Zone, Abbildung 2-2) ins Beckeninnere (nördlich von Berlin) auf bis zu 8 km zu.

Im Bereich von Lüneburg erreichen die Rotliegend-Sandsteine Tiefenlagen von  $>>5$  km (BEECK et al. 1998). Bis in etwa diese Tiefenlage können relevante Speicher erwartet werden. Beckenentwicklung und -aufbau sowie re-

gionale Geologie sind umfangreich publiziert (u. a. BALDSCHUHN et al. 2001, BACHMANN & HOFFMANN 1997).

Im Folgenden werden die einzelnen in Frage kommenden Porenspeicher und relevante abdeckende Schichten genannt und ihre Lage, ihre hydraulischen Parameter und Temperaturen beschrieben.

### **2.3.1 Aquifere im Norddeutschen Becken**

In Norddeutschland und im Speziellen auch im nordwestlichen Teil des Norddeutschen Beckens sind die relevanten Aquifere/Speicher prinzipiell bekannt (GTN 1992, WOLFGRAMM et al. 2004, FELDRAPPE et al. 2007, FELDRAPPE et al. 2008). Die Verbreitung, Lage und Begrenzung einzelner Horizonte muss allerdings entsprechend der Aufgabenstellung detailliert erarbeitet werden.

Abbildung 2-3 gibt die relevanten Aquifere an, welche für die geothermische Energiegewinnung in Frage kommen. Dabei sind als oberster Aquifer die Sandsteine des Unteroligozäns und als tiefster in Frage kommender Aquifer die Sandsteine des Rotliegend zu betrachten.

Insgesamt können folgende Porenspeicher unterschieden werden:

- Unteroligozän (Neuengammer Gassand)
- Untereozän (alpha-/beta-Sand)
- Unterkreide-Sandsteine (Valangin, Hauterive, Wealden)
- Dogger-Sandsteine (Untercallov, Bathon, Bajoc, Aalen)
- Lias-Sandsteine (Toarc, Domer, Hettang, Untersinemur)
- Rhätkeuper-Sandsteine (Contorta, Postera)
- Schilfsandstein
- Mittlerer Buntsandstein (Solling, Hardegsen, Detfurth)
- Rotliegend

Im Weiterem werden nur die mittloligozän Neuengammer Gassande und eozäne Alpha-/Beta-Sande betrachtet.

---

		Stratigraphie	Lithologie
Tertiär			
		<b>Oligozän/Eozän</b>	Sand
Kreide	Unterkreide	<b>Unteralb - Hauterive</b>	Sandstein
		<b>"Wealden"</b>	Sandstein
Jura	Malm	Korallenoolith	Karbonatstein, Oolith
	Dogger	Bathon-Bajoc	Sandstein
		<b>Aalen</b>	Sandstein
		Toarc	Sandstein
	Lias	Domer	Sandstein
<b>Hettang-Untersinemur</b>		Sandstein	
Keuper	Ob.	<b>Rhät (Contorta)</b>	Sandstein
		<b>Rhät (Postera)</b>	Sandstein
	Mit.	Schilfsandstein	Sandstein
Unt.	Lettenkeuper	Sandstein	
Muschelkalk			
Buntsandstein	Ob.		
Buntsandstein	Mit.	Solling-Folge	Sandstein
		Hardegsen-Folge	Sandstein
		Defurth-Folge	Sandstein
		Volpriehausen	Sandstein
Buntsandstein	Unt.		
		<b>Zechstein</b>	

Abbildung 2-3: Potenzielle Aquifere im Raum Lüneburg nach WOLFGRAMM et al. (2004)

## 2.4 Geologische Situation im Untersuchungsgebiet

Der Standort des geplanten geothermischen Wärmespeichers Lüneburg, Scharnhorststraße 1, befindet sich etwa zwei Kilometer südlich des Salzstockes Lüneburg (Abbildung 2-4). Während in direkter Nähe des Salzstockes ein steiles Einfallen der känozoischen und mesozoischen Schichten vorhanden ist, sind die Ablagerungsverhältnisse am geplanten Standort als typische Salzstockrandsenke zu charakterisieren, deren Schichteinfallen nicht mehr so steil ist. (Abbildung 2-5).

Im Liegenden (unter) des Quartärs lagern miozäne Sande, Tone und Schluffe, gefolgt vom Oligozän (unvollständiges Profil). Hier ist besonders Mitteloligozän (Rupelton) mit den tonigen Schichten vorhanden, die den Süßwasserkomplex im Hangenden (oben) vom Salzwasserkomplex im Liegenden (unten) trennen. Darunter findet sich der Neuengammer Gassand. Die Mächtigkeit schwankt zwischen wenigen Dezimetern bis zu 12 m. Obereozän beginnt teilweise tonig oder feinsandig. Hauptsächlich ist im Oberen Eozän aber eine 25 bis 50 m mächtige Feinsand- bzw. Feinsandsteinlage vorhanden. Diese Sedimente sind in allen Bohrungen (außer Adendorf, ET 502 m im tonigen Unteroligozän oder Oberen Eozän mit Sandanzeichen eingestellt) angetroffen worden. Es handelt sich um einen sehr kalkigen Feinsand bzw. Kalkfeinsandstein.

Tabelle 2-2: Speicherübersicht

Bohrung	Neuengammer Gassand		Eozäne Sande	
	Teufe (m NN)	Lithologie	Teufe (m NN)	Lithologie
<b>Winsen-Bardowick 2</b>	456,5 - 469,5	Fein-, Mittelsand	484,5 - 564,5	Kalkfeinsandstein
<b>Winsen-Bardowick 1</b>	470,5 - 485,5	keine Aussagen	533,5 - 618,5	Feinsand- und Kalksandstein
<b>Bienenbüttel Z1</b>	326,0 - 337,0	Fein- bis Grobsand	423,0 - 498,0	Fein-, Mittelsandstein und Kalksandstein
<b>Horndorf 2</b>	391,5 - 411,0	Ton, sandig	494,0 - 539,0	Kalksandstein, fein- bis grobkörnig
<b>Horndorf 3</b>	411,0 - 430,0	Mergel	499,0 - 555,0	Kalksandstein, fein- bis grobkörnig

In den Bohrungen Winsen-Bardowick 2 ist eine Porosität von 30 % für den Sand/Sandstein angegeben. Für das Untersuchungsgebiet kann nach Einsicht in die seismischen Unterlagen (hier besonders Seismikbericht Winsen-

Lüneburg 1983 - Profile 8301 (Abbildung 2-6) und 8302 (Abbildung 2-7) im Teufenbereich ab ca. 390 m mit dem Neuengammer Gassand und im Teufenbereich ab ca. 450 m mit dem Sandkomplex des Oberen Eozän gerechnet werden.

Im Einzelnen sind in den eingesehenen Bohrungen die in Tabelle 2-2 aufgeführten Sandsteinkomplexe vorhanden.

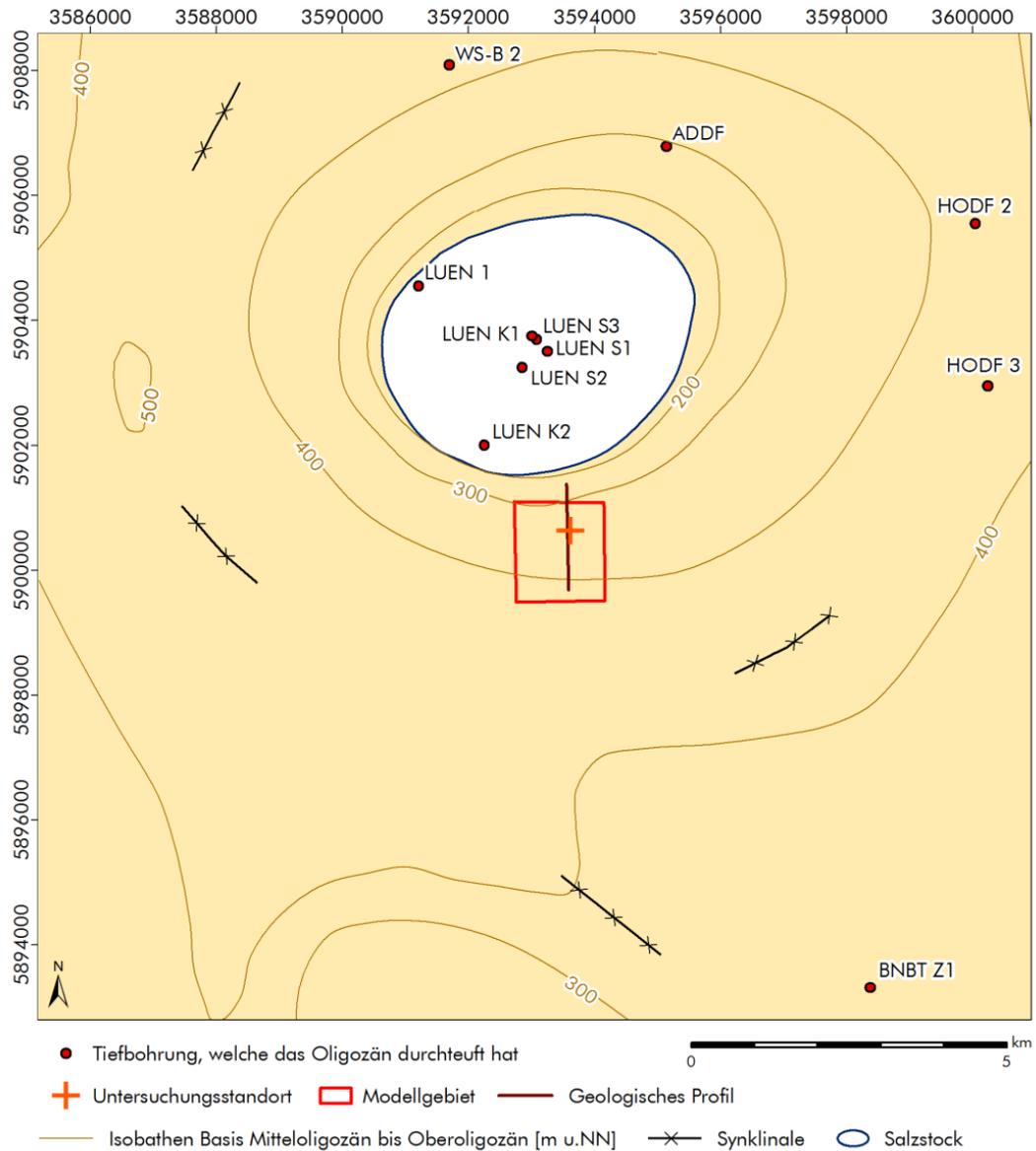


Abbildung 2-4: Isobathen Basis Mitteloligozän (etwa Oberkante Neuengammer Gassand)

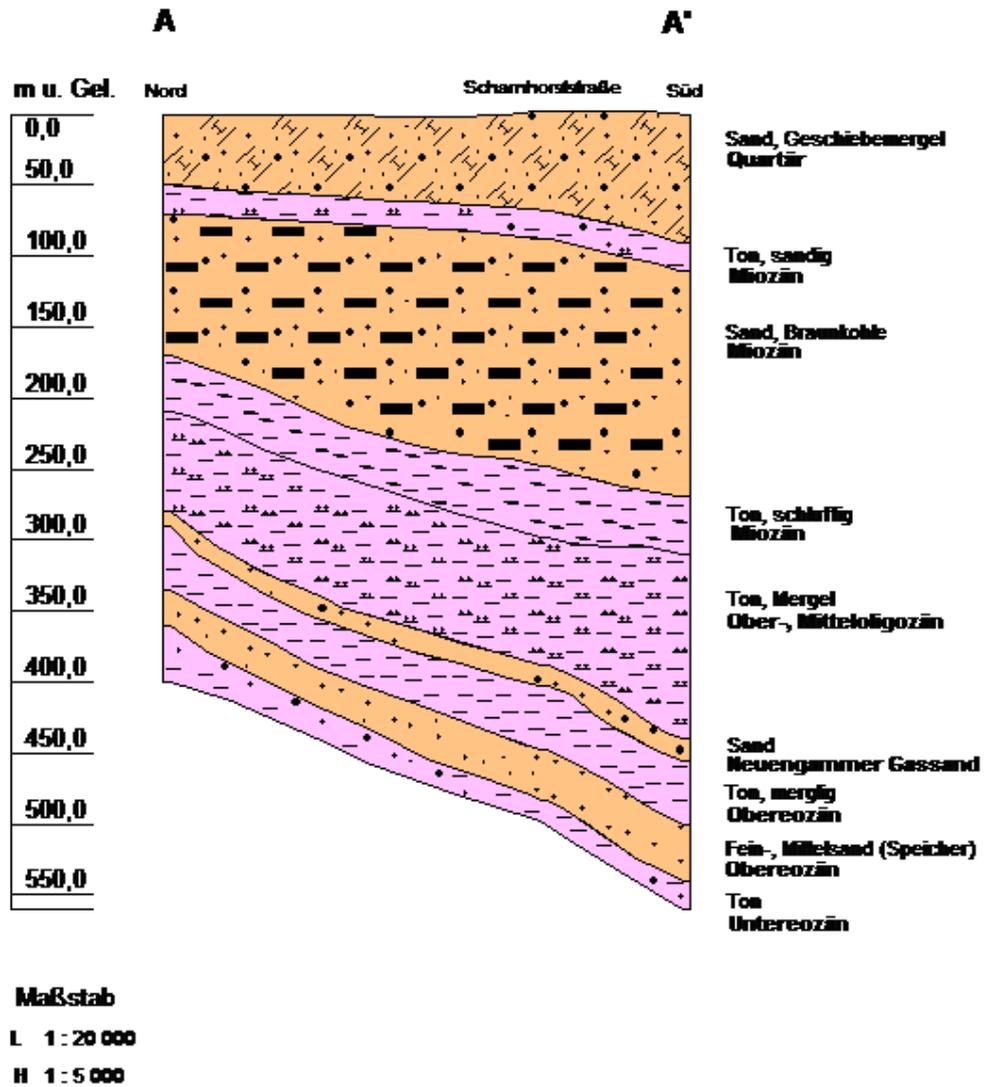


Abbildung 2-5: Geologischer Profilschnitt (Lage Abb. 2-1) durch das Modellgebiet (Schichteneinfall stark überhöht)

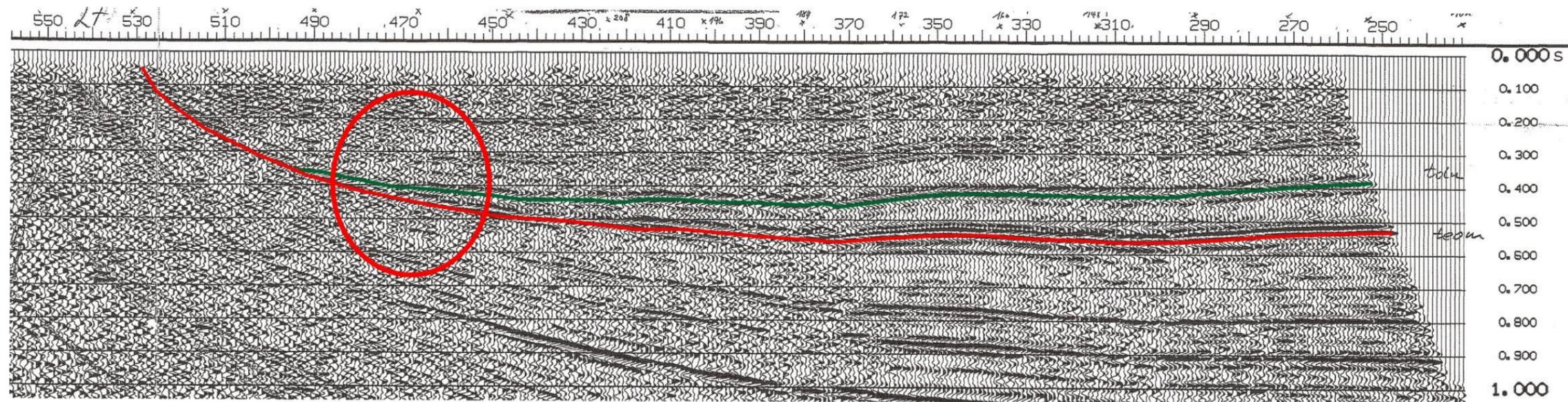


Abbildung 2-6: Ausschnitt aus dem Südabschnitt des seismischen Profils Winsen-Lüneburg 8301 (grüne Linie = Basis Oligozän; rote Linie = Basis Eozän; roter Kreis = Lagerungsverhältnisse etwa 500 m westlich des Untersuchungsgebietes)

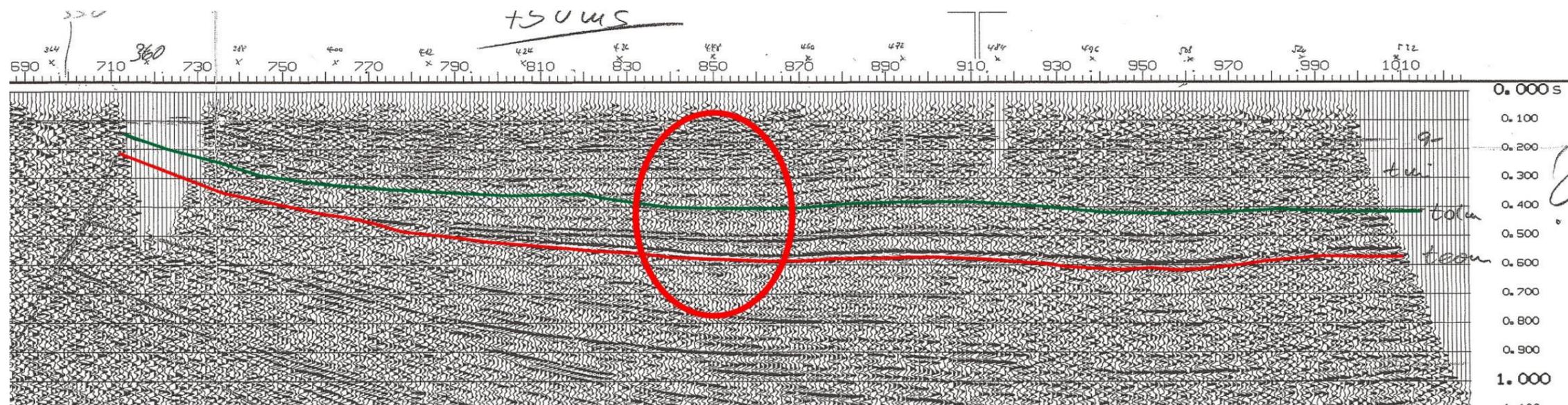


Abbildung 2-7: Ausschnitt aus dem Südabschnitt des seismischen Profils Winsen-Lüneburg 8302 (grüne Linie = Basis Oligozän; rote Linie = Basis Eozän; roter Kreis = Lagerungsverhältnisse etwa 1 km östlich des Untersuchungsgebietes)

Entsprechend Abbildung 2-6 und Abbildung 2-7 ist in Ost-West-Richtung mit saigeren Lagerungsverhältnissen zu rechnen. In Nord-Süd-Richtung sollte ein Schichteinfall von 10° nach Norden für das Modell angenommen werden. Dieser Schichteinfall verstärkt sich zum Salzstock hin auf 30° bis 40°.

### 2.4.1 Weitere Speicherhorizonte

In der Bohrung Horndorf 2 ist im Teufenbereich von 720 m - 790 m im Untereozän ein toniger Feinsand aufgenommen worden. Dieser Feinsand wurde auch für den Teufenbereich von 725 m - 780 m in der Bohrung Horndorf 3 festgestellt. Der Mittelrhät-Hauptsandstein ist in den Bohrungen Winsen-Bardowick 2 (1590 m - 1637 m), Winsen-Bardowick 1 (1859 m – ca. 1952 m) und in der Bohrung Bienenbüttel Z1 (2592 m - 2629 m) erbohrt worden. Das Antreffen des Mittelrhät-Hauptsandsteins am Untersuchungsstandort bei einer Teufe von ca. 1400 m ist sehr wahrscheinlich.

### 2.4.2 Geologisches Vorprofil

Für den Standort Scharnhorststraße lässt sich nach Seismik und Altbohrungen folgendes geologisches Vorprofil angeben:

<b>Tiefe (m u. Gel.)</b>	<b>Statigraphie</b>	<b>Lithologie</b>
0 - 70	<b>Quartär</b>	Sand, Geschiebemergel
500	<b>Tertiär</b>	
90	Miozän	Ton, sandig
250	Miozän	Sand, Braunkohle
300	Miozän	Ton, schluffig
390	Ober-, Mitteloligozän	Ton, Mergel
405	Neuengammer Gassand	Sand
450	Obereozän	Ton, merglig
485	Obereozän	Fein-, Mittelsand
500	Untereozän	Ton

Teufenfehler ± 30 m

### 2.5 Temperatur

Zur Bestimmung der Temperatur-Tiefenfunktion des Untersuchungsgebietes wurden Temperaturmessungen verschiedener Bohrungen des Nordwestdeutschen Beckens und insbesondere aus dem östlichen Niedersachsen verwendet. Als Temperaturverlaufsmessung standen die Daten der Bohrung Boitzenburg 1/74 zur Verfügung. Diese Bohrung befindet sich östlich des

Standortes nahe des Salstockes Gülze-Sumte. Da der Standort Lüneburg-Scharnhorststraße nahe einer Salzstruktur liegt, sollte der Einfluss der Salzstruktur auf die Temperatur-Tiefenbeziehung ähnlich sein. In Abbildung 4-5 sind die Bohrlochtemperaturen und die Temperaturverlaufsmessung der Boitzenburg 1/74 dargestellt. Da die Temperaturmessungen meist nach kurzen Standzeiten bzw. bei Tests erfolgt sind, muss von „gestörten Temperaturdaten“ ausgegangen werden. Demzufolge wurde die Verlaufsmessung der Boitzenburg 1/74 nach FÖRSTER (2000) korrigiert. Die so erhaltenen Temperaturen bzw. der entsprechende Temperaturgradient sollten die natürlichen Temperaturverhältnisse gut wiedergeben.

Als Temperaturen können dementsprechend erwartet werden:

<b>Tiefe [m u. GOK]</b>	<b>Temperatur [°C]</b>
250	17,4
500	25,8
750	34,1

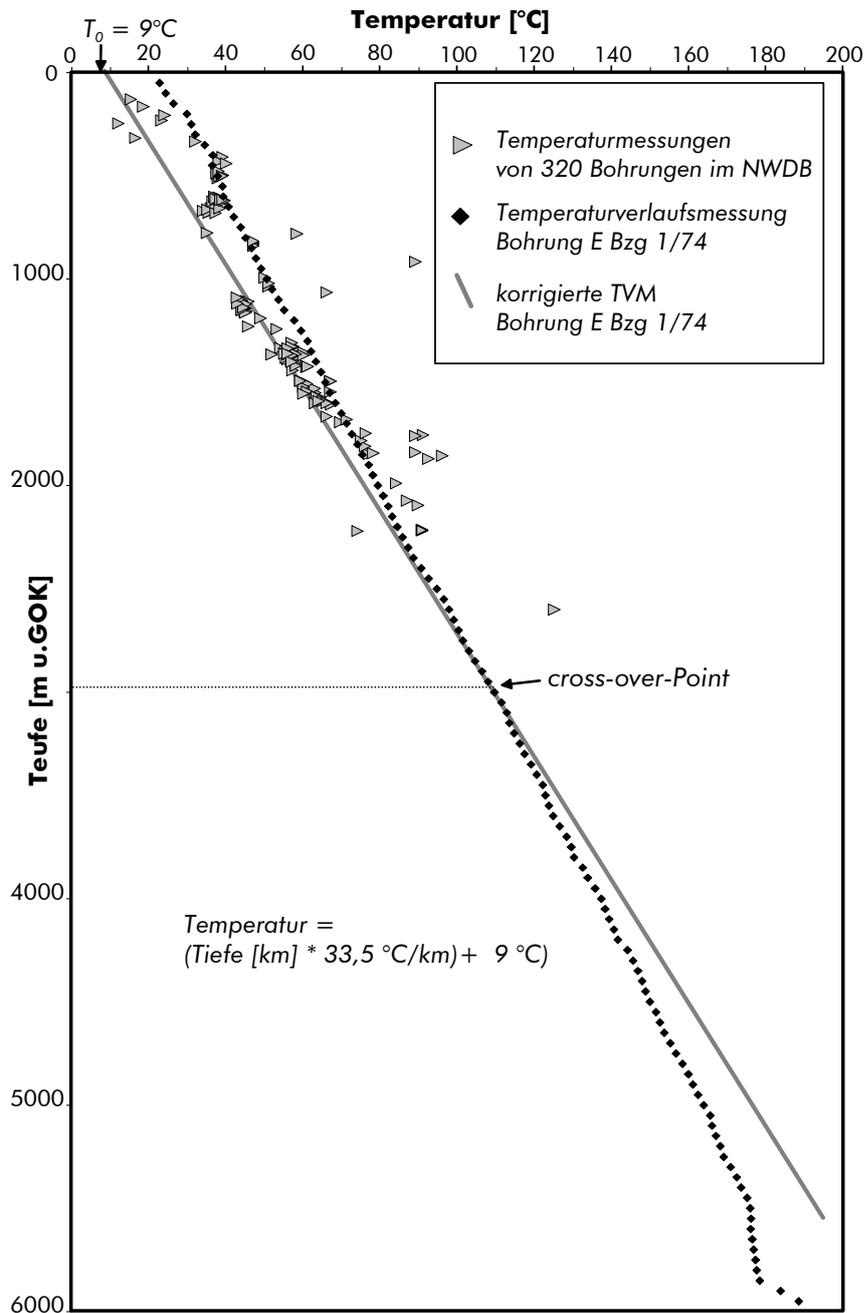


Abbildung 2-8: Temperatur-Teufenbeziehung im weiteren Bereich von Lüneburg (Temperaturmessungen verschiedener Bohrungen des Nordwestdeutschen Beckens und Temperaturverlaufsmessung der Bohrung Boitzenburg 1/74 nach 12 Tagen Standzeit)

### 2.5.1 Wasserchemismus

Aus dem Eozän liegen sehr wenige Schichtwasseranalysen vor. Zur Bestimmung des Schichtwasserchemismus wurden Bohrungen aus dem westlichen Sachsen-Anhalt verwendet. Es standen Daten aus den Bohrungen Arendsee und Werle zur Verfügung. Diese Bohrungen befinden sich in Nähe von

Salzstöcken und der Schichtwasserchemismus sollte dem des Untersuchungsstandortes ähneln (Tabelle 4-1). Die Schichtwässer sind dem NaCl-Typ zuzuordnen.

Tabelle 2-3: Prognose der Zusammensetzung der Schichtwässer des Nutzhorizontes am Standort Lüneburg (Analysen nach Daten der Bohrungen Arendsee, Werle, Bad Wisnack)

Parameter	Eozän
Tiefe	500 m
Ionen ( mg/l)	
K <sup>+</sup>	1046
Na <sup>+</sup>	28492
Ca <sup>2+</sup>	1942
Mg <sup>2+</sup>	774
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	45,4
Fe <sup>2+</sup>	2,0
Mn <sup>2+</sup>	-
Ba <sup>2+</sup>	-
Li <sup>+</sup>	-
Sr <sup>2+</sup>	-
<b>Summe K</b>	<b>32301,4</b>
Cl <sup>-</sup>	43721,2
Br <sup>-</sup>	42,4
I <sup>-</sup>	9,3
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	122,8
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	-
F <sup>-</sup>	-
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-
SiO <sub>2</sub>	-
CO <sub>2, gelöst</sub>	-
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	76,9
<b>Summe A</b>	<b>11671,2</b>
pH	6
Mineralisation [g/l]	76,3

## 2.5.2 Eigenschaften Nutzhorizont

Für den geplanten Nutzhorizont können folgende Daten angegeben werden:

- Teufe (m u. Gel.): 450 – 485
- Stratigraphie: Obereozän
- Lithologie: Fein-, Mittelsand, kalkig
- effektive Mächtigkeit (m): 30
- Nutzporosität (%): 30  
(Bg. Winsen-Bardowick 2)
- Permeabilität (mD): 500 (geschätzt)
- Produktivitätsindex (m<sup>3</sup>/h/MPa): 50
- Schichtwassertemperatur (°C): 25
- Schichtwassermineralisation (g/l): 76,3

## 2.5.3 Abschätzung der maximal möglichen Einspeichertemperatur

Zur Abschätzung der maximal möglichen Einspeichertemperatur als auch der Auswirkungen der Erhöhung der Speichertemperatur selbst, werden chemische Modellierungen mit PHREEQC durchgeführt. Die gewünschte maximale Einspeichertemperatur beträgt dabei 90 °C bei einer Speichertemperatur von nur ca. 25 °C. Unsicherheiten bestehen bei der Zusammensetzung der Schichtwässer, da diese von der „primären“ Schichtwasserzusammensetzung und vom Anteil der abgelaugten Sole vom Salzstock geprägt sind, dessen Anteil sich nur schwer abschätzen lässt. Als Analyse werden Daten verwendet, welche aus ähnlichen „settings“ stammen, wie im Falle Lüneburg (vgl. Tabelle 2-3).

### 2.5.3.1 Hydrogeochemische Modellierung mit PHREEQC zur Abschätzung des temperaturabhängigen Sättigungsindexes

PHREEQC berechnet sowohl die qualitativen als auch die quantitativen Veränderungen mittels mathematischer Algorithmen, welche die Ionendissoziation in aquatischen Systemen beschreiben. Spezies sind alle im Wasser gelösten Bestandteile (Kationen, Anionen, Komplexe). Einschränkend muss gesagt werden, dass das Programm PHREEQC die Druckabhängigkeit der Löslichkeit nicht berücksichtigt. Die Löslichkeit vieler Phasen steigt jedoch mit zunehmendem Druck an.

Das Programm PHREEQC führt seine Berechnungen mit Molalitäten (mol/kg<sub>w</sub>) durch. Allerdings kann die Eingabe auch in anderen Einheiten erfolgen, im vorliegenden Fall waren es mg/L bzw. g/L. Teilweise wurden

---

die Daten aus AQUACHEM 4.0 übernommen, in der eine wasserchemische Datenbank enthalten ist.

Die Modellierung benötigt drei Schritte:

- INPUT:** Eingabe der genauen und kompletten Analyse (Solution)  
Unter Solution Spread können auch mehrere Analysen eingegeben werden.
- DATABASE:** Thermodynamische Datenbanken (PHREEQC, WATEQ4F, ...), welche zur Modellierung verwendet werden
- OUTPUT:** Speziation, SI, Redoxpaare, Analysenfehler etc.

- **INPUT: Eingangsparameter, Analysen**

Entsprechend der Prognose zur Zusammensetzung des Tiefenwassers (Tabelle 2-3) wurde die Analyse in AQUACHEM bewertet und hinsichtlich der Ionenbilanz leicht modifiziert. Zudem wurde die Konzentration relevanter Ionen abgeschätzt (auf Basis entsprechender Datenbanken, vgl. WOLFGRAMM et al. 2011). Als Eingabemaske wurde folgende genutzt:

```
# Title_Lueneburg Speicher Modell
SOLUTION 1
temp      25
pH        6.00
pe        0.28
redox     pe
units     mg/kgw
density   1.0548
Na        25000
K         1100
Mg        750
Ca        1900
Sr        30
Ba        0.1
N(-3)    40
Fe        2
Mn        0.02
Al        0.01
Cu        0.005
Zn        0.02
Cd        0.002
Pb        0.01
Cl        45000
S(6)     150
C(+4)    100# HCO3- 100+ 0 [CO2]
N(5)     0.1 # <0.1
B        1
Si        5
-water   1 # kg
```

---

Mittels Modellierung soll nachvollzogen werden, welchen Einfluss die Förderung des Schichtwassers (ca. 25 °C) aus einer der Bohrungen und die anschließende Erwärmung auf bis zu 100 °C hat.

Anschließend erfolgen auch Aussagen bezüglich der Abkühlung der zuvor veränderten Fluide, welche im Zuge der Wärmespeicherung stattfinden muss.

- **DATABASE: Auswahl des Datensatzes**

Als Datensätze liegen frei verfügbar im Programm PHRQCI vor:

- PHREEQC
- WATEQ4F
- MINTQ

Die Modellierungen beschränken sich auf die zwei Datensätze PHREEQC und WATEQ4F.

- **OUTPUT: Temperaturabhängige Ausfällungs- und Lösungsreaktionen**

Für das vorliegende Problem geht es darum nachzuweisen, wie eine Temperaturerhöhung von ursprünglich ca. 25 °C auf 80 bis 100 °C das Lösungs- und Fällungsverhalten des Fluids verändert.

- **Erwärmung der Wässer von 25 °C auf 100 °C**

Durch die Modellierung wird ermittelt, welchem Trend die einzelnen Mineralphasen folgen. Dabei wird mit PHREEQC bestimmt, welche Auswirkungen eine Erwärmung auf 80 °C bzw. auch bis auf 100 °C nach sich zieht. Es wird davon ausgegangen, dass Fluid und Gestein im Gleichgewicht stehen sollten. So werden die Sättigungsindizes (SI) bei 25 °C auf „0“ normiert (Tabelle 2-4). Positive SI geben somit eine Tendenz zum Ausfällen und negative SI zum Lösen der Mineralphasen an. Es kann somit nachvollzogen werden, welches Verhalten die Wässer der „kalten“ Seite durch die Erwärmung und anschließende Injektion in die „warme“ Seite aufweisen.

---

Tabelle 2-4: Sättigungsindizes für die Wässer in Lüneburg, Werte für 25 °C auf 0 normiert

T [°C]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Anhydrit	0.05	0.00	-0.01	0.02	0.06	0.11	0.19	0.28	0.38	0.49
Aragonit	-0.03	0.00	0.01	0.03	0.06	0.08	0.09	0.11	0.13	0.14
Baryt	0.24	0.00	-0.20	-0.38	-0.54	-0.67	-0.78	-0.88	-0.96	-1.02
Calcite	-0.01	-0.01	0.00	0.02	0.03	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
Chalcedon	0.19	0.06	-0.05	-0.16	-0.26	-0.36	-0.44	-0.54	-0.62	-0.69
Dolomit	-0.30	-0.13	0.01	0.12	0.19	0.22	0.21	0.16	0.08	-0.04
Fe(OH) <sub>3</sub> (a)	0.24	0.05	-0.12	-0.25	-0.37	-0.48	-0.58	-0.66	-0.73	-0.79
Goethit	-0.32	-0.13	0.06	0.25	0.45	0.63	0.82	0.99	1.17	1.34
Gips	0.08	0.02	-0.03	-0.07	-0.10	-0.13	-0.16	-0.18	-0.20	-0.21
Pyrit	0.54	0.14	-0.25	-0.64	-1.02	-1.41	-1.81	-2.21	-2.61	-3.01
Quarz	0.24	0.08	-0.07	-0.21	-0.34	-0.46	-0.57	-0.68	-0.78	-0.88
Siderit	-0.04	-0.01	0.01	0.00	-0.02	-0.06	-0.11	-0.19	-0.27	-0.37
SiO <sub>2</sub> (a)	0.13	0.05	-0.04	-0.11	-0.19	-0.25	-0.32	-0.38	-0.43	-0.49

Entsprechend der geochemischen Modellierung ergibt sich, dass eine Temperaturerhöhung prinzipiell zur Lösung von

- Baryt
- Quarz, Chalcedon, SiO<sub>2</sub> (amorph)
- Eisenhydroxid, Pyrit/Eisensulfid, Siderit

führt. Für „Quarzphasen“ muss eine Lösung in relevanter, wenn auch geringerer Rate berücksichtigt werden.

Ausgefällt werden hingegen tendenziell:

- Calcite, Aragonit
- Goethit
- Anhydrit

Dabei sind die SI nur fast ausschließlich <0,22 (außer Anhydrit), so dass keine Ausfällungen zu erwarten sind.

#### • **Abkühlung der Wässer von 100 °C auf 40 °C**

Entsprechend der geochemischen Modellierung ergibt sich, dass eine Temperaturerniedrigung prinzipiell zur Lösung von

- Calcite, Aragonit,
- Goethit,
- Anhydrit

führt.

Ausgefällt werden hingegen tendenziell:

- Baryt
- Quarz, Chalcedon,  $\text{SiO}_2$  (amorph)
- Eisenhydroxid, Pyrit/Eisensulfid, Siderit

#### 2.5.3.2 Modellierung mit PHREEQC zur Bewertung von $\text{SiO}_2$ -Lieferanten als Ursache von $\text{SiO}_2$ -Ausfällungen

Wie bereits vorab dargestellt, ist ein großes Problem bei der Anhebung der Schichttemperatur die Lösung und Konzentrationserhöhung von  $\text{SiO}_2$ . Bei der anschließenden übertägigen Abkühlung ist das Fluid dann an  $\text{SiO}_2$  übersättigt. Bei einer nachträglichen Injektion des Fluids kann es zu Ausfällungen von  $\text{SiO}_2$ -Modifikationen (Quarz, Chalcedon, amorphes  $\text{SiO}_2$ ) kommen. Das ist abhängig von der Menge des gelösten  $\text{SiO}_2$ .

Die Reaktionen werden normalerweise unterschiedlich stark (je nach Reaktion) kinetisch gehemmt. Das soll in diesem Abschnitt nicht berücksichtigt werden. Hier soll vor allem die Zunahme des Gefahrenpotenzials durch die Temperaturerhöhung ermittelt werden.

Um eine Modellierung der Massenbilanz im Bereich des geplanten Wärmespeichers Lüneburg durchführen zu können, muss zuerst darüber Klarheit herrschen, welche Komponenten und Randbedingungen berücksichtigt werden müssen. Als Komponenten kommen in Frage:  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SiO}_2$  (aq),  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^+$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ .

---

Tabelle 2-5: Potenziell vorkommende Mineralphasen des Aquifers im Wärmespeicher Lüneburg entsprechend mineralogisch-geochemischen Untersuchungen und in Anlehnung an ZHU (2005)

Phase	Chemische Zusammensetzung	Restriktionen
Calcite	$\text{CaCO}_3$	
Dolomit	$\text{Mg,Ca}(\text{CO}_3)_2$	Lösung
Siderit	$\text{FeCO}_3$	Lösung
Markasit	$\text{FeS}_2$	Lösung
Halite	$\text{NaCl}$	
Smektit, Ca-Montmorillonit	$(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	
Anhydrit	$\text{CaSO}_4$	Ausfällung
Baryt	$\text{BaSO}_4$	Ausfällung
Muskovit	$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Lösung
Glaukonit	$(\text{K,Na})(\text{Fe}^{3+}, \text{Al,Mg})_2[(\text{OH})_{21}(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}]$	Lösung
Illit	$\text{K}_{0,7}(\text{Al,Mg,Fe})_2[(\text{OH})_2   (\text{Al,Si})\text{Si}_3\text{O}_{10}]$	
Kaolinit	$\text{Al}_2\text{SiO}_5(\text{OH})_4$	
Chlorit	$(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg,Al})_6(\text{Si, Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	Lösung
Kalifeldspat	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8$	Lösung
Plagioklas (An)	$(\text{Na}_{0,9}, \text{Ca}_{0,1}) \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	Lösung
Albit	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	
Na-Ca Austausch	$\text{Ca}^{2+} + 2\text{NaX} = \text{Na}^+ + \text{CaX}_2$	
$\text{SiO}_2$ (amorph)	$\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Fällung
Quarz	$\text{SiO}_2$	Fällung
Chalcedon	$\text{SiO}_2$	Fällung

Die Sande im Bereich Lüneburg sollten erfahrungsgemäß zu 80 - 99 % aus Quarz, 0 - 5 % Gesteinsbruchstücke/Feldspäte, 0,5 - 5 % Tonminerale, 0 - 5 % Karbonat- bzw. Eisensulfidzement bestehen. Die Karbonate bestehen aus Siderit, in geringeren Mengen tritt Kalzit und noch weniger Dolomit auf. Die Eisensulfide sind meist Markasit.

Es werden für die folgenden Modellierungen alle  $\text{SiO}_2$ -relevanten Minerale berücksichtigt, die in Gesteinsproben des Aquifers Lüneburg zu erwarten sind. Das sind:

- Quarz
- Illit/**Montmorillonit** bzw. entsprechende Wechsellagerungsminerale
- Kaolinit
- Kalifeldspat

Plagioklase und weitere  $\text{SiO}_2$ -relevante Minerale sind nur sehr stark untergeordnet zu erwarten. Es wird davon ausgegangen, dass diese Minerale mit dem Schichtwasser im Gleichgewicht stehen.

Es wird wiederum die entsprechend bearbeitete Wasseranalyse verwendet, da sie am ehesten den originären Zustand des Schichtwassers widerspiegelt. Zusätzlich werden fehlende Spurenelemente etc. auf Basis späterer Wasseranalysen ergänzt, um ein umfassendes Bild des Lösungsverhaltens zu erhalten.

Als Eingabedatei für eine Modellierung in PHREEQE wurde folgende verwendet:

```
# Title_Lueneburg Speicher Modell
SOLUTION 1
  temp      25
  pH        6.00
  pe        0.28
  redox     pe
  units     mg/kgw
  density   1.0548
  Na        25000
  K         1100
  Mg        750
  Ca        1900
  Sr        30
  Ba        0.1
  N(-3)     40
  Fe        2
  Mn        0.02
  Al        0.01
  Cu        0.005
  Zn        0.02
  Cd        0.002
  Pb        0.01
  Cl        45000
  S(6)      150
  C(+4)     100# HCO3- 100+ 0 [CO2]
  N(5)      0.1 # <0.1
  B         1
  Si        5
  -water   1 # kg

EQUILIBRIUM_PHASES 1
  Anorthite 0 10
  Albite    0 10
  Ca-Montmorillonite 0 10
  Illite    0 10
  K-feldspar 0 10
  Kaolinite 0 10
  Quartz    0 10
  REACTION_TEMPERATURE 1
  20 110 in 10 steps

END
```

Dabei wurden die Gleichgewichtsphasen variiert. Ein erster Modellierungslauf wurde so ohne Anorthit vorgenommen, ein weiterer zusätzlich mit Albit etc.

Im Ergebnis kann postuliert werden, dass es u. a. auch durch die Erwärmung des Schichtwassers zur einer zunehmenden Auflösung von Illite (Abbildung 2-9) kommt.

Smektite (Montmorillonit, Abbildung 2-10) bzw. entsprechende Wechsellagerungsminerale weisen generell eine höhere Löslichkeit auf, die sich allerdings mit der Temperaturerhöhung nicht relevant ändert. Das Löslichkeitsverhalten von Kalifeldspat ändert sich ebenfalls nicht wesentlich. Kalifeldspäte neigen aber generell zur Alteration. Die Löslichkeit von Illit verdoppelt allerdings bei einer Erhöhung der Temperatur von ca. 50 °C auf 80 °C, von 25 °C auf 90 °C steigt die Löslichkeit nahezu um den Faktor 10. Für den relevanten Tiefenbereich von entscheidender Bedeutung sind vor allem die Smektite (Montmorillonit). Die Modellierung zeigt hier, dass die Löslichkeit bei Temperaturerhöhung erst sinkt, ab ca. 70 °C langsam wieder ansteigt, ohne den Ausgangswert bei ca. 25 °C zu erreichen (Abbildung 2-10).

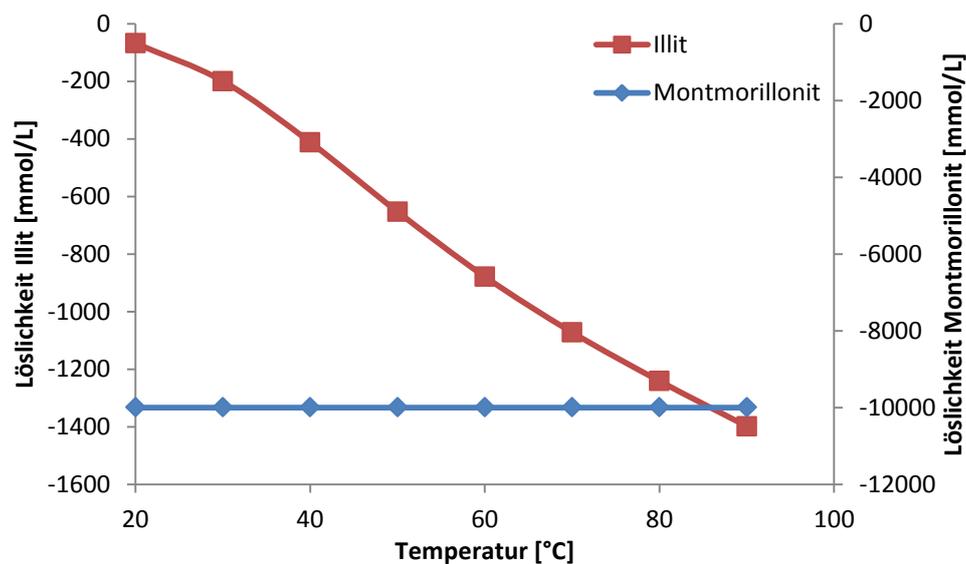


Abbildung 2-9: Änderung des Löslichkeitsverhaltens relevanter Minerale im Aquifer Lüneburg bei Temperaturerhöhung

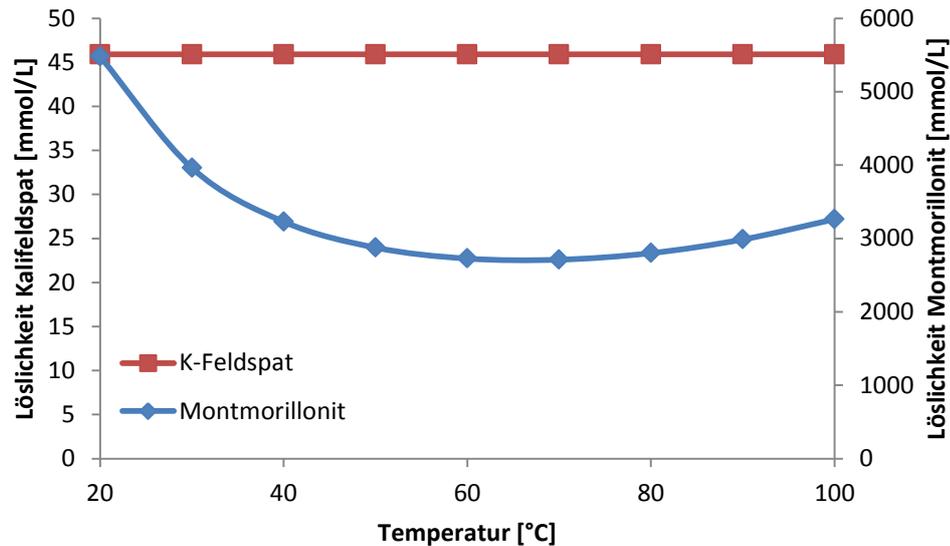


Abbildung 2-10: Änderung des Löslichkeitsverhaltens von Kalifeldspat und Ca-Montmorillonit ohne Berücksichtigung von Plagioklas (Anorthit, Albit) im Aquifer Lüneburg bei Temperaturerhöhung

Illite und Smektite sind dabei Schichtsilikate, wobei die einzelnen Schichten aus einer Aluminium(Al)-Oktaeder-Schicht und zwei umgebenden Silikat (Si)-Tetraederschichten bestehen. In den Zwischenschichten sorgen besonders Kalium, aber auch Aluminium, Eisen, Magnesium und in geringen Mengen weitere Spurenelemente für den Ladungsausgleich. Der Schichtabstand kann bis zu 2 nm betragen. Smektite haben dabei eine spezifische Oberfläche von 600 - 800 m<sup>2</sup>/g; die Ionenaustauschkapazität beträgt 70 - 130 meq/100 g. Weitere Spurenelemente sind häufig adsorptiv an die Tone gebunden. Die temperaturinduzierte Auflösung der Tonminerale sorgt somit für eine Freisetzung von

- Si, Al,
- Fe, Mg, K, Ca und
- weiteren Spurenelementen (Schwermetalle etc.).

In Arbeiten, welche sich mit Batch-Versuchen von Tonen beschäftigen, wird sehr häufig mit dem Al/Si-Verhältnis gearbeitet (vgl. SCHLABACH 2000).

Entsprechend des geringen Kenntnisstandes am Standort (Fluidzusammensetzung, Gesteinszusammensetzung) konnten die Untersuchungen nur mit großer Unsicherheit durchgeführt werden. Im Zuge der Bohrarbeiten ist der Aquifer entweder zu kernen oder aber in jedem Fall mit tonfreier Spülung zu erschließen. Die Ermittlung der petrographischen Zusammensetzung der Sedimente und der Illitgehalt haben einen entscheidenden Einfluss auf die potenzielle Freisetzung von SiO<sub>2</sub>. Sind die Illit-Gehalte <<1 % und der Quarzanteil relativ hoch (>>90 %), ist eine **Wärmespeicherung bis 90 °C möglich**.

### 2.5.3.3 Diskussion und Zusammenfassung zur max. möglichen Einspeichertemperatur

Im Zuge des geothermischen Speicherbetriebes wird originäres Tiefenwasser im Aquifer auf der warmen Seite erwärmt. Dadurch ändert sich das Mineral-Fluid-Gleichgewicht. Einzelne Minerale können sich dabei lösen und andere wiederum können aus dem salinaren Tiefenwasser ausgefällt werden. Das nun veränderte Grundwasser wird saisonal gefördert, obertägig ausgekühlt und auf der kalten Seite deponiert. Dabei unterliegt das chemisch auf der warmen Seite veränderte Wasser der Abkühlung. Wiederum sind chemische Fällungs- und Lösungsreaktionen möglich.

Um diese Prozesse nachzubilden, wurde auf Basis geochemischer Modellierungen mit PHREEQC das Sättigungsverhalten relevanter Minerale in Abhängigkeit von der Temperatur ermittelt. Am bedeutsamsten sind dabei die Silikate (Quarz, Feldspäte, Tone), welche einen Anteil am Gestein von  $>90\%$  besitzen.

Die temperaturabhängigen Modellierungen zeigen für eine Temperaturerhöhung, dass von den im Aquifer vorhandenen Mineralen lediglich die untersuchten Silikate ( $\text{SiO}_2$ , Quarz, Chalcedon) tendenziell gelöst werden. Ausgefällt werden hingegen tendenziell und wenn, dann nur in sehr geringem Umfang, Karbonate (Calcit, Aragonit) und Anhydrit.

Wird nun das so veränderte Wasser im Speicherbetrieb wieder abgefördert, obertägig ausgekühlt und auf der kalten Seite injiziert, fallen tendenziell die Silikate und Baryt aus, die Karbonate werden gelöst (in geringem Umfang im Sandsteinzement enthalten).

Als kritisch anzusehen ist vor allem die Problematik der Ausfällung von  $\text{SiO}_2$ -Mineralen. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass der detritische Quarz selber (80 – 99 % Anteil am Gestein) keine nennenswerte  $\text{SiO}_2$ -Quelle darstellt. Als  $\text{SiO}_2$ -Quellen sind insbesondere die Tone (überwiegend Smektit/Montmorillonit) und die Feldspäte (überwiegend Kalifeldspäte) zu nennen. Untergeordnet (besonders in Wechsellagerungsmineralen) sind Illite zu erwarten.

Modellierungen haben ergeben, dass die Löslichkeit des untergeordnet vorkommenden Illits stetig steigt. Die Feldspäte zeigen kaum Änderungen im Lösungsverhalten und die Monmorillonite sind ebenfalls unkritisch, da sich die Löslichkeit bei Temperaturänderung nicht relevant ändert.

Um die  $\text{SiO}_2$ -Lösung (warme Seite) und die Ausfällung von  $\text{SiO}_2$ -Mineralen (kalte Seite) gering zu halten, wird empfohlen, die **maximale Einspeichertemperatur  $\leq 90\text{ °C}$**  zu wählen. Es wird zudem weiter empfohlen, diese Untersuchungen auf Basis der vor Ort gewonnenen Feststoffe und Fluide (während des Bohrens und Testens der Bohrung) zu wiederholen, um eine abschließende Sicherheit zu erlangen.

Erste Erfahrungen zu einem Tiefenspeicher existieren aus der Geothermieanlage Neubrandenburg. Dort ist der Aquifer allerdings 1250 m tief, originär 54 °C warm, die Salinität beträgt ca. 130 g/l, die Sandsteine sind allerdings deutlich reicher an Tonen und Feldspäten. Der Speicherbetrieb läuft dort reibungslos seit 4 Jahren (Injektionstemperatur bis 90 °C). Das begleitende Monitoring zeigt keine nachhaltigen Schädigungen oder Veränderungen der Wässer und Betriebsparameter an.

---

### **3 Wärmebedarf und Heiznetzverhalten**

Im Rahmen der Studie werden zwei Varianten des zukünftigen Verhaltens der in das Fernwärmenetz integrierten Abnehmer betrachtet.

- **Variante 1:**
  - gegenüber dem aktuellen Betrieb unverändertes Verhalten des Uni-Campus und des Wohngebietes Bockelsberg;
  - zusätzlicher Anschluss des neuen Zentralgebäudes über eine separate Trasse aus dem Heizhaus.
- **Variante 2:**
  - gegenüber dem aktuellen Betrieb unverändertes Verhalten des Wohngebietes Bockelsberg;
  - für den Uni-Campus wird mit einem 25 %-Abschlag auf alle thermischen Leistungen, dem Wegfall der sommerlichen Warmwasserbereitung und mit einer Absenkung der Rücklauftemperaturen um pauschal 10 K gerechnet;
  - zusätzlicher Anschluss des neuen Zentralgebäudes über eine separate Trasse aus dem Heizhaus.

#### **3.1 Variante 1 - Aktueller Status**

##### **3.1.1 Wärmebedarf**

Basis aller folgenden Berechnungen sind die im Monatsraster durch den Wärmeversorger EON Avacon übergebenen Wärmeverkaufszahlen frei Heizhaus der Jahre 2008 bis 2012. Die folgenden Tabellen und Diagramme differenzieren die Wärmemengen nach Uni-Campus und Wohngebiet Bockelsberg.

---

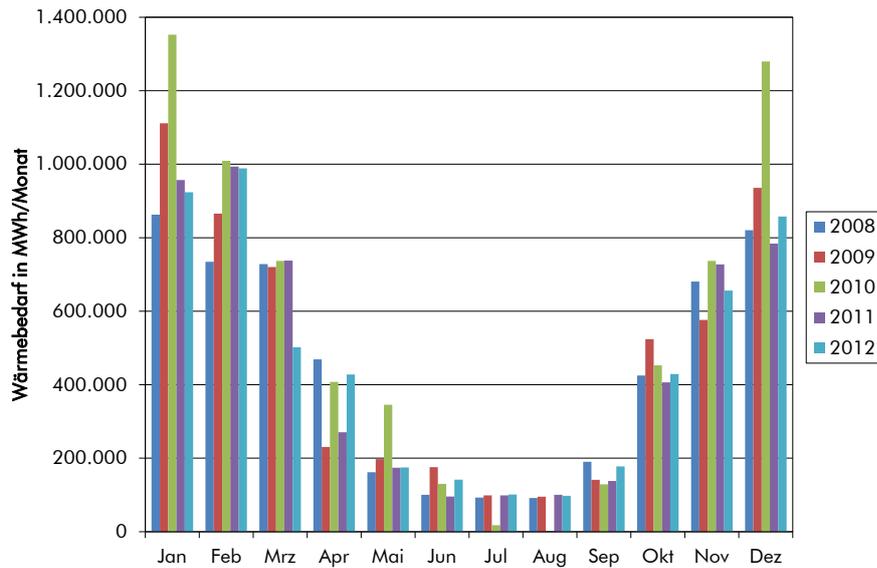


Abbildung 3-1: Wärmelieferungen an den Uni-Campus

Tabelle 3-1: Wärmelieferungen an den Uni-Campus

	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>
<b>Jan</b>	829.050	1.021.990	1.138.060	841.080	796.640
<b>Feb</b>	750.340	838.590	894.070	832.940	880.900
<b>Mrz</b>	726.480	721.570	686.950	664.580	477.530
<b>Apr</b>	540.990	326.060	437.250	329.960	395.820
<b>Mai</b>	281.920	292.030	394.480	239.470	229.370
<b>Jun</b>	217.830	262.360	221.230	172.380	198.660
<b>Jul</b>	216.620	207.040	177.010	172.970	183.190
<b>Aug</b>	305.880	202.200	216.000	172.590	159.170
<b>Sep</b>	293.980	229.860	278.990	193.700	223.620
<b>Okt</b>	963.810	552.520	501.300	365.590	421.680
<b>Nov</b>	698.040	582.330	690.000	649.830	643.670
<b>Dez</b>	887.630	934.280	1.089.760	700.030	868.950
<b>Summe</b>	6.712.570	6.170.830	6.725.100	5.335.120	5.479.200

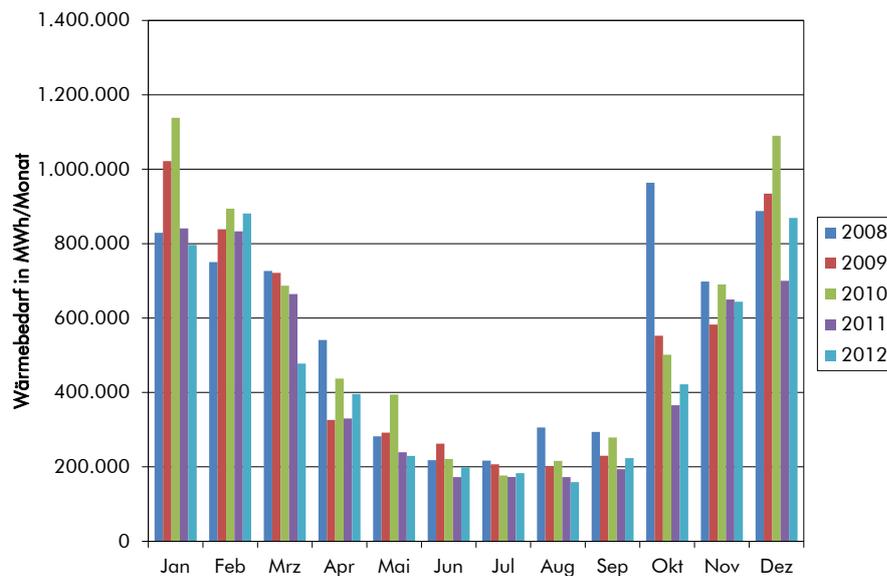


Abbildung 3-2: Wärmelieferungen an das Wohngebiet Bockelsberg

Tabelle 3-2: Wärmelieferungen an das Wohngebiet Bockelsberg

	2008	2009	2010	2011	2012
<b>Jan</b>	829.050	1.021.990	1.138.060	841.080	796.640
<b>Feb</b>	750.340	838.590	894.070	832.940	880.900
<b>Mrz</b>	726.480	721.570	686.950	664.580	477.530
<b>Apr</b>	540.990	326.060	437.250	329.960	395.820
<b>Mai</b>	281.920	292.030	394.480	239.470	229.370
<b>Jun</b>	217.830	262.360	221.230	172.380	198.660
<b>Jul</b>	216.620	207.040	177.010	172.970	183.190
<b>Aug</b>	305.880	202.200	216.000	172.590	159.170
<b>Sep</b>	293.980	229.860	278.990	193.700	223.620
<b>Okt</b>	963.810	552.520	501.300	365.590	421.680
<b>Nov</b>	698.040	582.330	690.000	649.830	643.670
<b>Dez</b>	887.630	934.280	1.089.760	700.030	868.950
<b>Summe</b>	6.712.570	6.170.830	6.725.100	5.335.120	5.479.200

Werden vorgenannte Bedarfszahlen (unter Berücksichtigung eines einheitlichen mittleren Bedarfes für die Warmwasserbereitung) über den Vergleich der jährlichen mit der mittleren Gradtagszahl korrigiert, ergibt sich auf Basis der Jahre 2010 bis 2012:

- **Uni-Campus** **5.880 MWh/a**
- **Wohngebiet Bockelsberg** **5.843 MWh/a**

Für die Definition der jährlichen Bedarfscharakteristiken, d. h. die Verteilung des jährlichen Gesamtbedarfes auf die einzelnen Stunden des Jahres, standen Messwerte des Jahres 2012 von EO Avacon zur Verfügung, denen auch Außentemperaturen zugeordnet werden konnten.

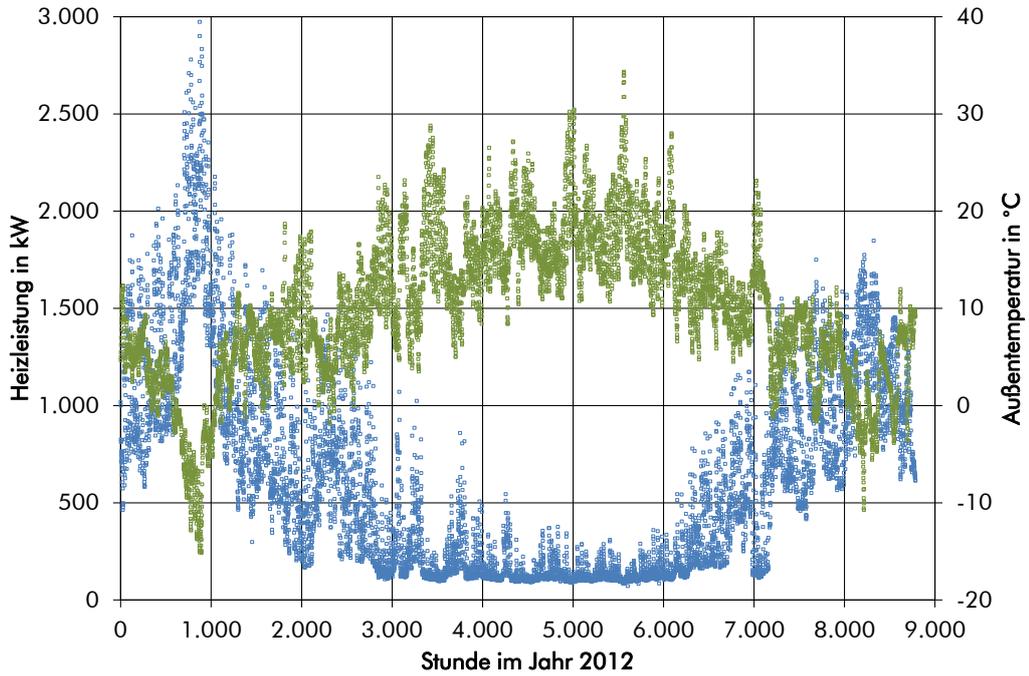


Abbildung 3-3: Lastgang (Erzeugung) des Uni-Campus für 2012

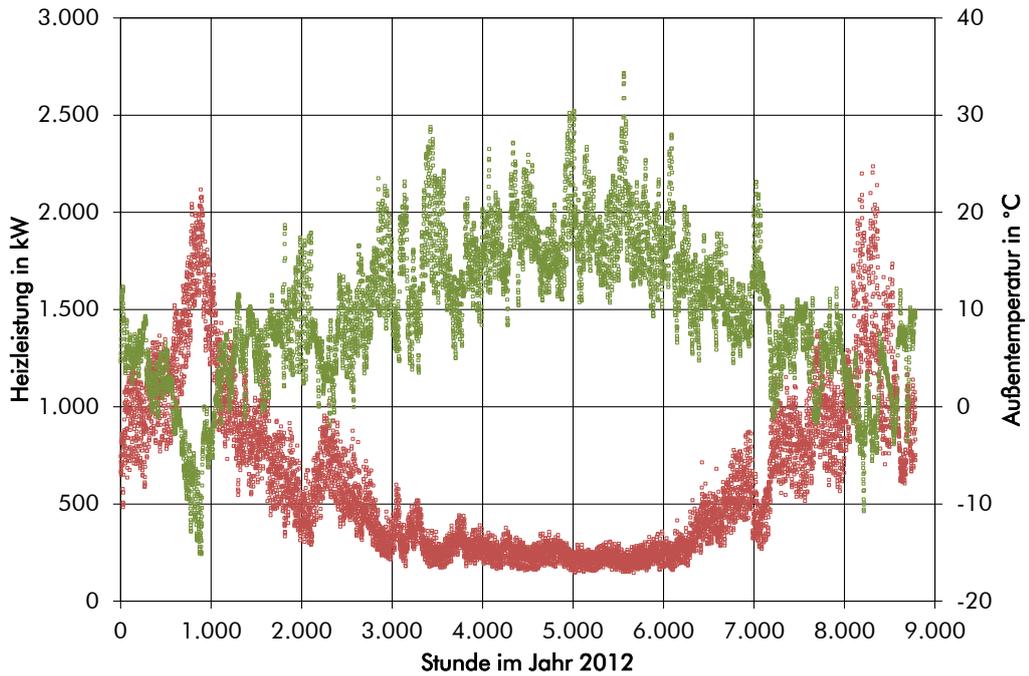


Abbildung 3-4: Lastgang (Erzeugung) des Wohngebietes Bockelsberg für 2012

Wie kann aus diesen spezifischen Kurven des Jahres 2012 auf das Lastverhalten eines typischen Jahres geschlussfolgert werden. Dazu wurden zwei Verfahren angewendet und für das bekannte Jahr 2012 verglichen.

- Ableitung einer polynomischen Ausgleichsfunktion Heizlast = f (Außentemperatur) und deren Anwendung auf das Außentemperaturverhalten
- Anwendung des Verfahrens zur Abwicklung von Standardlastprofilen, veröffentlicht in den Praxisinformationen P2006/8 und P2007/13 des Bundesverbandes der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft. Dabei dient ein sog. Kundenwert zur Ermittlung des Tagesbedarfes für einen Tag mit einer mittleren Außentemperatur. Verschiedene Lastprofilparameter machen diesen abhängig vom Gebäudetyp, der Baualtersklasse sowie der Klimaregion. Durch Gewichtung der Tageszeit mittels eines Stundenfaktors (abhängig wiederum von Baualtersklasse, Tagesmitteltemperatur, Tageszeit) ergibt sich der stündliche Bedarf.

Folgende Abbildungen zeigen die Ergebnisse des Vergleichs der Verfahren.

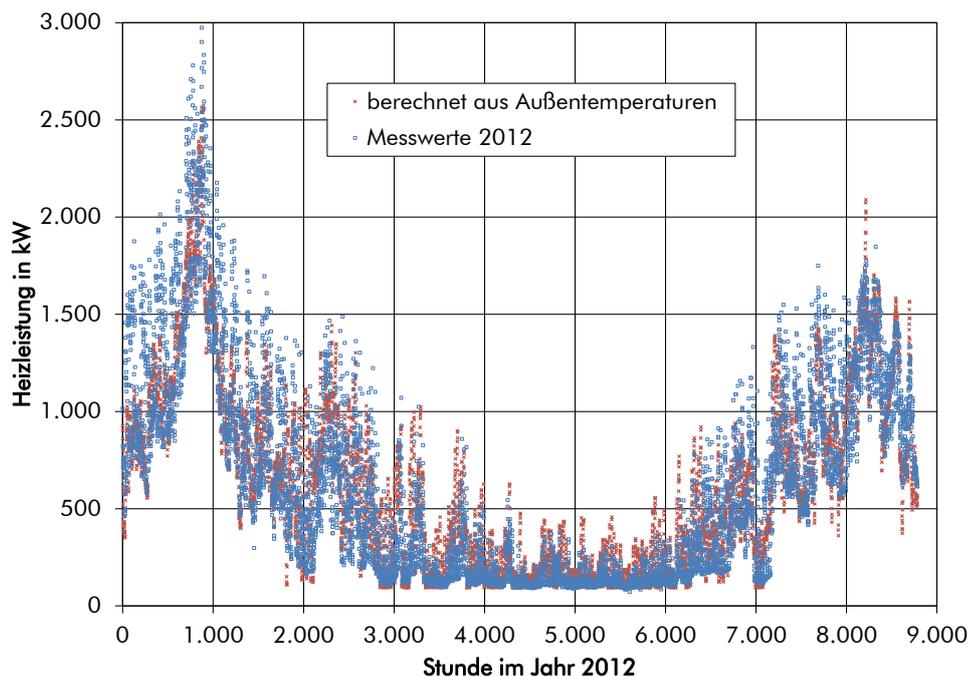


Abbildung 3-5: Uni-Campus 2012, Vergleich des realen Lastverhaltens mit dem berechneten Verhalten (polynomische Ausgleichsfunktion Heizlast = f (Außentemperatur))

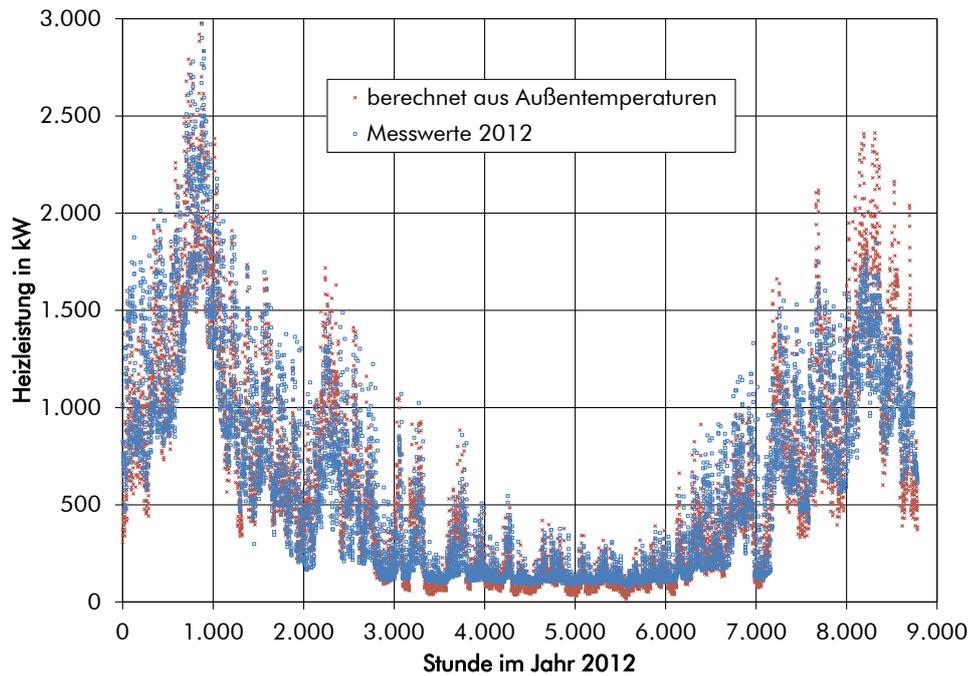


Abbildung 3-6: Uni-Campus 2012, Vergleich des realen Lastverhaltens mit dem berechneten Verhalten (Standardlastprofile)

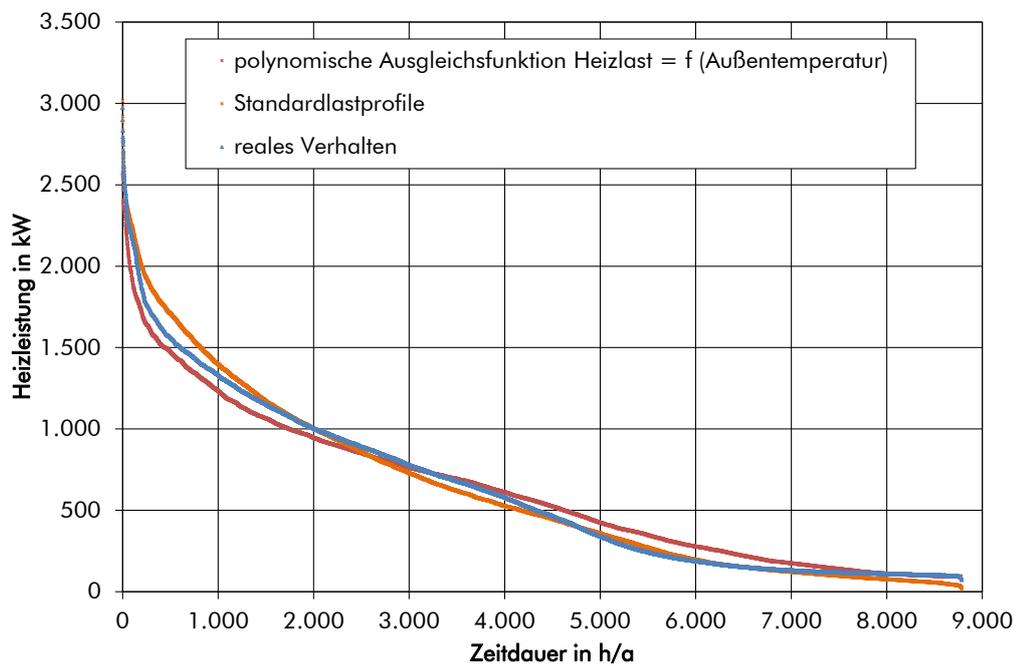


Abbildung 3-7: Uni-Campus 2012, Vergleich der geordneten Jahresdauerlinien

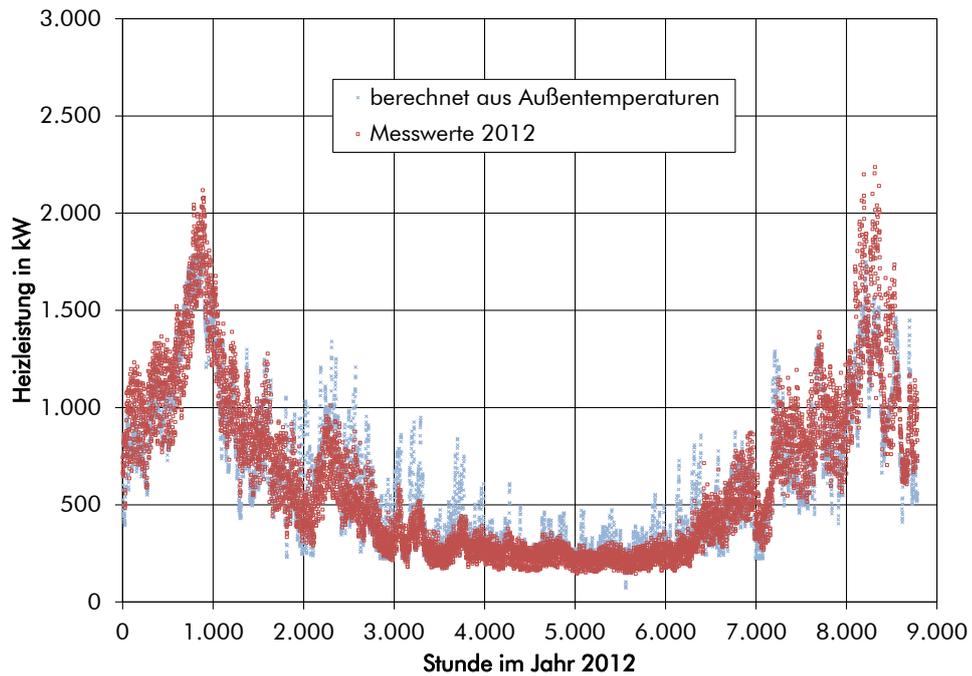


Abbildung 3-8: Wohngebiet Bockelsberg 2012, Vergleich des realen Lastverhaltens mit dem berechneten Verhalten (polynomische Ausgleichsfunktion Heizlast = f (Außentemperatur))

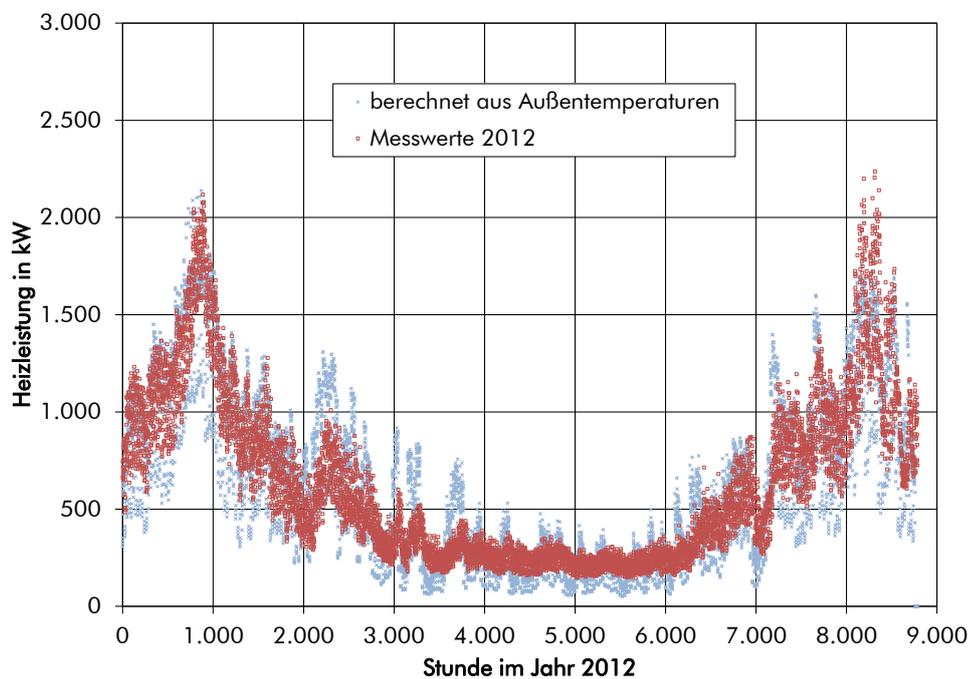


Abbildung 3-9: Wohngebiet Bockelsberg 2012, Vergleich des realen Lastverhaltens mit dem berechneten Verhalten (Standardlastprofile)

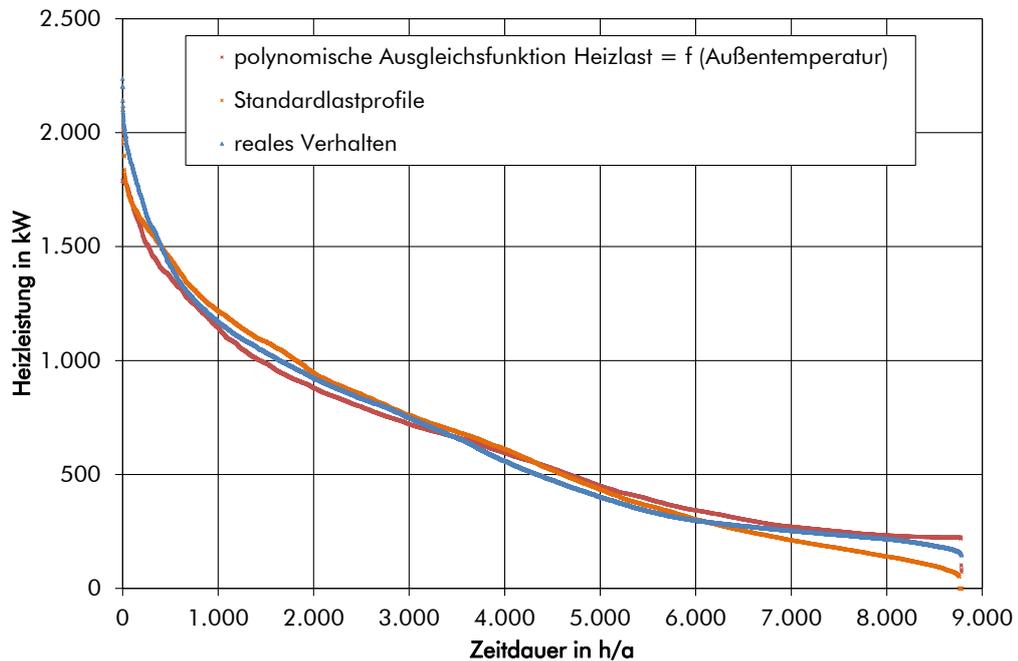


Abbildung 3-10: Wohngebiet Bockelsberg 2012, Vergleich der geordneten Jahresdauerlinien

Beide Verfahren spiegeln sowohl für den Uni-Campus als auch für das Wohngebiet Bockelsberg das reale Lastverhalten des Jahres 2012 qualitativ ansprechend wider. Dies wird auch in den geordneten Jahresdauerlinien in Abbildung 3-7 deutlich.

Augenscheinlich, vor allem beim Wohngebiet, passt der Polynomansatz etwas besser, jedoch liegt das Bestimmtheitsmaß (Quadrat des Pearson'schen Korrelationskoeffizienten) in allen Fällen im Bereich von 0,79 bis 0,82. Aus diesem Grund wird der einfacher zu handhabende Polynomansatz weiterverwendet.

Mit der Temperaturverteilung eines Typjahres (vgl. EPA, 2011) wurde dann das im langjährigen Mittel relevante Verhalten der beiden Teilnetze ermittelt. Darauf folgte eine geringfügige Anpassung mit einem über das Jahr einheitlichen Faktor an die weiter oben definierten Jahresbedarfszahlen. Die folgenden Abbildungen spiegeln die Ergebnisse wider.

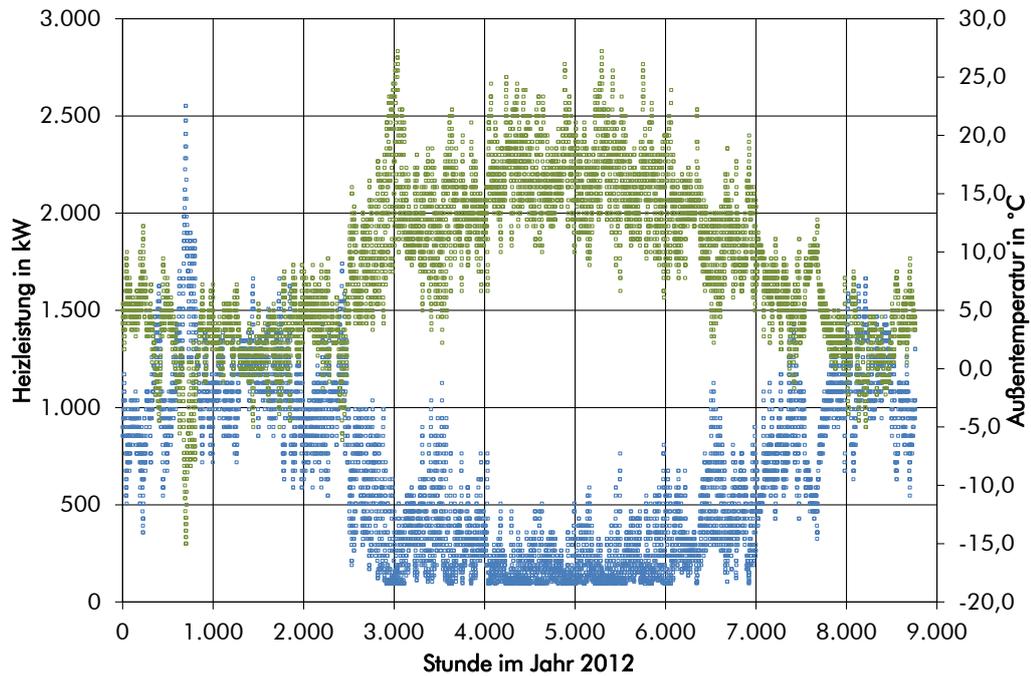


Abbildung 3-11: Lastgang (Erzeugung) des Uni-Campus in einem Typjahr, Temperaturverteilung nach EPA, 2011

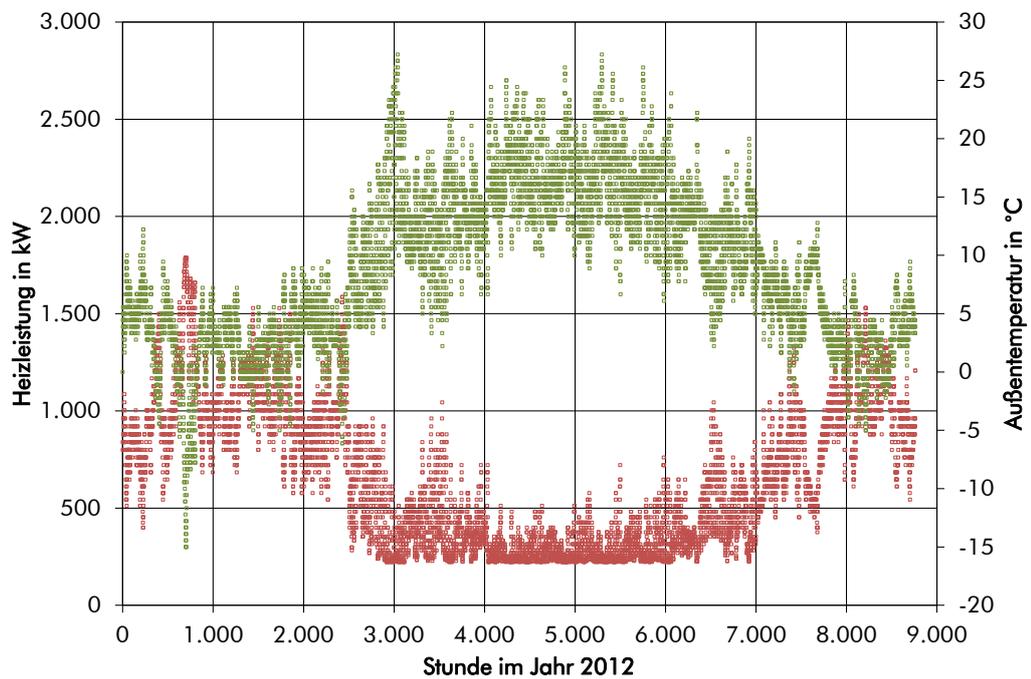


Abbildung 3-12: Lastgang (Erzeugung) des Wohngebietes Bockelsberg in einem Typjahr, Temperaturverteilung nach EPA, 2011

Neben den beiden großen Fernwärmeteilnetzen ist in das System auch das neu errichtete Zentralgebäude zu integrieren. Die in Abbildung 3-13 dargestellte Bedarfskurve wurde aus einer Modellierung des Heizlastverhaltens (612 MWh/a, EPA, 2011) übernommen und um einen jährlichen Wärme-

bedarf von 150 MWh für die Warmwasserbereitung in den Tagesstunden zwischen 8:00 und 18:00 Uhr ergänzt.

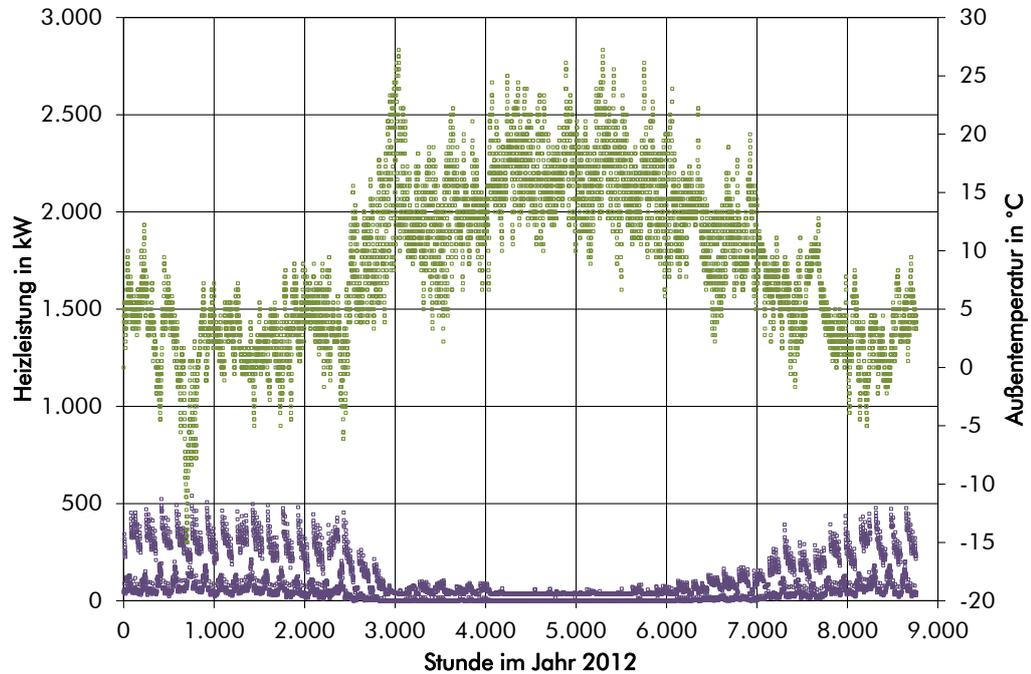


Abbildung 3-13: Lastgang (Erzeugung) des Zentralgebäudes in einem Typjahr, EPA, 2011

Letztendlich ergibt sich die folgende Gesamtbedarfskurve, die den weiteren Modellierungen und energetischen Berechnungen der sog. „Variante 1“ zugrunde liegen. Es wird dabei unterstellt, dass bei den Abnehmern auch zukünftig entweder keine Maßnahmen ergriffen werden, die zu einem Absinken des Wärmebedarfes führen, bzw., dass zukünftige Energieeinsparungen durch Anschluss von Abnehmern in der gleichen Größenordnung kompensiert werden.

### Wärmeerzeugung für Variante 1:

- Uni-Campus 5.880 MWh/a
- Wohngebiet Bockelsberg 5.843 MWh/a
- Zentralgebäude 762 MWh/a
- Summe 12.485 MWh/a**

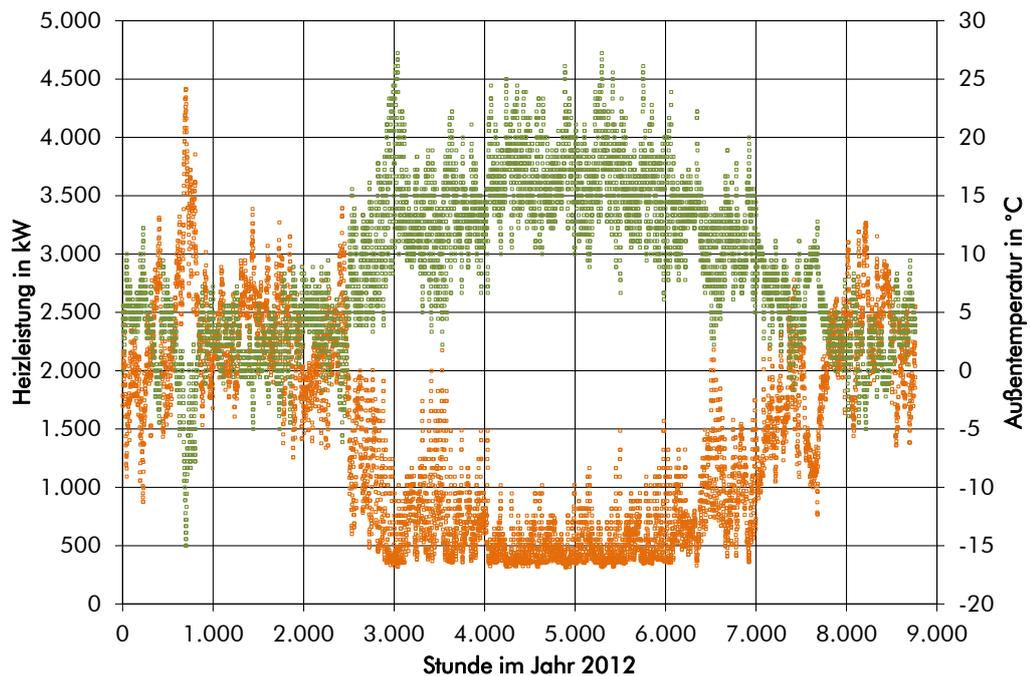


Abbildung 3-14: Lastgang (Erzeugung) in einem Typjahr bei unverändertem Abnehmerverhalten und Integration des neuen Zentralgebäudes, d. h. Variante 1

### 3.1.2 Heiznetztemperaturen

Für die Definition des Verhaltens der Vor- und Rücklauftemperaturen in den beiden Teilnetzen Uni-Campus und Wohngebiet Bockelsberg des Fernwärmesystems standen Messwerte des Jahres 2012 von EON Avacon zur Verfügung, denen auch Außentemperaturen zugeordnet werden konnten (vgl. Abbildung 3-15). Mit den Messwerten wurden Ausgleichsfunktionen Heiznetztemperatur =  $f$  (Außentemperatur) gebildet, die in Abbildung 3-16 und Abbildung 3-17 dargestellt sind.

Mit der Temperaturverteilung eines Typjahres (vgl. EPA, 2011) wurde dann das im langjährigen Mittel relevante Verhalten der Netztemperaturen der beiden Teilnetze ermittelt. Dies ist in Abbildung 3-18 präsentiert. Abbildung 3-18 enthält darüber hinaus noch die für das Zentralgebäude relevanten Temperaturen. Für das Gebäude wird eine separate Fernwärmetrasse errichtet, die auf 58 °C Vorlauf ausgelegt ist. Intern gibt es zwei Temperaturniveaus (55 °C/35 °C und 35 °C/25 °C). Da das Niedertemperaturniveau deutlich überwiegt, werden die Netze in Reihe geschaltet. Nach außen ist dann mit einer Rücklauftemperatur von 25 °C zu rechnen.

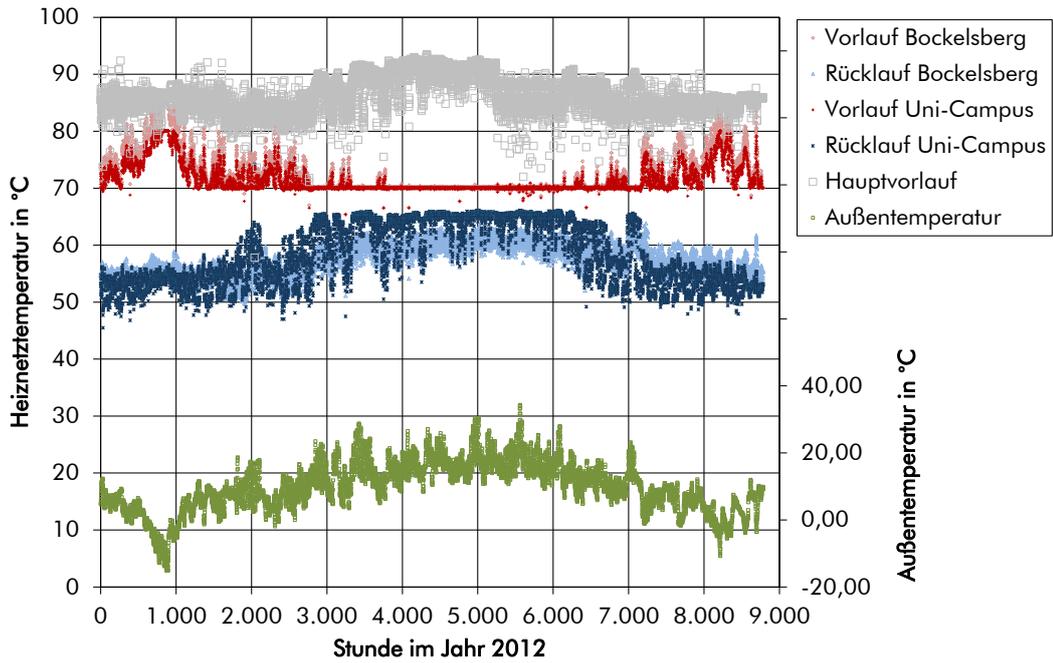


Abbildung 3-15: Messwerte der Heiznetzvor- und Rücklauftemperaturen für 2012

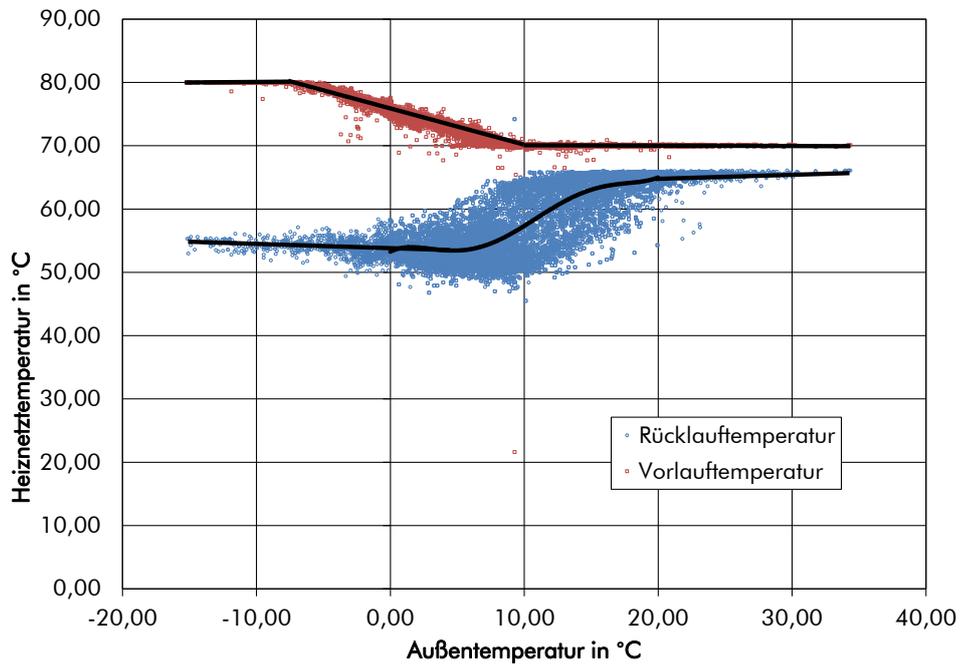


Abbildung 3-16: Außentemperaturabhängigkeit der Heiznetztemperaturen für den Uni-Campus im Jahr 2012

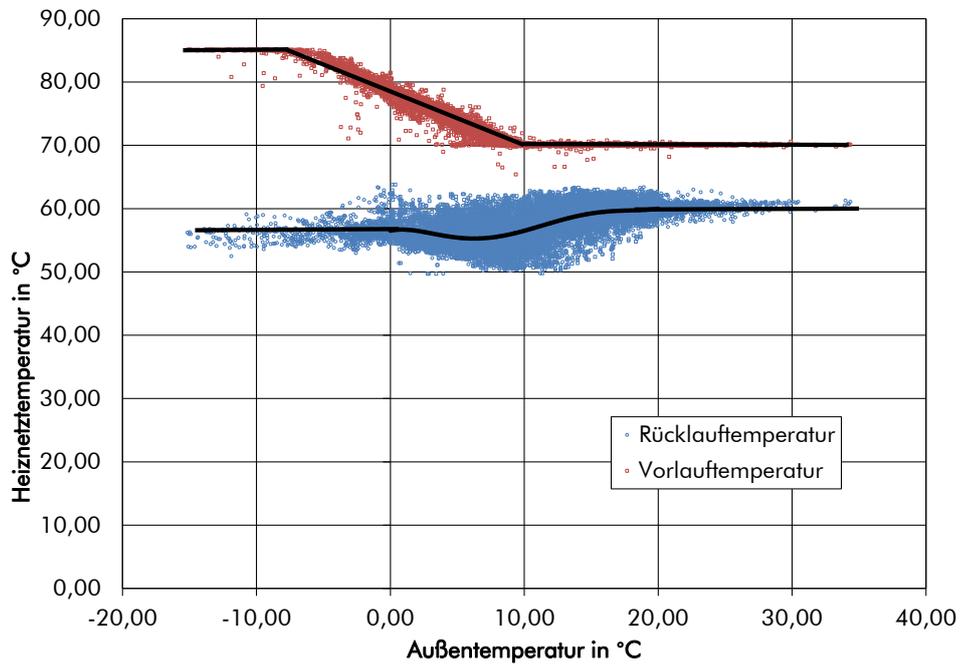


Abbildung 3-17: Außentemperaturabhängigkeit der Heiznetztemperaturen für das Wohngebiet Bockelsberg im Jahr 2012

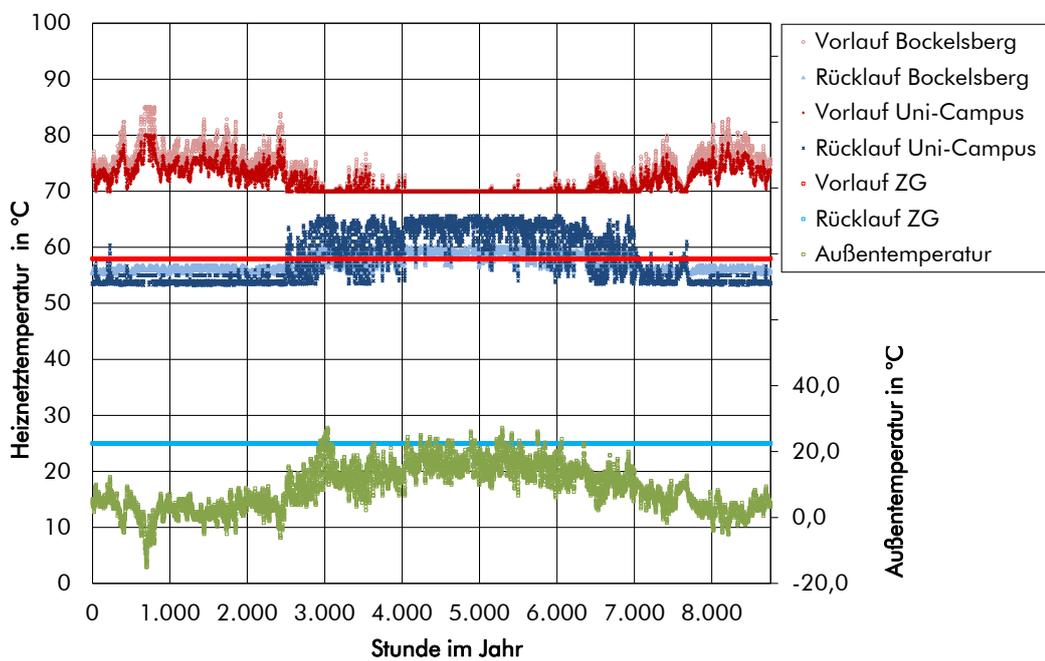


Abbildung 3-18: Temperaturverhalten der Heiznetze im langjährigen Mittel

### 3.2 Variante 2 – Verbesserung der Energieeffizienz im Heizsystem für den Uni-Campus

#### 3.2.1 Wärmebedarf

Im Uni-Campus ist zukünftig beabsichtigt, z. B. durch ein Einspar-Contracting, den Energiebedarf für Heizzwecke und die Warmwasserbereitung deutlich zu senken. Aus diesem Grunde wird hier in dieser Variante ein exemplarisches Lastverhalten definiert, das als Basis dafür dient, die Effekte geringeren Wärmebedarfs, aber auch geringerer Rücklauftemperatur, auf die Sinnhaftigkeit des Einsatzes eines Aquiferwärmespeichers zu ermitteln.

Folgendes wird angenommen:

- 25 %-Abschlag auf alle stündlichen thermischen Leistungen, die in das Teilnetz Uni-Campus eingespeist werden müssen
- Wegfall der sommerlichen Warmwasserbereitung (Juni bis August)

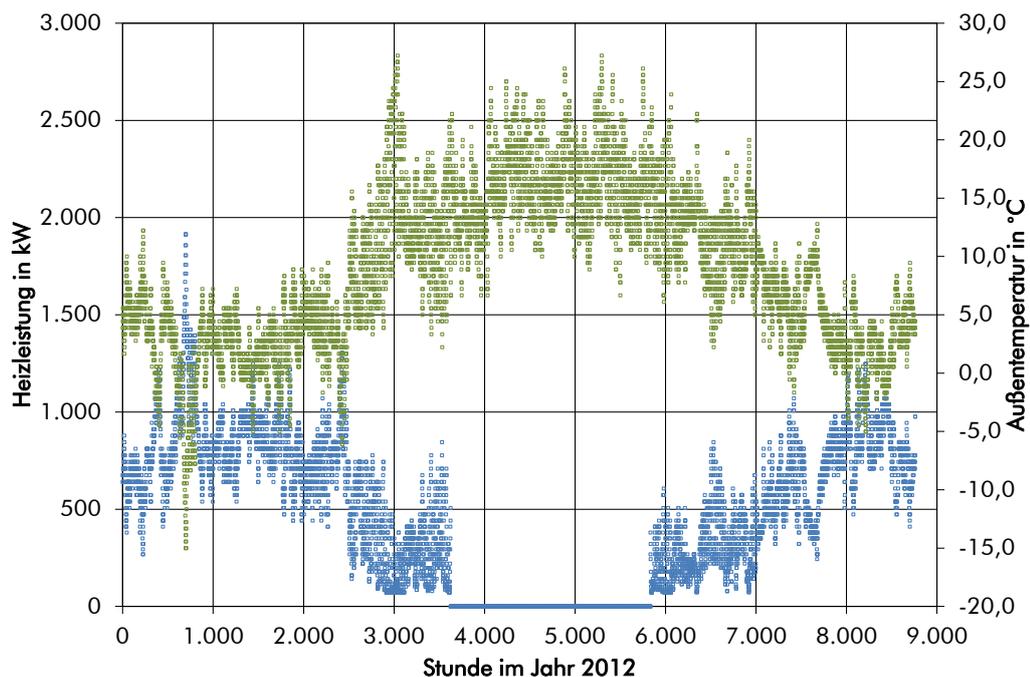


Abbildung 3-19: Lastgang (Erzeugung) des Uni-Campus in einem Typjahr nach Umsetzung von Maßnahmen zur Effizienzsteigerungen

Mit dem Lastverhalten des Uni-Campus aus Abbildung 3-19 und dem unveränderten Lastverhalten des Wohngebietes Bockelsberg (Abbildung 3-12) und des Zentralgebäudes (Abbildung 3-13) ergibt sich die Bedarfskurve für das Gesamtsystem. Sie ist in Abbildung 3-20 dargestellt. Abbildung 3-21 gibt den Effekt wieder, den die Maßnahmen zur Effizienzsteigerung im Uni-Campus auf das Gesamtsystem haben.

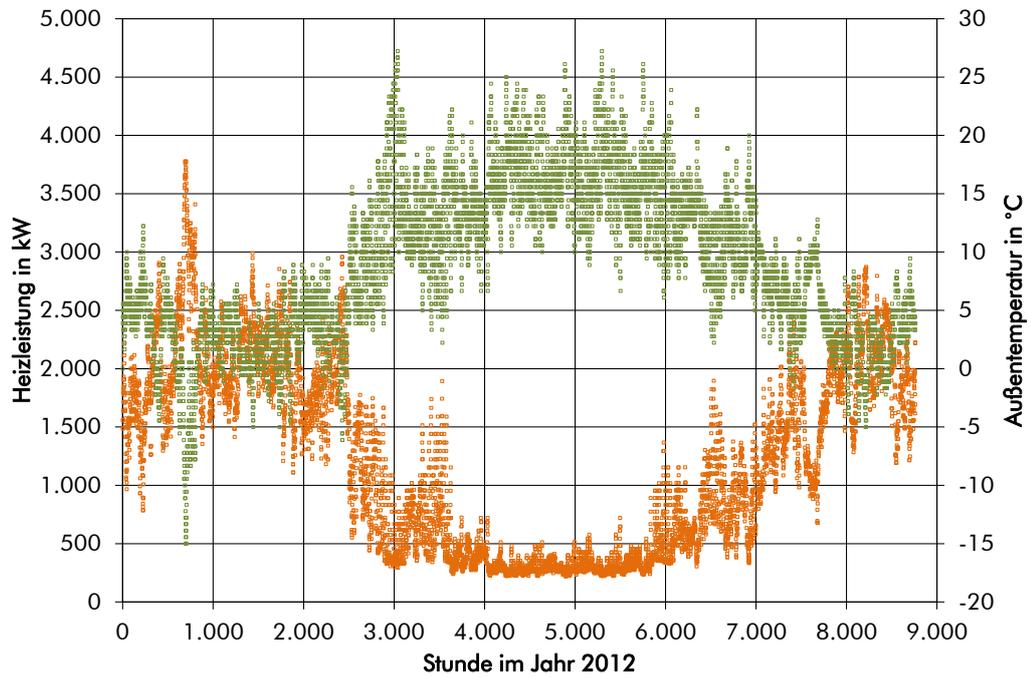


Abbildung 3-20: Lastgang (Erzeugung) in einem Typjahr für Variante 2

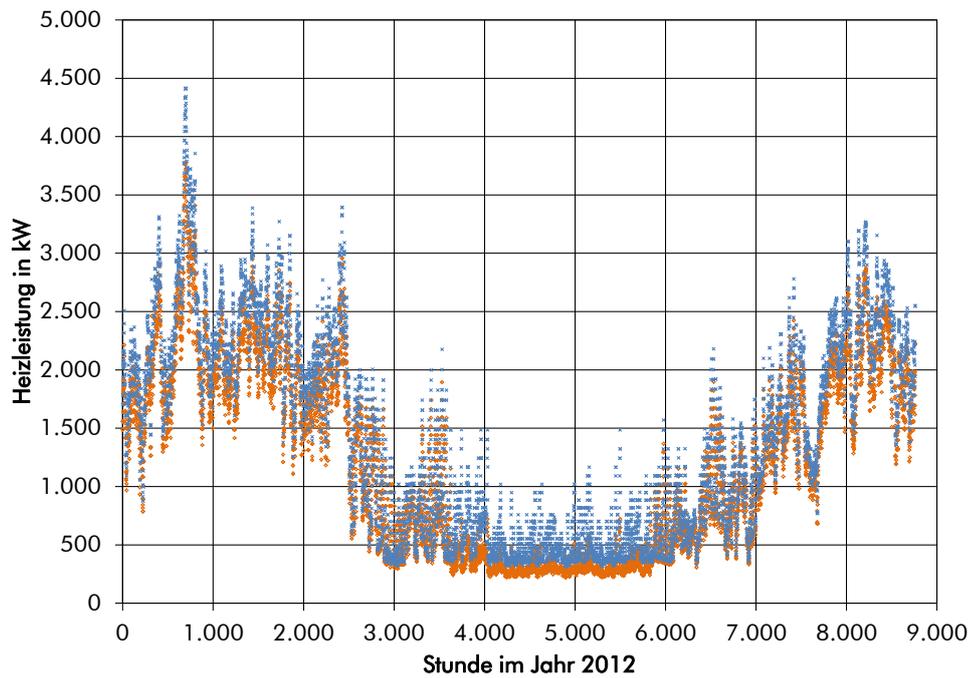


Abbildung 3-21: Energetischer Effekt beim Übergang auf Variante 2

### Wärmeerzeugung für Variante 2:

• Uni-Campus	4.047 MWh/a
• Wohngebiet Bockelsberg	5.843 MWh/a
• Zentralgebäude	762 MWh/a
<b>Summe</b>	<b>10.652 MWh/a</b>

### 3.2.2 Heiznetztemperaturen

Neben den unter 3.2.1 beschriebenen Minderungen des Wärmebedarfs im Uni-Campus sollen die Maßnahmen zur Effizienzsteigerung dort auch zu einem Absinken der Heiznetzrücklauftemperaturen führen. Aus diesem Grunde wird hier in dieser Variante eine um einheitlich 10 K geringere Temperatur definiert.

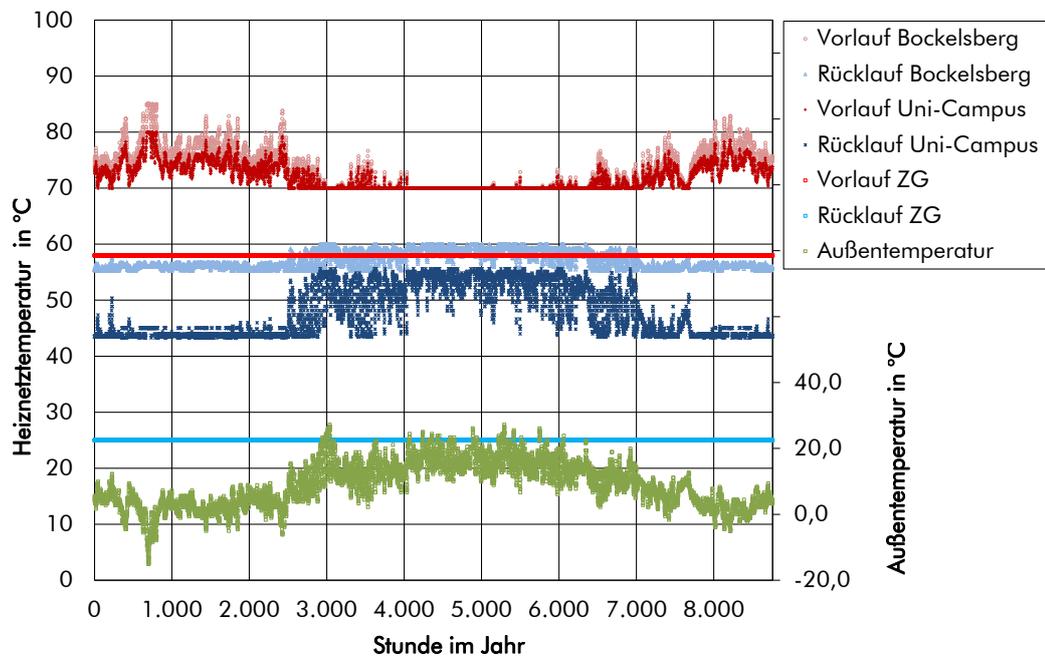


Abbildung 3-22: Temperaturverhalten der Heiznetze im langjährigen Mittel

## **4 Modellierung**

### **4.1 Modellbeschreibung**

Für die Modellierung des thermischen und hydraulischen Zustandes im Speicher wurde ein dreidimensionales numerisches Modell (Aquifermodell) für die Strömung und den Wärmetransport im Speicher auf Basis des Finiten-Elemente-Simulators FEFLOW 6.0 (WASY, 2012) erstellt.

Die Modellentwicklung erfolgte nach folgenden Grundsätzen:

- Es wurde vertikal nur der potenziell thermisch und hydraulisch beeinflusste Bereich modelliert, d. h. das dreidimensionale Modell besteht aus der Aquiferschicht sowie aus angrenzenden Schichten des Hangenden und Liegenden und reicht nicht bis zur Geländeoberkante und zu den Zechsteinschichten.
  - Seitliche Modellrandbedingungen wurden nicht gesetzt. Das Modell wurde so groß gewählt, dass es von außen her keine hydraulischen Einflüsse auf den Bereich der Wärmespeicherung geben kann.
  - Das dreidimensionale Aquifermodell besteht aus 11 Modellschichten mit einer horizontalen Ausdehnung von 12 x 12 km. Davon sind 4 Schichten Aquiferschichten.
  - Die horizontale Diskretisierung ist im Umfeld der beiden Speicherbohrungen verfeinert.
  - Die vertikale Modellauflösung folgt zum einen den Vorgaben des geologischen Modells und zum anderen den numerischen Erfordernissen zur korrekten Berechnung des konduktiven Wärmetransportes in die an die Speicherschicht angrenzenden Stauer.
  - Die Salzstruktur wurde in ihrer 3-dimensionalen Struktur berücksichtigt. Das ist zum einen der Salzstock nördlich des Bohrlokation und zum anderen die Zechstein-Evaporitschicht unterhalb des Speicheraquifers, die im erweiterten Modell bei der thermischen Initialisierung ergänzt wurde (Abbildung 4-4). Sie erscheint als impermeable Zone erhöhter thermischer Leitfähigkeit. Sie hat erheblichen Einfluss auf die Temperaturverteilung im Modellgebiet.
-

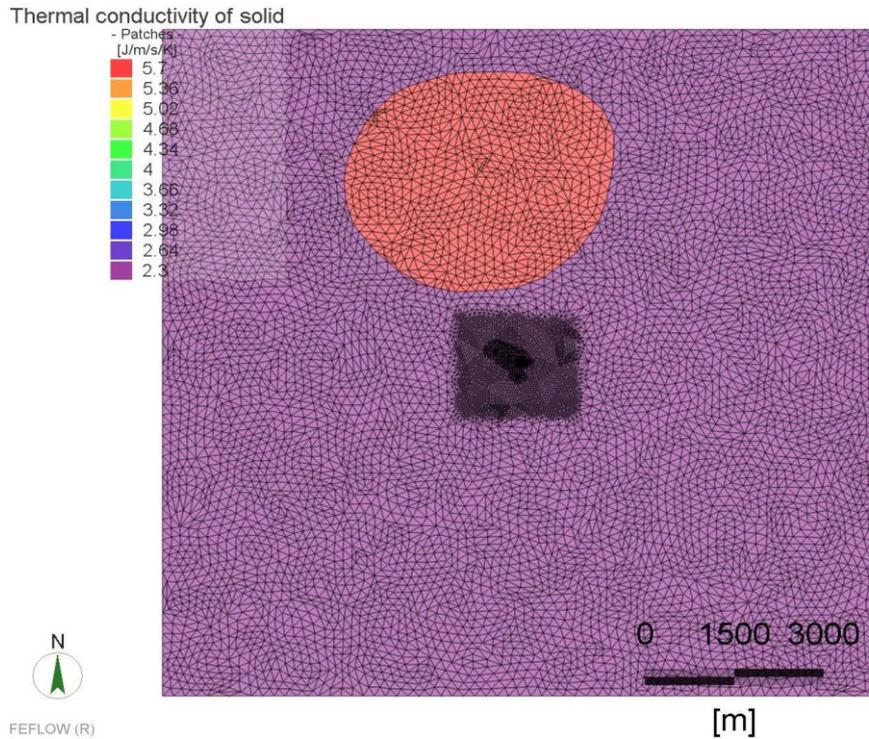


Abbildung 4-1: Horizontale Diskretisierung des Modellgebietes mit Gitterverdichtung an den Bohrungspositionen; farbig: Verteilung der Wärmeleitfähigkeit in der obersten Modellschicht mit erhöhtem Wert (5,7 J/m/K) im Salzstock, Seitenlängen 12 km

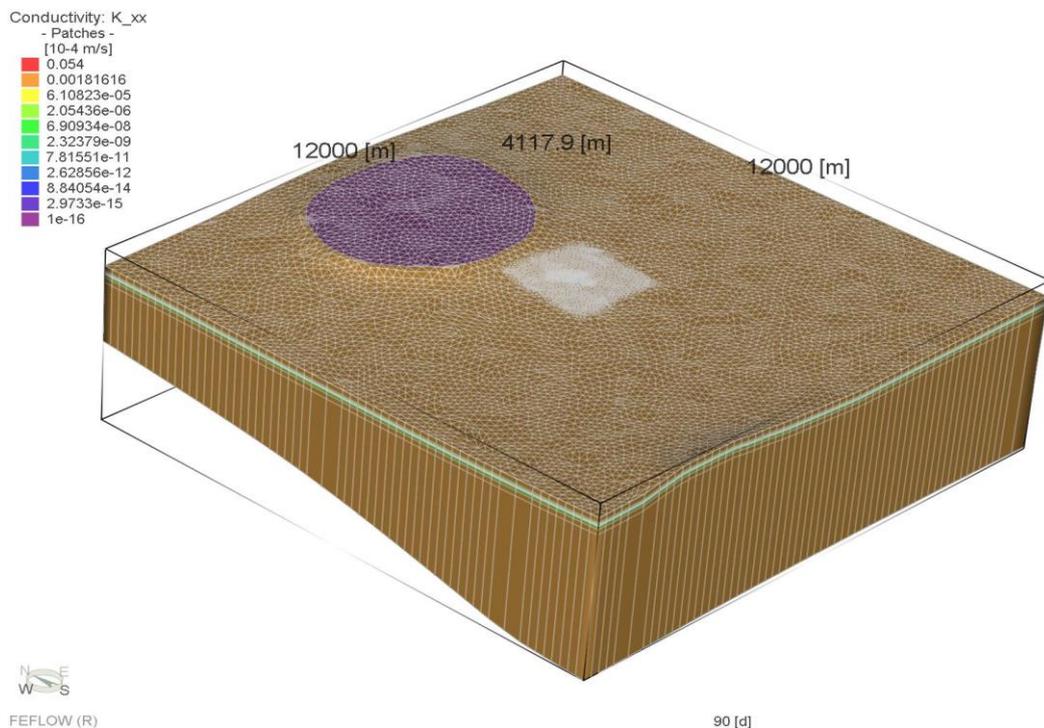


Abbildung 4-2: Modellgebiet mit FE-Gitter und Verteilung der hydraulischen Leitfähigkeit

Der Schichtaufbau und die für die Modellierung des Aquifers verwendeten gesteinsphysikalischen Eigenschaften sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 4-1: Schichtaufbau des dreidimensionalen Modells (Aquifer markiert)

Stratigraphie – Geologisches Modell	Modellschicht	Mächtigkeit – Numerisches Modell	Lithologie/Fazies
Mittelloligozän	1	120	Ton, Schluffe
Obereozän	2	35	Ton, Tonmergel
Obereozän	3	10	Ton, Tonmergel
Obereozän	4	8,75	Feinsandstein, kalkig
	5	8,75	Feinsandstein, kalkig
	6	8,75	Feinsandstein, kalkig
	7	8,75	Feinsandstein, kalkig
Untereozän	8	10	Ton, Tonmergel
Untereozän	9	65	Ton, Tonmergel
Untereozän	10	120	Ton, sandig; Mergel, stark sandig oder Feinsand schluffig
	11	90-3584	GW-Stauer oberhalb Zechstein als untere Begrenzung, Lithologie unbestimmt

Tabelle 4-2: Gesteinsphysikalische Eigenschaften der Modellschichten des Aquifermodells, Aquiferschichten markiert (VOIGT et al. (1985), WAGNER et al. (2005), NORDEN & FÖRSTER (2006), CLAUSER (2006) & VDI-Richtlinie 4640)

Modellschicht	$k_f$ -Wert in $10^{-4}$ m/s	Wärmeleitfähigkeit in $W/(m^*K)$	Wärmekapazität in $10^6$ J/m <sup>3</sup> *K	Porosität
1	$10^{-3}$	2,4	2,0	0,20
2	$10^{-6}$	1,3	2,5	0,01
3	$10^{-6}$	1,3	2,5	0,01
4	0,054	2,3	2,3	0,30
5	0,054	2,3	2,3	0,30
6	0,054	2,3	2,3	0,30
7	0,054	2,3	2,3	0,30
8	$10^{-6}$	1,3	2,5	0,01
9	$10^{-6}$	1,3	2,5	0,01
10	$10^{-3}$	2,4	2,0	0,01
11	$10^{-3}$	2,2	2,0	0,01
Zechsteinsalz	$10^{-16}$	5,7	1,2	0,01

Abbildung 4-3 zeigt in einem Ausschnitt am Standort des Wärmespeichers beispielhaft die Modelldiskretisierung und die Verteilung der Porosität.

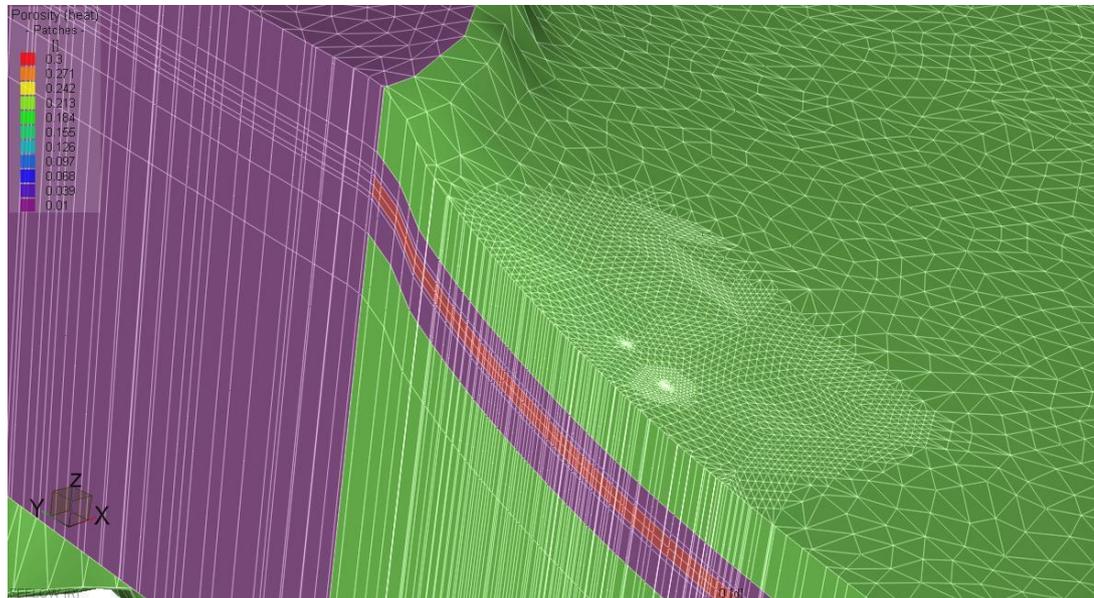


Abbildung 4-3: Horizontales Modellgitter und Modellschichten und Porositätsverteilung im Bereich des Wärmespeichers; rot: Speicheraquifer; lila: Salz und Ton; vertikal überhöht

## 4.2 Thermische Initialisierung

Ziel der Initialisierung war die Belegung des Aquiferbereiches mit der im geologischen Modell prognostizierten Temperatur und die Berücksichtigung des typischerweise großen thermischen Einflusses der benachbarten Salzstrukturen. Für die thermische Initialisierung erfolgte deshalb eine Modelerweiterung nach oben (GOK) und unten (Mesozoikum, Zechstein, Rotliegendes, bis -6.000 m NN). Dadurch konnten definierte Randbedingungen gesetzt werden: Oben eine konstante Oberflächentemperatur und unten eine terrestrische Wärmestromdichte.

Die folgenden Parameter wurden verwendet:

- Modell OK: Geländehöhe 37 m
- Modell UK: - 6.000 m NN
- OF-Temperatur im Jahresmittel: 9 °C
- Wärmeleitfähigkeit Zechstein: 5,7 W/m/K
- Kalibrierziel: Aquifertemperatur 26 °C am Standort
- Kalibrierungsergebnis: untere "Heat flux boundary condition": 80 mW/m<sup>2</sup>; FEFLOW: 6912 J/m<sup>2</sup>/d)

Es wurde überprüft, ob die Temperaturverteilung sensibel auf die Tiefe der unteren Modellgrenze oder Konvektion in Aquiferschichten ist. Das war nicht der Fall und die simulierte stationäre initiale Temperaturverteilung kann im Weiteren als Anfangstemperatur für die Simulationsstudie verwendet werden.

Damit wurde die Beeinflussung der Temperaturverteilung durch die hohe Wärmeleitfähigkeit der Salzstrukturen in der initialen Temperatur erfasst. Das ist in Abbildung 4-4 zu sehen.

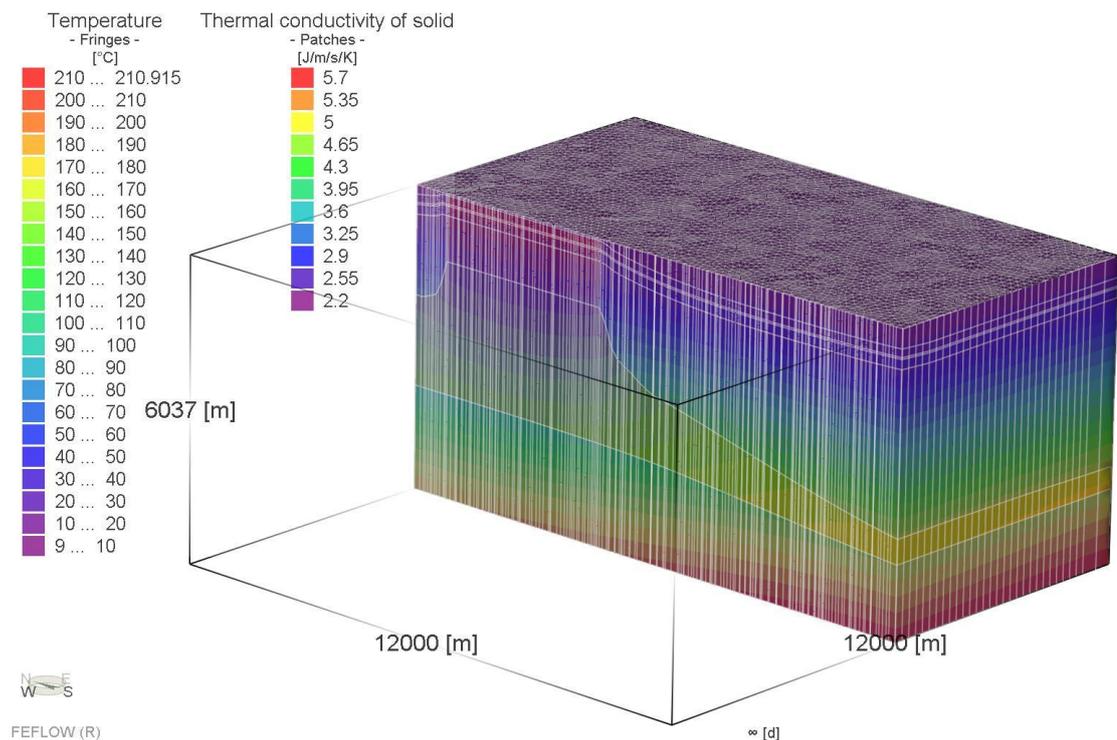
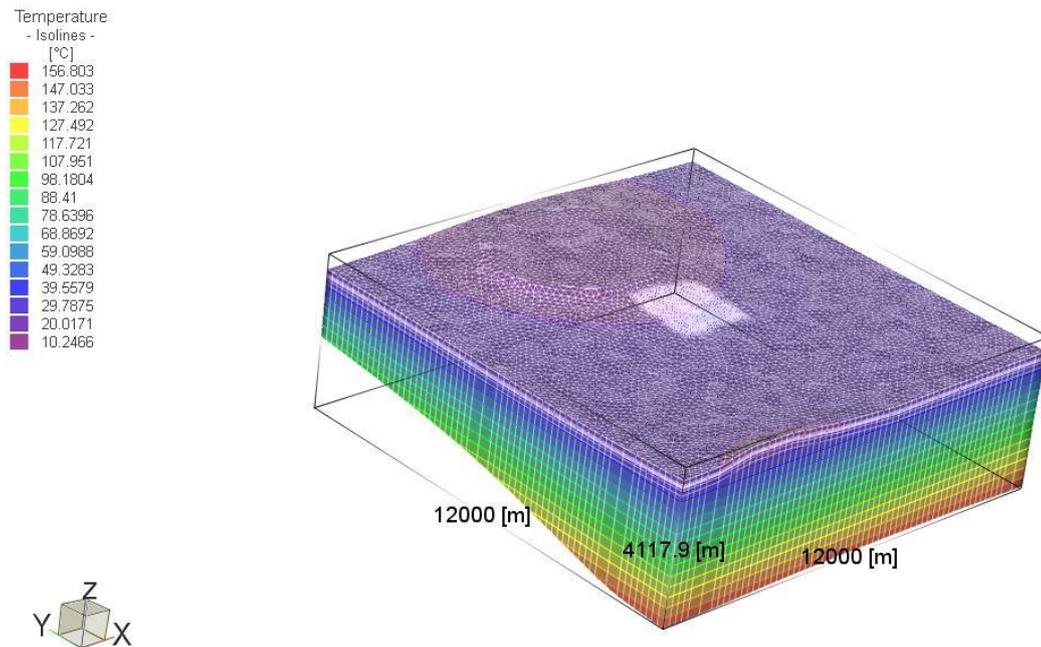


Abbildung 4-4: Modellschichten, Temperaturverteilung und Wärmeleitfähigkeit auf einem N-S-Schnitt durch das Modellgebiet in Höhe der geplanten Speichers; rote Schicht: hohe Wärmeleitfähigkeit des Zechsteinsalzes; vertikal überhöht

Danach wurden die zusätzlichen Modellschichten wieder entfernt, weil sie thermisch durch den Wärmespeicherbetrieb nicht beeinflusst werden (Abbildung 4-5). Dadurch wurde der Rechenaufwand deutlich reduziert.



FEFLOW (R)

0 [d]

Abbildung 4-5: Temperaturverteilung im Simulationsmodell nach Entfernung der nicht benötigten Schichten; vertikal überhöht

### 4.3 Modellverifizierung

Für die Simulationsrechnungen der verschiedenen Varianten wurde das Modell „Wärmespeicher Lüneburg“ anhand von durch Stefan Kranz am GeoForschungsZentrum Potsdam durchgeführten Simulationen der Varianten 1 und 2 mit 2 Bohrplätzen und  $30 \text{ m}^3/\text{h}$  bzw.  $50 \text{ m}^3/\text{h}$  verifiziert. Die dabei verwendete Software TRYNSYS rechnet mit dem minütlichen Abnehmerverhalten und berücksichtigt die Rückwirkung auf den Ausspeicherbedarf und die tatsächliche Ausspeicherung. Da dies mit dem Simulator FEFLOW nicht möglich ist, werden hier die Monatsmittel der Ausspeicherung in einem aufwendigen iterativen Verfahren mit jeweils 5-jährigen Simulationsrechnungen ermittelt. Die Simulationsrechnungen werden so lange mittels der Neuberechnung der Ausspeicherraten, Einspeichertemperaturen und -raten aus den Ausspeichertemperaturen des vorherigen Simulationslaufes iteriert, bis die Temperaturdifferenz der Ausspeichertemperatur im letzten Monat zur vorherigen Iteration kleiner als  $0,5 \text{ K}$  ist. Simuliert werden 5 Betriebsjahre, wobei letztendlich nur die Ausspeichertemperaturen des 5. Betriebsjahres in Betracht gezogen und verglichen werden.

Abbildung 4-8 zeigt die gute Übereinstimmung der Temperaturkurvenverläufe mit Vergleich zu TRYNSYS für die herangezogene Variante 1 mit  $30 \text{ m}^3/\text{h}$  und 2 Bohrplätzen und Abbildung 4-11 für die Variante 2 mit  $50 \text{ m}^3/\text{h}$  und 2 Bohrplätzen. Da das GFZ TRNSYS-Modell die Wechselwirkung eng benachbarter Speicherbohrungen nicht berücksichtigt, können

jetzt, basierend auf dieser Verifizierung, energetisch vorteilhafte Varianten mit der Betrachtung von einem einzigen Sammelbohrplatz und damit Beeinflussung der Bohrungen mit FEFLOW gerechnet werden.

Nachfolgend werden die Simulationsszenarien zur Verifikation im Detail erläutert und deren Ergebnisse tabellarisch sowie grafisch durch die Darstellung der horizontalen Ausdehnung der thermisch beeinflussten Bereiche im Untergrund als auch anhand der Temperaturkurvenverläufe der Speicherbohrungen dargestellt.

#### 4.3.1 Verifikationsszenario 1: Variante 1 (Campus Ist-Zustand) mit $Q_{\max} = 30 \text{ m}^3/\text{h}$ und 2 Bohrplätzen Dispersionslänge 5 m; timestep 1 d

Im Verifikationsszenario 1 werden für die Variante 1 die Ausspeichertemperaturen bei Vorgabe der Einspeichertemperaturen auf beiden Seiten und der benötigten Volumenströme berechnet (Tabelle 4-3). Vorgegeben sind weiter ein maximaler Ausspeichervolumenstrom von  $30 \text{ m}^3/\text{h}$  und eine Auslegung mit 2 Bohrplätzen. Die Bohrplätze sind so weit entfernt, dass keine thermische Beeinflussung der Bohrungen erfolgen kann.

Tabelle 4-3: Ergebnisse von Temperatur und Volumenstrom für die Variante 1 mit  $Q_{\max} = 30 \text{ m}^3/\text{h}$  und 2 Bohrplätzen

	Durchschn. Temperatur kalte Seite	Durchschn. Temperatur warme Seite (max. 90 °C)	Durchschn. Volumenstrom Einspeicherung	Durchschn. Volumenstrom Ausspeicherung
	[°C]	[°C]	$\text{m}^3/\text{h}$	$\text{m}^3/\text{h}$
Jan	50.2	59.9	0.0	26.2
Feb	46.5	52.8	0.0	25.6
Mrz	42.0	48.7	0.0	12.9
Apr	42.6	90.0	2.1	0.0
Mai	43.3	90.0	10.7	0.0
Jun	43.5	90.0	14.0	0.0
Jul	42.8	90.0	16.2	0.0
Aug	41.7	90.0	15.0	0.0
Sep	40.8	90.0	10.2	0.0
Okt	40.3	90.0	4.4	0.0
Nov	50.5	81.2	0.0	15.0
Dez	50.2	70.6	0.0	26.3

In Abbildung 4-6 und Abbildung 4-7 werden in der horizontalen Aufsicht die Ausdehnung der thermisch beeinflussten Bereiche im Aquifer am Ende der Einspeicherphase im Oktober bzw. am Ende der Ausspeicherphase im März des 5. Betriebsjahres veranschaulicht.

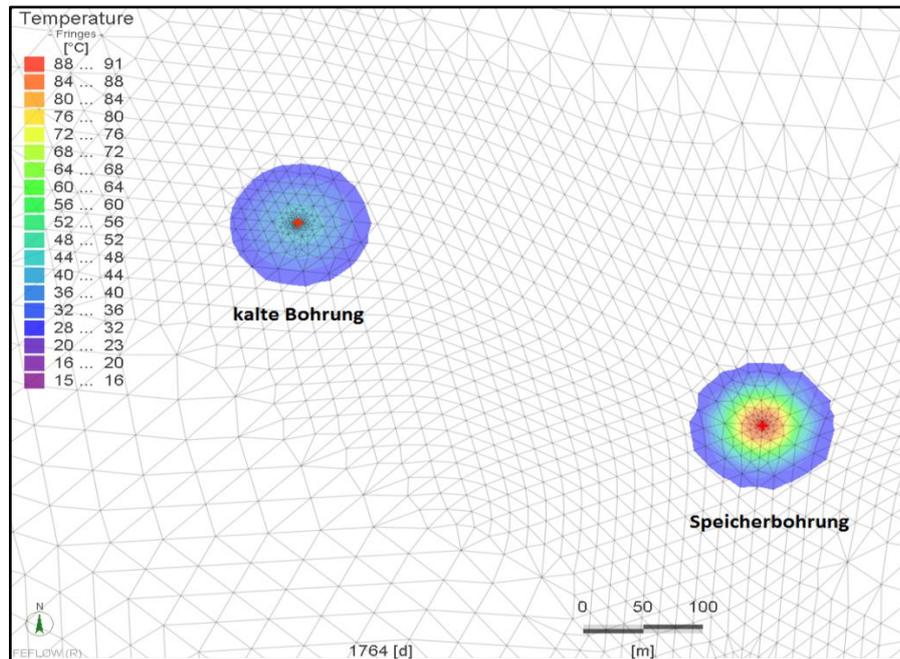


Abbildung 4-6: Ausdehnung der thermisch beeinflussten Bereiche in der Mitte des Aquifers bei 2 Bohrplätzen am Ende der Einspeicherphase (Oktober) im 5. Betriebsjahr; Temperaturen  $>28\text{ °C}$  und  $<23\text{ °C}$ ; Variante 1

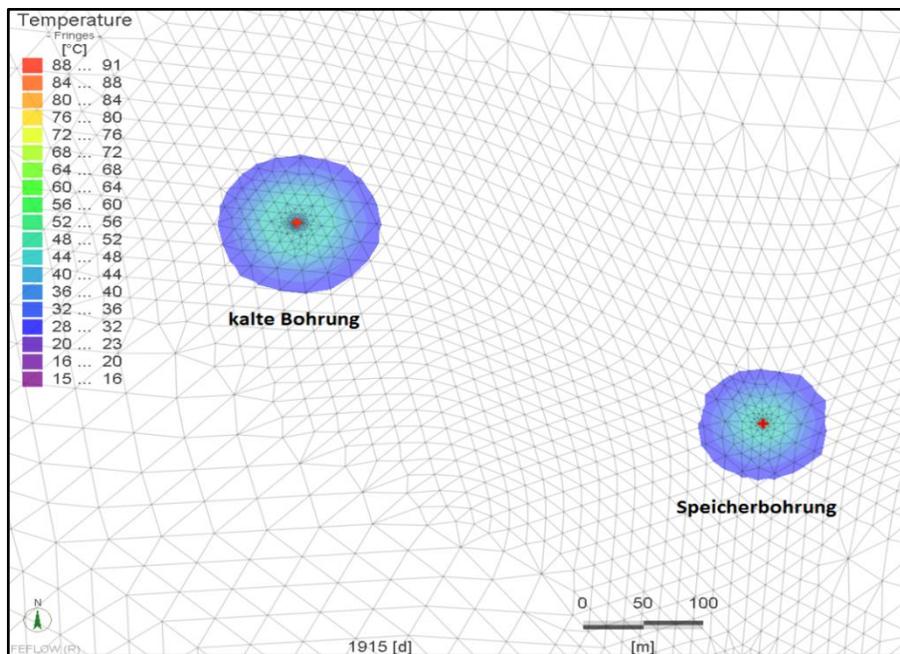


Abbildung 4-7: Ausdehnung der thermisch beeinflussten Bereiche in der Mitte des Aquifers bei 2 Bohrplätzen am Ende der Ausspeicherphase (März) im 5. Betriebsjahr; Temperaturen  $>28\text{ °C}$  und  $<23\text{ °C}$ , Variante 1

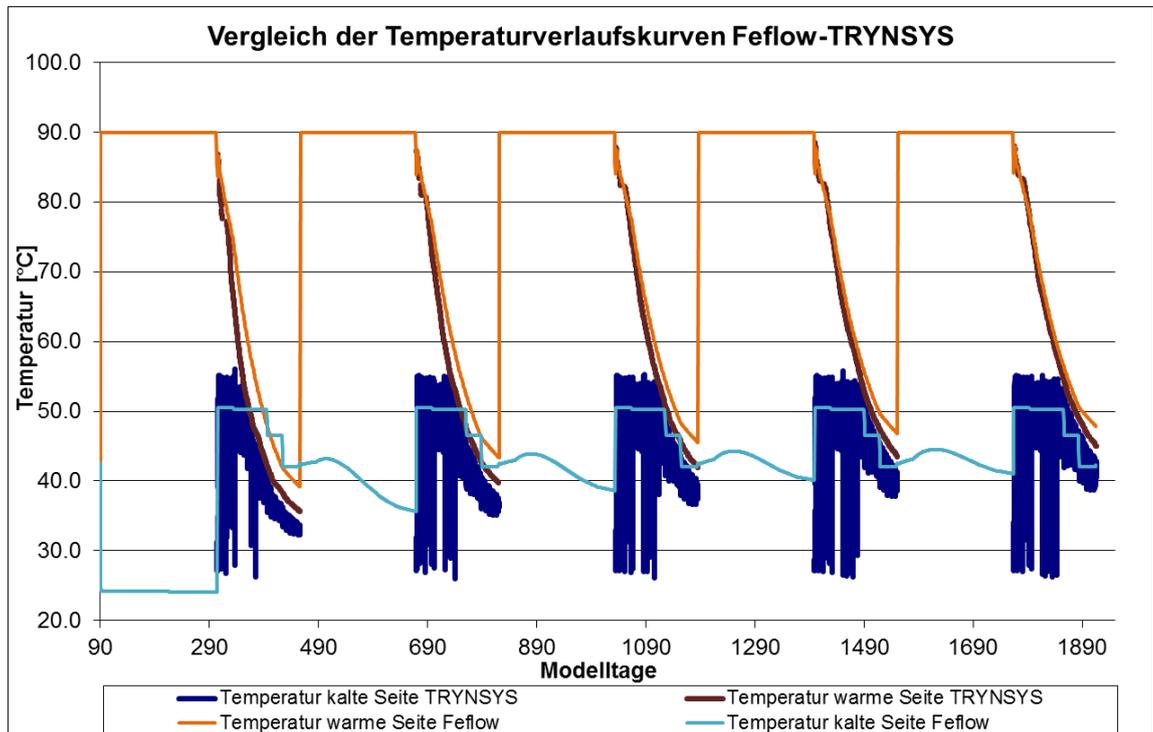


Abbildung 4-8: Vergleich FEFLOW-TRYNSYS: Temperaturverlaufskurven über 5 Betriebsjahre der Variante 1 mit 30 m<sup>3</sup>/h und 2 Bohrplätzen

Abbildung 4-8 zeigt die Temperaturverlaufskurven für die mit FEFLOW berechneten und im Vergleich dazu die mit TRYNSYS berechneten Ergebnisse. Nur die Ausspeichertemperaturen in der Ausspeicherphase des 5. Betriebsjahres dürfen verglichen werden, weil in der FEFLOW-Variante nur mit den Temperaturen dieses Jahres iteriert wird. Sie zeigen sehr gute Übereinstimmung zwischen beiden Berechnungsmethoden.

#### 4.3.2 Verifikationsszenario 2 zur Variante 2 (energieeffizienteres Campus-Heiznetz) mit $Q_{\max} = 50 \text{ m}^3/\text{h}$ und 2 Bohrplätzen

*Dispersionslänge 5 m; timestep 5 d*

Um die FEFLOW-Berechnungen auch für die energetische Variante 2, die eine größere Wärmeein- und -ausspeicherung aufweist als Variante 1, zu verifizieren, wurden im Verifikationsszenario 2 auch für diese Variante die Ausspeichertemperaturen bei Vorgabe der Einspeichertemperaturen auf beiden Seiten und der benötigten Volumenströme berechnet (Tabelle 4-4). Vorgegeben sind weiter ein maximaler Ausspeichervolumenstrom von 50 m<sup>3</sup>/h und eine Auslegung mit 2 Bohrplätzen.

Tabelle 4-4: Ergebnisse von Temperatur und Volumenstrom für die Variante 2 mit  $Q_{\max} = 50 \text{ m}^3/\text{h}$  und 2 Bohrplätzen

	<b>Durchschn. Temperatur kalte Seite</b>	<b>Durchschn. Temperatur warme Seite (max. 90 °C)</b>	<b>Durchschn. Volumenstrom Einspeicherung</b>	<b>Durchschn. Volumenstrom Ausspeicherung</b>
	[°C]	[°C]	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /h
Jan	46.0	72.6	0.0	16.5
Feb	48.4	66.0	0.0	24.7
Mrz	48.6	59.9	0.0	22.8
Apr	47.1	90.0	2.7	0.0
Mai	45.6	90.0	11.6	0.0
Jun	43.3	90.0	17.7	0.0
Jul	40.7	90.0	18.0	0.0
Aug	38.6	90.0	16.9	0.0
Sep	37.2	90.0	9.7	0.0
Okt	36.5	90.0	4.8	0.0
Nov	46.3	85.1	0.0	7.4
Dez	45.9	79.2	0.0	15.4

In Abbildung 4-9 und Abbildung 4-10 werden in der horizontalen Aufsicht die Ausdehnung der thermisch beeinflussten Bereiche im Aquifer am Ende der Einspeicherphase im Oktober bzw. am Ende der Ausspeicherphase im März des 5. Betriebsjahres veranschaulicht.

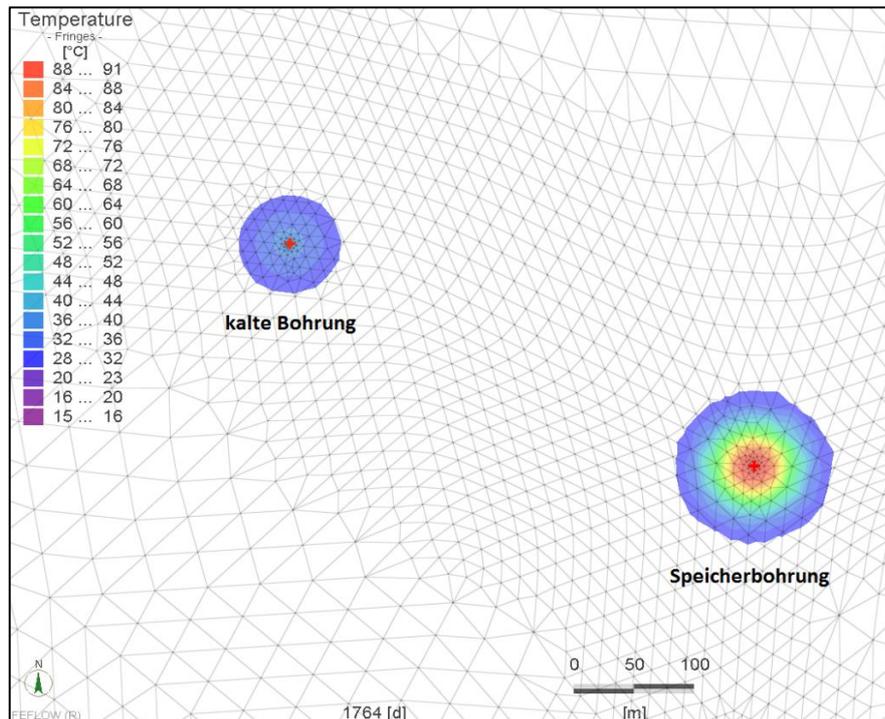


Abbildung 4-9: Ausdehnung der thermisch beeinflussten Bereiche in der Mitte des Aquifers bei 2 Bohrplätzen am Ende der Einspeicherphase (Oktober) im 5. Betriebsjahr; Temperaturen  $>28\text{ °C}$  und  $<23\text{ °C}$ ; Variante 2

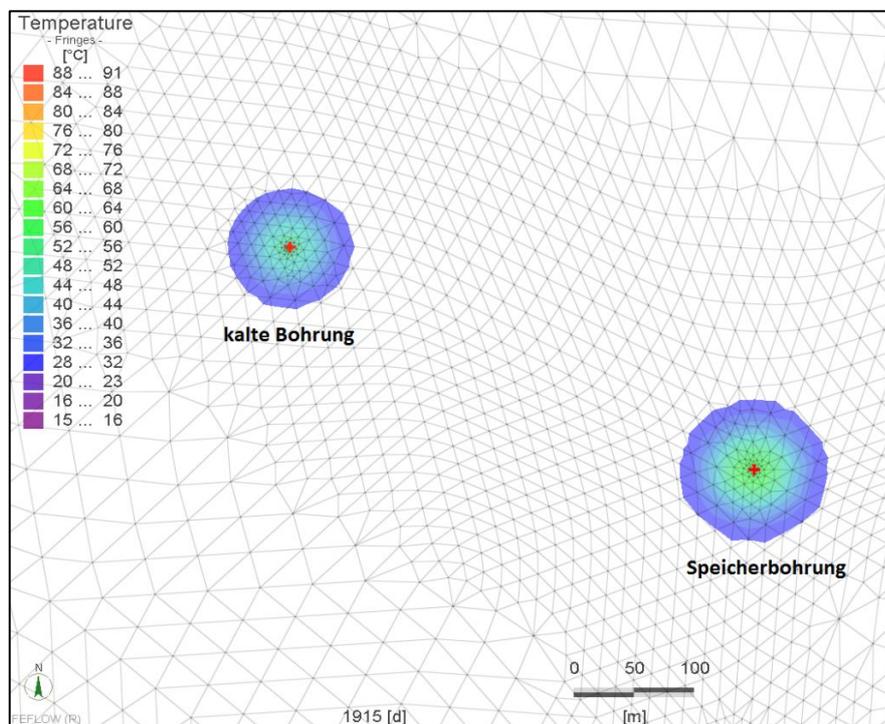


Abbildung 4-10: Ausdehnung der thermisch beeinflussten Bereiche in der Mitte des Aquifers bei 2 Bohrplätzen am Ende der Ausspeicherphase (März) im 5. Betriebsjahr; Temperaturen  $>28\text{ °C}$  und  $<23\text{ °C}$ , Variante 2

Abbildung 4-11 zeigt die Temperaturverlaufskurven für die mit FEFLOW berechneten und im Vergleich dazu die mit TRYNSYS berechneten Ergebnisse. Nur die Ausspeichertemperaturen in der Ausspeicherphase des 5. Betriebsjahres dürfen verglichen werden, weil in der FEFLOW-Variante nur mit den Temperaturen dieses Jahres iteriert wird. Sie zeigen sehr gute Übereinstimmung zwischen beiden Berechnungsmethoden.

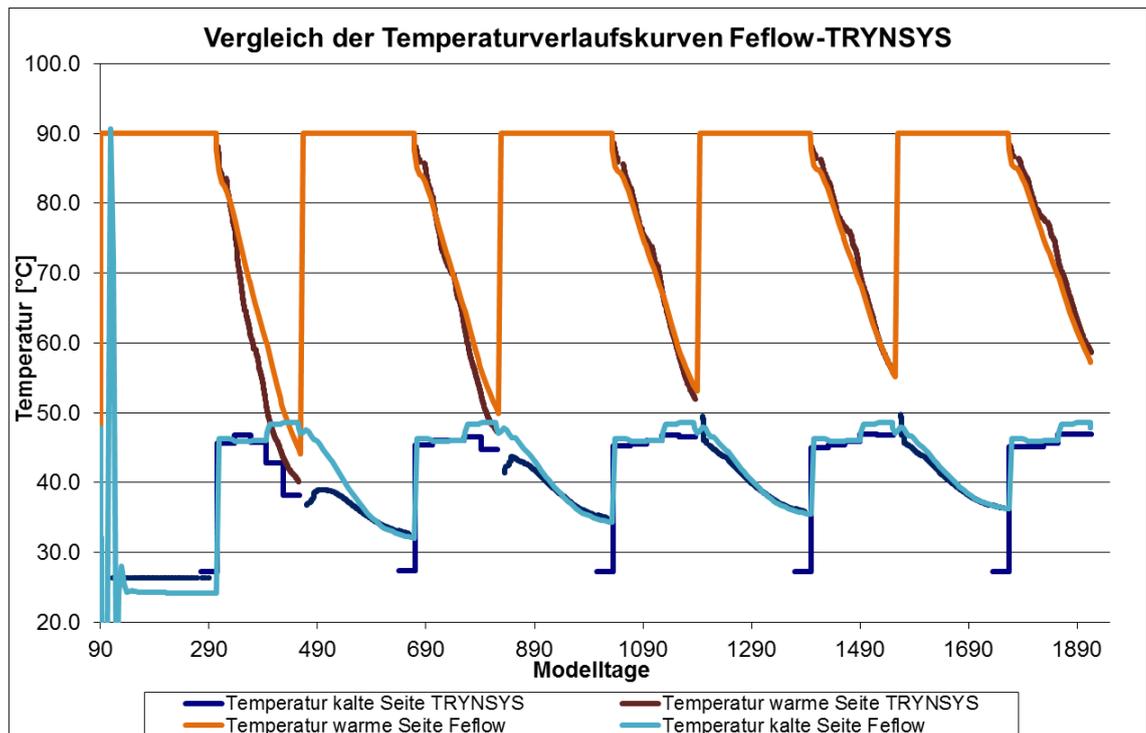


Abbildung 4-11: Vergleich FEFLOW-TRYNSYS: Temperaturverlaufskurven über 5 Betriebsjahre der Variante 2 mit 50 m<sup>3</sup>/h und 2 Bohrplätzen

#### **4.4 Vergleichsszenarien von Varianten mit 2 Bohrplätzen und 1 Bohrplatz („Sammelbohrplatz“)**

Im Folgenden werden die jeweils zuvor berechnete Variante 1 mit 30 m<sup>3</sup>/h und Variante 2 mit 50 m<sup>3</sup>/h nochmal mit jeweils einem Sammelbohrplatz mit einem Bohrungsabstand von 67 m simuliert. Der Vergleich des energetischen Ertrages (Speicherrückgewinnungsgrad) mit der Variante mit 2 Bohrplätzen, für den diese Simulationen die Grundlage bilden, erfolgt in Abschnitt 8.5.1.1.

#### 4.4.1 Simulationsszenario 3: Variante 1 (Campus Ist-Zustand) mit $Q_{\max} = 30 \text{ m}^3/\text{h}$ und 1 Bohrplatz Dispersionslänge 5 m; timestep 1 d

Tabelle 4-5: Ergebnisse von Temperatur und Volumenstrom für die Variante 1 mit  $Q_{\max} = 30 \text{ m}^3/\text{h}$  und 1 Bohrplatz

	Durchschn. Temperatur kalte Seite	Durchschn. Temperatur warme Seite (max. 90 °C)	Durchschn. Volumenstrom Einspeicherung	Durchschn. Volumenstrom Ausspeicherung
	[°C]	[°C]	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /h
Jan	50.2	65.4	0.0	25.1
Feb	46.5	58.9	0.0	28.8
Mrz	42.0	54.7	0.0	24.5
Apr	43.2	90.0	2.1	0.0
Mai	44.0	90.0	10.9	0.0
Jun	44.7	90.0	14.3	0.0
Jul	44.9	90.0	16.9	0.0
Aug	44.9	90.0	16.0	0.0
Sep	45.0	90.0	11.1	0.0
Okt	45.1	90.0	4.9	0.0
Nov	50.5	83.2	0.0	14.4
Dez	50.2	74.8	0.0	25.4

In Abbildung 4-12 und Abbildung 4-13 werden in der horizontalen Aufsicht die Ausdehnung der thermisch beeinflussten Bereiche im Aquifer am Ende der Einspeicherphase im Oktober bzw. am Ende der Ausspeicherphase im März des 5. Betriebsjahres veranschaulicht.

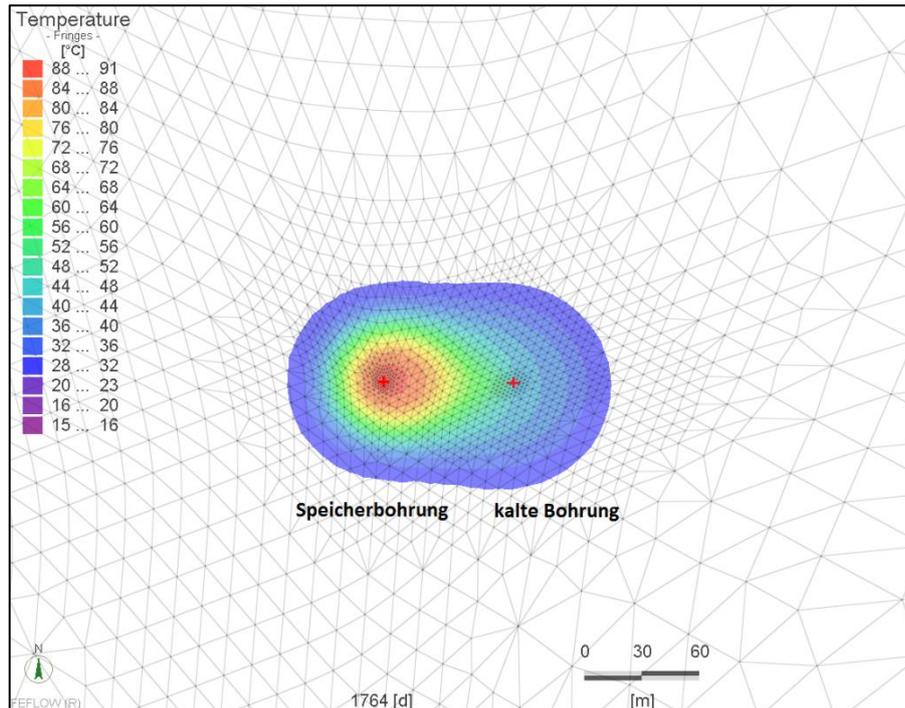


Abbildung 4-12: Ausdehnung der thermisch beeinflussten Bereiche in der Mitte des Aquifers bei 1 Bohrplatz am Ende der Einspeicherphase (Oktober) im 5. Betriebsjahr; Temperaturen  $>28\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $<23\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Variante 1

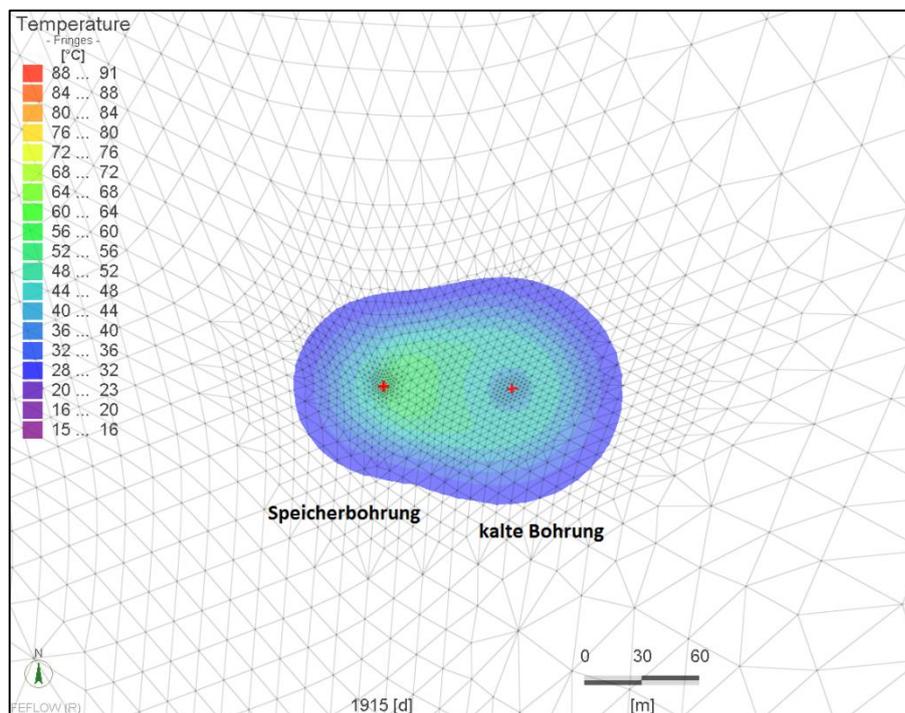


Abbildung 4-13: Ausdehnung der thermisch beeinflussten Bereiche in der Mitte des Aquifers bei 1 Bohrplatz am Ende der Ausspeicherphase (März) im 5. Betriebsjahr ;  $>28\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $<23\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Variante 1

Abbildung 4-14 zeigt die von FEFLOW berechnete Temperaturverlaufskurve für die Betrachtung bei Sammelbohrplatz.

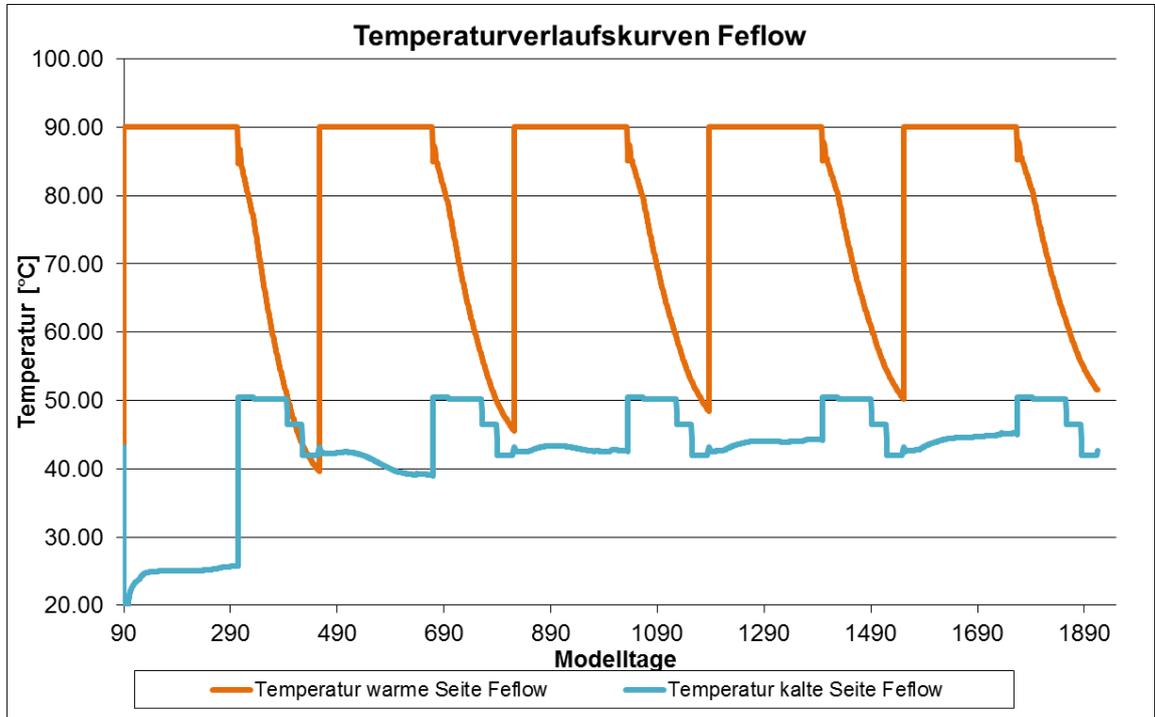


Abbildung 4-14: Temperaturverlaufskurven der Variante 1 bei  $Q = 30 \text{ m}^3/\text{h}$  und 1 Bohrplatz über 5 Betriebsjahre

#### 4.4.2 Simulationsszenario 4: Variante 2 (energieeffizienteres Campus-Heiznetz) mit $Q_{\max} = 50 \text{ m}^3/\text{h}$ und 1 Bohrplatz Dispersionslänge 5 m; timestep 5 d

Tabelle 4-6: Ergebnisse von Temperatur und Volumenstrom für die Variante 2 mit  $Q_{\max} = 50 \text{ m}^3/\text{h}$  und 1 Bohrplatz

	Durchschn. Temperatur kalte Seite	Durchschn. Temperatur warme Seite (max. 90 °C)	Durchschn. Volumenstrom Einspeicherung	Durchschn. Volumenstrom Ausspeicherung
	[°C]	[°C]	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /h
Jan	45.6	77.3	0.0	14.0
Feb	46.2	72.5	0.0	21.5
Mrz	48.1	67.4	0.0	20.9
Apr	47.2	90.0	2.7	0.0
Mai	46.0	90.0	11.7	0.0
Jun	44.7	90.0	18.2	0.0
Jul	43.9	90.0	19.3	0.0
Aug	43.9	90.0	18.8	0.0
Sep	44.3	90.0	11.2	0.0
Okt	44.7	90.0	5.7	0.0
Nov	46.2	86.3	0.0	7.2
Dez	45.9	82.0	0.0	14.2

In Abbildung 4-15 und Abbildung 4-16 werden in der horizontalen Aufsicht die Ausdehnung der thermisch beeinflussten Bereiche im Aquifer am Ende der Einspeicherphase im Oktober bzw. am Ende der Ausspeicherphase im März des 5. Betriebsjahres veranschaulicht.

Abbildung 4-17 zeigt die von FEFLOW berechnete Temperaturverlaufskurve für die Betrachtung bei nur einem Bohrplatz.

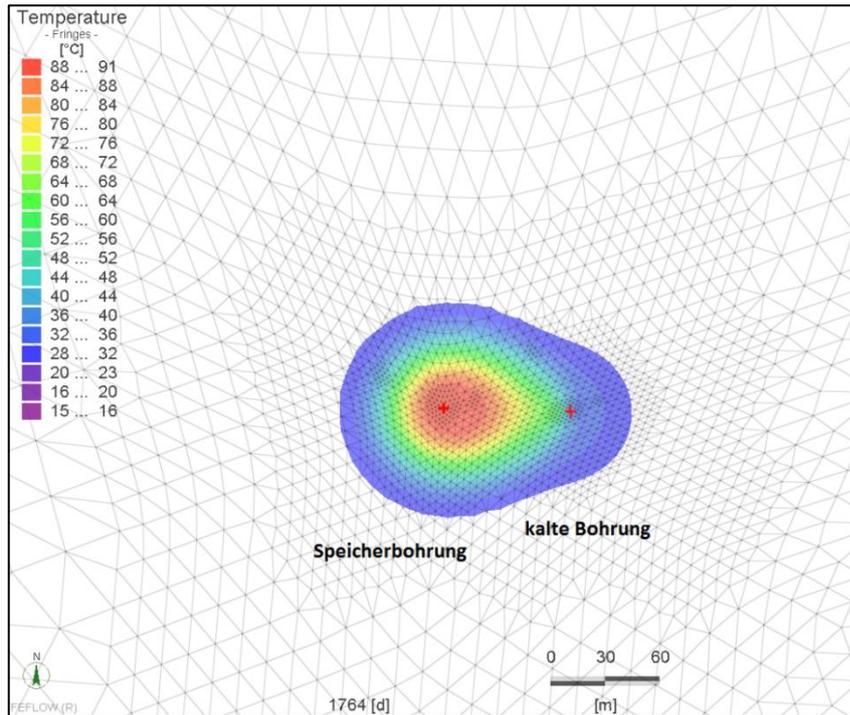


Abbildung 4-15: Ausdehnung der thermisch beeinflussten Bereiche in der Mitte des Aquifers bei 1 Bohrplatz am Ende der Einspeicherphase (Oktober) im 5. Betriebsjahr; Temperaturen  $>28\text{ °C}$  und  $<23\text{ °C}$ , Variante 2

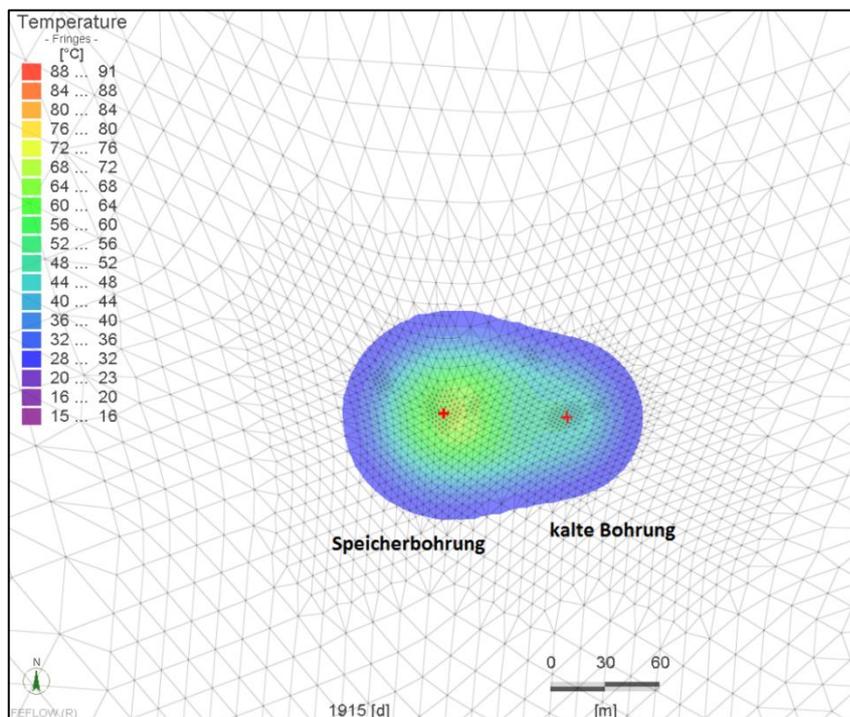


Abbildung 4-16: Ausdehnung der thermisch beeinflussten Bereiche in der Mitte des Aquifers bei 1 Bohrplatz am Ende der Ausspeicherphase (März) im 5. Betriebsjahr ;  $>28\text{ °C}$  und  $<23\text{ °C}$ , Variante 2

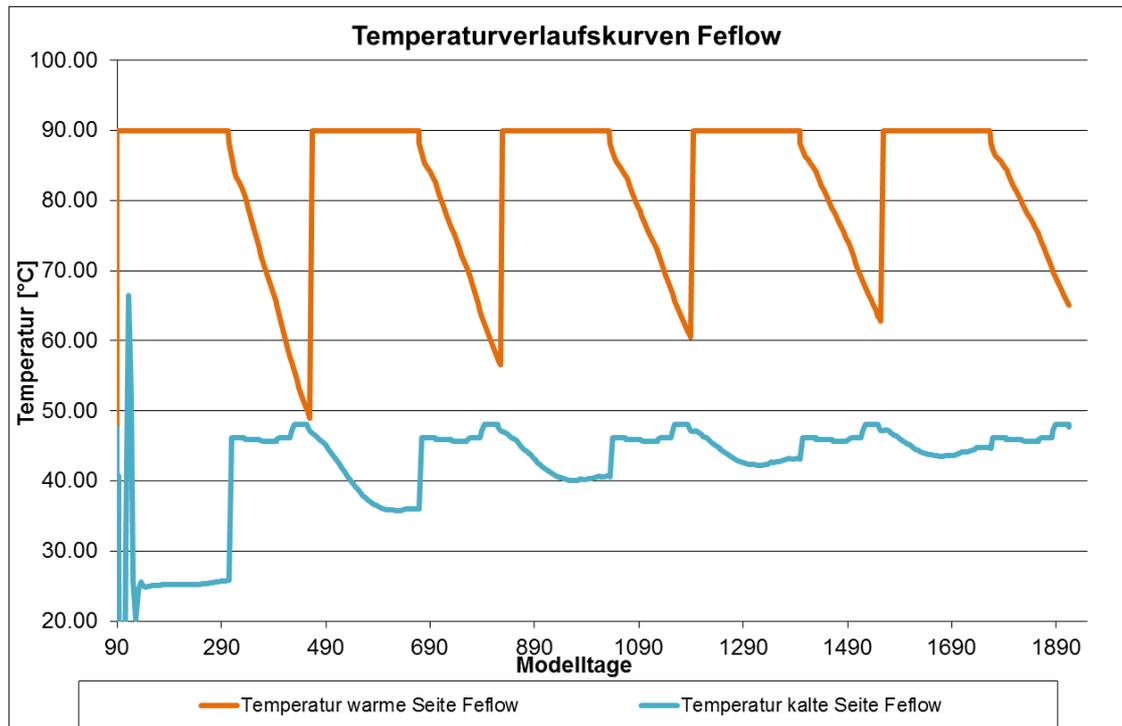


Abbildung 4-17: Temperaturverlaufskurven der Variante 2 bei  $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$  und 1 Bohrplatz über 5 Betriebsjahre

#### 4.5 **Simulationsergebnisse für die energetischen Varianten 1 und 2**

Für die weiteren Simulationsszenarien werden nur noch die Varianten mit einem Sammelbohrplatz in Betracht gezogen und die energetischen Varianten 1 (Campusheiznetz IST-Zustand) und 2 (energieeffizienteres Campusheiznetz) mit unterschiedlichen Volumenströmen berechnet. Hier ist darauf hinzuweisen, dass in den folgenden Varianten die longitudinale Dispersion von 5 m auf 1,5 m verkürzt und die transversale Dispersion von 0,5 m auf 1 m erhöht wurde. Diese Werte wurden bereits in den Modellen des Wärmespeichers Neubrandenburg sowie der Parlamentsbauten Berlin anhand von Betriebsdaten kalibriert und deshalb hier auch verwendet. Die maximale Zeitschrittweite beträgt jeweils 5 Tage.

Die Darstellung der Simulationsergebnisse wird für die folgenden Variantenrechnungen nur noch auf die tabellarische Darstellung der Temperaturen und Volumenströme beschränkt. Diese sind der Input für die weitere energetische und kostenseitige Variantenbewertung.

#### 4.5.1 Simulationsszenario 5: Variante 1 (Campus Ist-Zustand) mit $Q_{\max} = 30 \text{ m}^3/\text{h}$ und 1 Bohrplatz

Tabelle 4-7: Ergebnisse von Temperatur und Volumenstrom im 5. Betriebsjahr für die Variante 1 mit  $Q_{\max} = 30 \text{ m}^3/\text{h}$  und 1 Bohrplatz

	Durchschn. Temperatur kalte Seite	Durchschn. Temperatur warme Seite (max. 90 °C)	Durchschn. Volumenstrom Einspeicherung	Durchschn. Volumenstrom Ausspeicherung
	[°C]	[°C]	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /h
Jan	50.1	68.5	0.0	24.3
Feb	46.5	59.4	0.0	28.9
Mrz	42.0	53.2	0.0	22.4
Apr	42.7	90.0	2.1	0.0
Mai	43.4	90.0	10.7	0.0
Jun	44.5	90.0	14.3	0.0
Jul	45.2	90.0	17.0	0.0
Aug	45.0	90.0	16.1	0.0
Sep	44.5	90.0	11.0	0.0
Okt	44.1	90.0	4.7	0.0
Nov	50.5	85.6	0.0	13.6
Dez	50.2	79.3	0.0	24.1

#### 4.5.2 Simulationsszenario 6: Variante 1 (Campus Ist-Zustand) mit $Q_{\max} = 25 \text{ m}^3/\text{h}$ und 1 Bohrplatz

Tabelle 4-8: Ergebnisse von Temperatur und Volumenstrom im 5. Betriebsjahr für die Variante 1 mit  $Q_{\max} = 25 \text{ m}^3/\text{h}$  und 1

	Durchschn. Temperatur kalte Seite	Durchschn. Temperatur warme Seite (max. 90 °C)	Durchschn. Volumenstrom Einspeicherung	Durchschn. Volumenstrom Auspeicherung
	[°C]	[°C]	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /h
Jan	50.1	71.4	0.0	20.8
Feb	46.5	63.1	0.0	25.0
Mrz	42.0	56.9	0.0	21.6
Apr	42.7	90.0	2.1	0.0
Mai	43.4	90.0	10.8	0.0
Jun	44.5	90.0	14.3	0.0
Jul	44.9	90.0	16.9	0.0
Aug	44.5	90.0	15.9	0.0
Sep	43.8	90.0	10.8	0.0
Okt	43.2	90.0	4.7	0.0
Nov	50.5	85.8	0.0	13.0
Dez	50.2	80.6	0.0	21.4

### 4.5.3 Simulationsszenario 7: Variante 1 (Campus Ist-Zustand) mit $Q_{\max} = 35 \text{ m}^3/\text{h}$ und 1 Bohrplatz

Tabelle 4-9: Ergebnisse von Temperatur und Volumenstrom im 5. Betriebsjahr für die Variante 1 mit  $Q_{\max} = 35 \text{ m}^3/\text{h}$  und 1 Bohrplatz

	Durchschn. Temperatur kalte Seite	Durchschn. Temperatur warme Seite (max. 90 °C)	Durchschn. Volumenstrom Einspeicherung	Durchschn. Volumenstrom Ausspeicherung
	[°C]	[°C]	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /h
Jan	50.1	65.7	0.0	29.0
Feb	46.5	55.9	0.0	33.5
Mrz	42.0	50.7	0.0	11.6
Apr	42.9	90.0	2.1	0.0
Mai	43.8	90.0	10.8	0.0
Jun	45.2	90.0	14.5	0.0
Jul	45.8	90.0	17.3	0.0
Aug	45.7	90.0	16.3	0.0
Sep	45.3	90.0	11.2	0.0
Okt	44.9	90.0	4.8	0.0
Nov	50.5	85.5	0.0	13.8
Dez	50.1	78.1	0.0	27.2

### 4.5.4 Simulationsszenario 8: Variante 2 (energieeffizienteres Campus-Heiznetz) mit $Q_{\max} = 50 \text{ m}^3/\text{h}$ und 1 Bohrplatz

Tabelle 4-10: Ergebnisse von Temperatur und Volumenstrom im 5. Betriebsjahr für die Variante 2 mit  $Q_{\max} = 50 \text{ m}^3/\text{h}$  und 1 Bohrplatz

	Durchschn. Temperatur kalte Seite	Durchschn. Temperatur warme Seite (max. 90 °C)	Durchschn. Volumenstrom Einspeicherung	Durchschn. Volumenstrom Ausspeicherung
	[°C]	[°C]	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /h
Jan	45.6	80.6	0.0	12.7
Feb	46.0	75.7	0.0	19.2
Mrz	47.7	69.5	0.0	20.1
Apr	47.0	90.0	2.7	0.0
Mai	45.7	90.0	11.6	0.0
Jun	43.6	90.0	17.8	0.0
Jul	41.5	90.0	18.3	0.0
Aug	40.0	90.0	17.3	0.0
Sep	39.3	90.0	10.1	0.0
Okt	39.0	90.0	5.0	0.0
Nov	46.2	87.4	0.0	7.0
Dez	45.9	84.3	0.0	13.3

#### 4.5.5 Simulationsszenario 9: Variante 2 (energieeffizienteres Campus-Heiznetz) mit $Q_{\max} = 20 \text{ m}^3/\text{h}$ und 1 Bohrplatz

Tabelle 4-11: Ergebnisse von Temperatur und Volumenstrom im 5. Betriebsjahr für die Variante 2 mit  $Q_{\max} = 20 \text{ m}^3/\text{h}$

	Durchschn. Temperatur kalte Seite	Durchschn. Temperatur warme Seite (max. 90 °C)	Durchschn. Volumenstrom Einspeicherung	Durchschn. Volumenstrom Ausspeicherung
	[°C]	[°C]	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /h
Jan	47.5	81.3	0.0	11.8
Feb	48.3	77.4	0.0	16.7
Mrz	48.8	72.8	0.0	15.5
Apr	47.6	90.0	2.7	0.0
Mai	46.4	90.0	11.8	0.0
Jun	44.2	90.0	18.0	0.0
Jul	41.8	90.0	18.4	0.0
Aug	40.3	90.0	17.5	0.0
Sep	39.8	90.0	10.2	0.0
Okt	39.7	90.0	5.1	0.0
Nov	46.5	87.4	0.0	7.0
Dez	47.3	84.6	0.0	13.2

#### 4.5.6 Simulationsszenario 10: Variante 2 (energieeffizienteres Campus-Heiznetz) mit $Q_{\max} = 40 \text{ m}^3/\text{h}$ und 1 Bohrplatz

Tabelle 4-12: Ergebnisse für Temperatur und Volumenstrom im 5. Betriebsjahr für die Variante 2 mit  $Q_{\max} = 40 \text{ m}^3/\text{h}$

	Durchschn. Temperatur kalte Seite	Durchschn. Temperatur warme Seite (max. 90 °C)	Durchschn. Volumenstrom Einspeicherung	Durchschn. Volumenstrom Ausspeicherung
	[°C]	[°C]	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /h
Jan	45.6	80.5	0.0	12.7
Feb	45.9	75.5	0.0	19.3
Mrz	47.3	68.8	0.0	22.6
Apr	46.8	90.0	2.7	0.0
Mai	45.6	90.0	11.6	0.0
Jun	43.7	90.0	17.9	0.0
Jul	41.7	90.0	18.3	0.0
Aug	40.2	90.0	17.4	0.0
Sep	39.5	90.0	10.2	0.0
Okt	39.2	90.0	5.1	0.0
Nov	46.3	87.3	0.0	7.0
Dez	45.8	84.2	0.0	13.4

## **5 Bohrungen**

### **5.1 Geologische Aufgabenstellung**

#### **5.1.1 Aufgabenstellung der Bohrungen**

Am Standort Lüneburg ist geplant, einen Aquifer-Wärmespeicher zu errichten. Der Wärmespeicher besteht im Untertagebereich aus einer „kalten“ und einer „warmen“ Bohrung.

Für die Bohrungen sind im Einzelnen folgende Aufgaben zu lösen:

- Untersuchung der stratigraphischen und lithologischen Profilentwicklung am Standort
- Nachweis eines Nutzhorizontes und Untersuchung seiner speichergeologischen Eigenschaften
- Ermittlung zuverlässiger Bohrungs- und Schichtparameter
- Bestimmung der physiko-chemischen Eigenschaften des Schichtwassers
- Installation jeder Bohrung zur Förderung **und** Injektion
- Nachweis der Förder- und Reinjizierbarkeit von 50 m<sup>3</sup>/h Thermalwasser

#### **5.1.2 Lage der Bohrungen**

Die Untersuchungen berücksichtigen zwei alternative Varianten:

- Zwei separate Bohrplätze:  
Der Bohransatzpunkt der „warmen“ Bohrung befindet sich in Lüneburg, Ecke Heinrich-Böll-Straße - Ülzener Straße, und der Ansatzpunkt für die „kalte“ Bohrung im Bereich der Wichernstraße.
- Sammelbohrplatz:  
Die Ansatzpunkte beider Bohrungen der Dublette befinden sich in Lüneburg, Ecke Heinrich-Böll-Straße - Ülzener Straße. Der Bohrungsabstand beträgt nur 60 m (verlängerter Bohrplatz).

#### **5.1.3 Qualitätsanforderungen**

Für das Abteufen der Bohrungen gelten folgende Qualitätsanforderungen:

- Teufengerechte Spülprobenentnahme
  - Kerngewinn von mindestens 90 %
  - Mindestkerndurchmesser >60 mm
  - Kernmarschlänge maximal 9 m
  - Einsatz einer speicherschonenden Spülung im Bereich des potenziellen Nutzhorizontes
-

#### 5.1.4 Spülprobenentnahme

Spülproben sind alle 2 m ungewaschen zu entnehmen. Die Proben sind beschriftet mit Teufenangabe in Spülprobenkisten abzulegen.

Meißelproben sind bei jedem Wechsel des Bohrwerkzeuges zu entnehmen und ebenfalls mit Teufenangabe beschriftet in Spülprobenkisten zu lagern.

#### 5.1.5 Kernstrecken

Eine Kernstrecke sollte in der jeweils ersten Bohrung im Teufenbereich von ca. 450 bis 500 m vorgesehen werden, um den Speicherkomplex zu erfassen. Abhängig vom angetroffenen Profil können Beginn und Länge der Kernstrecke operativ verändert werden.

Der Kern ist gewaschen, ordnungsgemäß beschriftet und witterungsgeschützt in 1 m Kernkisten abzulegen. Die Kernkisten sind mit Kernkistennummer, Bohrungsnummer, Kopf, Kernmarschnummer, Kernmarschteufe (von - bis), Kerngewinn, Kernverlust und Krone zu beschriften.

#### 5.1.6 Geophysikalische Bohrlochmessungen

Das Profil jeder Bohrung wird mit jeweils 2 Bohrlochmessungen dokumentiert.

	<b>Messverfahren</b>	<b>Teufenbereich</b>
1. Messung	GR, CAL, BA	0 – 450 m
2. Messung	GR, CAL, GGL, DIL, NNL, SP, BA	450 – 500 m

Erläuterung:

GR	Gamma Ray Log
CAL	Kalibermessung
BA	Bohrlochabweichungsmessung
GGL	Gamma Gamma Log
DIL	Dual Induction Log
NNL	Neutron Neutron Log
SP	Eigenpotenzialmessung
Sonic	Sonic-Messung
P/T	Druck-, Temperaturmessung
Flow	Zuflussprofilierung

Sonstige/Technische Messungen:

- CAL nach Unterschneiden Filterbereich
- GGL zum Verkiesen des Filters (Gravel-Pack)
- P/T zum Leistungstest
- Flow nach Leistungstest

### **5.1.7 Aufschlussintervalle und Rohreinbauten**

Am Standort ist mit Sand und Geschiebemergel bis zu einer Teufe von 70 m zu rechnen. Mit einem Standrohr werden diese quartären Sedimente abgedeckt und abgedichtet.

Nach Erreichen der Fein- bis Mittelsande des Obereozän (Speicherhorizont) und Durchführung der 1. Bohrlochmessung wird die Endverrohrung eingebaut. Die Rohre sind im oberen Bereich des Nutzhorizontes bei ca. 450 m abzusetzen.

### **5.1.8 Zementation und Dichteprüfung**

Alle Rohrtouren sind zu zementieren. Die Endrohrtour wird durch Abdrücken (Prüfdruck 10 MPa) mit Wasser auf ihre Dichtheit geprüft.

### **5.1.9 Filterkomplettierung**

Nach Erreichen der Endteufe (ca. 500 m) wird die 2. Bohrlochmessung durchgeführt. Anschließend wird der zu komplettierende Speicherbereich auf einer Länge von ca. 35 m unterschritten bzw. profilerweitert. Nach dem Unterscheiden erfolgt eine Kalibermessung. Es folgen Filtereinbau und Gravel-Pack mit folgender Auslegung:

- Aufsatzrohre (m): 30
- Wickeldrahtfilter (m): 35
- Filterschlitzweite (mm): 0,5
- Filterkies (mm): 0,6 – 1,18
- Filterkies (US mash): 16/30
- Sumpfrohr (m): 10

### **5.1.10 Geologisch bedingte bohrtechnische Komplikationen**

Über das gesamte Bohrloch ist mit Kavernenbildung und Nachfall zu rechnen. In den stärker sandigen Bereichen sind bohrtechnische Komplikationen durch "Ankleben" der Bohrgarnitur möglich.

---

Eine Gasgefährdung für die Bohrungen ist aufgrund der Fallenstruktur am Salzstock Lüneburg nicht auszuschließen. Es sind die erforderlichen Sicherheitsmaßnahmen zu treffen.

## **5.2 Testprogramm**

### **5.2.1 Zielstellung**

Mit den Testarbeiten in den Bohrungen sind folgende Zielstellungen verbunden:

- Nachweis eines für die Projektrealisierung geeigneten Nutzhorizontes mit Förder- und Injektionsraten bis 50 m<sup>3</sup>/h
- Nachweis der Mineralkonstanz des Schichtwassers
- Probenahme zur Bestimmung des Gasgehaltes und der hydrochemischen Zusammensetzung des Schichtwassers
- Einschätzung des Absandverhaltens des Speichers
- Ermittlung von Produktivitäts- und Injektivitätsindex
- Bestimmung der initialen Druck- und Temperaturverhältnisse
- Ermittlung des Abgabe-/Aufnahmeprofils
- Berechnung der Schichtparameter

### **5.2.2 Reinigungslift nach dem Aufschluss des Nutzhorizontes**

Ein Reinigungslift nach Speicheraufschluss und vor der Filterkomplettierung kann nicht durchgeführt werden, da der Speicher aus Lockergestein besteht.

### **5.2.3 Casinglifttest**

Der Casinglifttest erfolgt als Leistungstest der komplettierten Bohrungen mit Stickstoff. Für den Test wird folgende Ausrüstung benötigt:

- Liftgestänge bis 300 m mit Schuh
  - Liftkopf mit Stickstoffzuleitung und Druckschleuse auf Steigraum
  - Elektronische Druckaufzeichnung Ring- und Steigraum
  - Volumenstrommessung Übertage
  - Auswurfleitungen 2" am Ringraum absperrbar
  - Elektronische Tiefenmanometer (Druck und Temperatur) abhängen mittels Wireline-Technik
  - Behältervolumen ca. 400 m<sup>3</sup>
-

Der Test wird in fünf Etappen geplant:

1. Etappe: 1. Förderregime 20 m <sup>3</sup> /h	2 h
2. Etappe: 2. Förderregime 30 m <sup>3</sup> /h	2 h
3. Etappe: 3. Förderregime 50 m <sup>3</sup> /h	3 h
4. Etappe: Druckanstiegsmessung	6 h
5. Etappe: Zuflussprofilierung 50 m <sup>3</sup> /h	3 h

Vor Beginn der Schichtwasserförderung werden die elektronischen Messsonden (Druck- und Temperaturmessung) oberhalb des Speicherbereiches abgehängt und nach der Druckaufbaumessung wieder gezogen.

Nach Abschluss der Testarbeiten erfolgen die Einmessung der „künstlichen Endteufe“ (KET), des Wasserspiegels und die Entnahme von Tiefenproben.

#### **5.2.4 Laboruntersuchungen (Gestein und Schichtwasser)**

Die Entnahme der Kernproben und der Kopfproben (Schichtwasser) erfolgen durch den betreuenden Geologen. Die Tiefenproben werden durch einen speziellen Nachauftragnehmer entnommen.

Folgende Untersuchungen sind in der jeweils ersten Bohrung vorgesehen:

- 40 Porositätsbestimmungen
- 20 Durchlässigkeitsbestimmungen
- 20 Korngrößenuntersuchungen
- 10 Kapillardruckuntersuchungen
- 10 Dünnschliffuntersuchungen
- 6 Röntgenanalysen
- 4 Kopfproben Schichtwasser für Vollanalyse (Wasser, Gas)
- 3 Tiefenproben Schichtwasser für Vollanalyse (Wasser, Gas)

### **5.3 Aufschluss und Komplettierung der Bohrungen**

#### **5.3.1 Bohrplatz**

Die Bohrplätze beider Varianten werden entsprechend W.E.G. Merkblatt 6/91 „Gestaltung des Bohrplatzes“ befestigt und im Bereich der Maschinenstellfläche (Kernbereich) mit einer wasserdichten Bitumenfläche/Betonfläche mit seitlich umlaufender Aufkantung ausgeführt. Verunreinigte Oberflächenwässer werden über Ölabscheider in Sammel-schächte geleitet und ordnungsgemäß entsorgt.

Die Bohrkeller werden vorzugsweise als bewehrte Betonfertigteile erstellt. Die Ausführung erfolgt wasserdicht in Betongüte WU mit Abdichtung zum Standrohr.

---

Die Fläche für die Spülpumpenaufstellung sowie die Lagerfläche für Spülungsmaterial werden ebenso wie der Kernbereich als geschlossene Bitumenfläche/Betonfläche mit entsprechender Entwässerung ausgeführt.

Der Sammelbohrplatz wird zur Gewährleistung des obertägigen Bohrungsabstandes von 60 m gegenüber dem Einzelbohrplatz (ca. 60 x 40 m) entsprechend verlängert (ca. 100 x 40 m). Die Mehrkosten für diese Bohrplatzvergrößerung liegen deutlich unter den Aufwendungen für Richtbohrmaßnahmen zum Erreichen des erforderlichen Bohrungsabstandes im untertägigen Speicherbereich. Zudem erhöhen Richtbohrungen bei der geringen Speicherteufe im Lockergestein das bohrtechnische Risiko und erschweren die Komplettierungsarbeiten (Filter).

### **5.3.2 Bohren und Komplettieren**

Alle Bohrungen in beiden Varianten werden seiger (vertikal) im Rotary-Spülbohrverfahren abgeteuft. Um irreversible Speicherschädigungen zu vermeiden, wird beim Aufschluss der Speichersandsteine mit einer speziellen Aufschlussflüssigkeit (Polymer-Salzsuspension) gearbeitet.

Da die Sandsteine des Nutzhorizontes zum Absanden neigen, werden die Bohrungen mittels sog. Open-hole-Komplettierung mit Wickeldrahtfilter und Gravel-Pack ausgerüstet. Dazu wird die Endverrohrung bis an die Oberkante des Speicherhorizontes eingebaut und zementiert. Zur Ermittlung der Speichereigenschaften werden in der jeweils ersten Bohrung Kernproben gewonnen und entsprechend untersucht.

Die Rohreinbauteufe wird durch Bohrlochmessung genau lokalisiert. Zur Vorbereitung der Filterinstallation wird der Speicherbereich mit einem Spezialwerkzeug unterschritten (profilerweitert).

Der Wickeldrahtfilter bildet in Verbindung mit dem Gravel-Pack eine optimale Verbindung von Bohrloch und Speichergestein. Durch optimale Auswahl und Abstimmung von Filterschlitzweite und Kieskörnung werden definierte Fließbedingungen im sondennahen Bereich geschaffen und damit lange Lebensdauern der Bohrungen gewährleistet.

Nach der Filterkomplettierung werden die Bohrungen auf ihre Leistungsfähigkeit getestet und die hydrodynamischen Parameter der Bohrungen bestimmt (initiale Druckverhältnisse; Produktivitäts- und Injektivitätsindex; Temperaturverhältnisse).

Zur Bestimmung der hydrochemischen Zusammensetzung und des Gasgehaltes des Schichtwassers werden Proben entnommen und analysiert.

---

### **5.3.3 Korrosionsschutz**

Aufgrund der hohen Korrosivität des Thermalwassers müssen die Bohrungen geschützt werden. Die Endverrohrung, der Pumpenstrang sowie der Injektionsstrang werden in korrosionsbeständigem GFK (glasfaserverstärkter Kunststoff) ausgeführt.

In die Bohrungen wird ein komplettes Korrosionsschutzsystem integriert. Alle thermalwasserberührten Teile werden aus korrosionsbeständigen Materialien gefertigt:

- GFK-Endverrohrung (glasfaserverstärkter Kunststoff)
- Edelstahl-Filterkomplettierung (chloridbeständig)
- Monelbeschichtete Tiefpumpe
- GFK-Pumpen- und Injektionsstrang
- Innenbeschichteter und gasdichter Sondenkopf
- Stickstoffbeaufschlagung (Verhinderung Sauerstoffzutritt)

Abbildung 5-1 und Abbildung 5-2 zeigen den prinzipiellen Aufbau der Bohrungen.

### **5.4 Endinstallation**

Nach Abteufen, Komplettieren und Testen der Bohrungen erfolgt der Einbau der Endinstallation, welche folgende Bauteile umfasst:

- Unterwassermotorpumpe (beide Bohrungen),
- Pumpenstrang (beide Bohrungen),
- Injektionsstrang (beide Bohrungen),
- Sondenkopf (beide Bohrungen),
- Inertierungsanlage (Schutzgasbeaufschlagung beide Bohrungen).

Die Leistungscharakteristik der Tiefpumpe richtet sich nach den erzielten Testergebnissen. Es können nur solche Unterwassermotorpumpen eingesetzt werden, die unter den Einsatzbedingungen (hohe Mineralisation des Fördermediums, hohe Korrosionsgefahr) eine dauerhafte Betriebssicherheit gewährleisten (Herstellergarantie).

Die Einbauteufe der Pumpenkomplettierung richtet sich nach den ermittelten dynamischen Spiegeländerungen im Förderbetrieb zuzüglich einer Sicherheit für geogene Speicheränderungen. Die Förderhöhe der Pumpe resultiert aus der Einbautiefe, den zu erwartenden Druckverlusten im Rohrleitungssystem sowie aus dem Systemdruck der Heizzentrale.

---

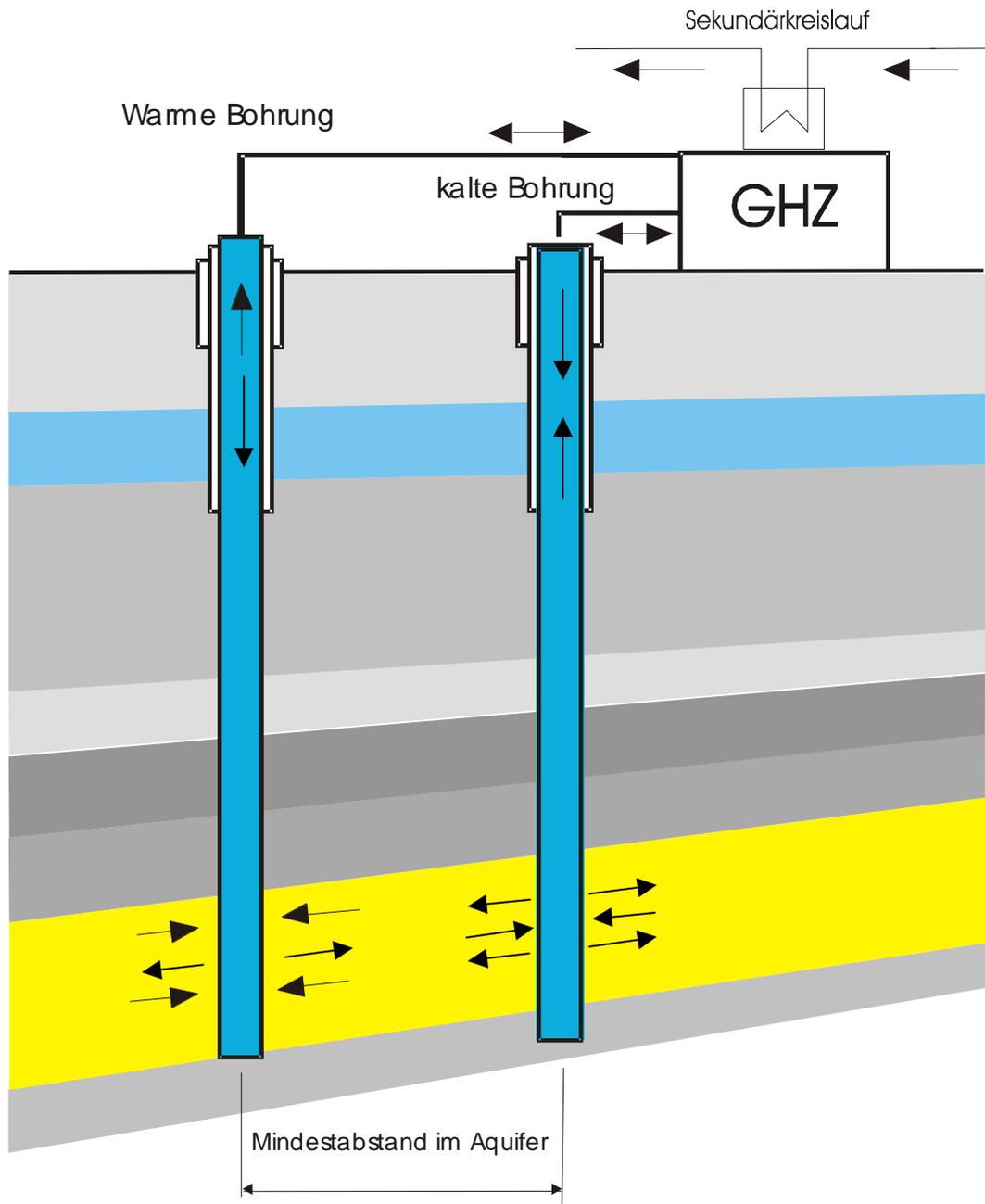


Abbildung 5-1: Bohrungsdulette

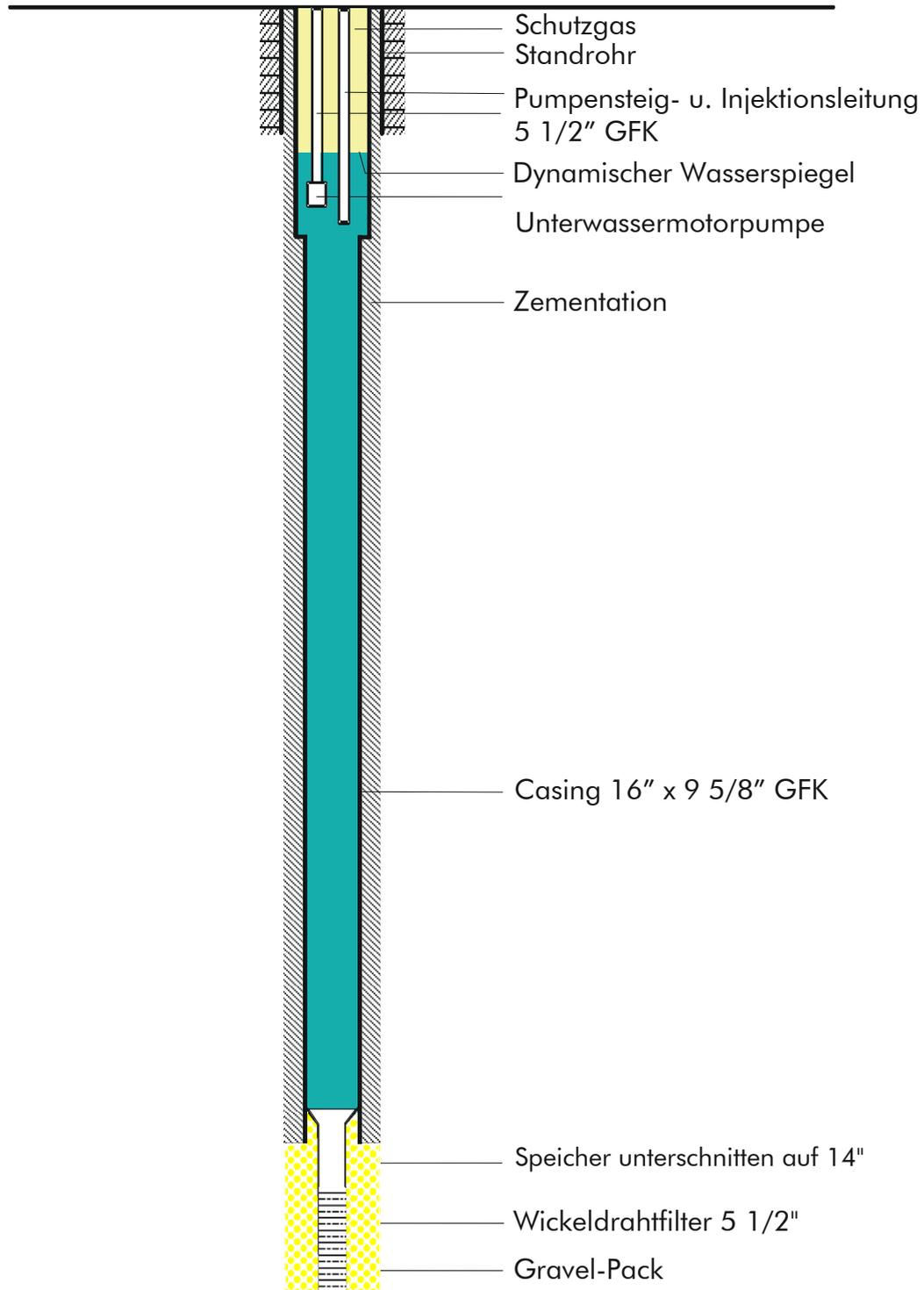


Abbildung 5-2: Wärmespeicherbohrung, Open-hole-Komplettierung mit Filter und Gravel-Pack

## 5.5 Kostenschätzung

In Tabelle 5-1 sind die geschätzten Kosten für die Erschließung entsprechend der aufgeführten Varianten aufgezeigt (in Euro - netto). In den Preisen sind die Pumpensteig- und Injektionsleitungen (5 1/2" GFK) enthalten, nicht jedoch die Tiefpumpen. Die Preise orientieren sich an aktuellen Weltmarktpreisen.

Tabelle 5-1: Kostenschätzung Wärmespeicherbohrungen

Variante	Sammelbohrplatz		Zwei Bohrplätze	
	WS Lüneburg 1	WS Lüneburg 2	WS Lüneburg 1	WS Lüneburg 2
Speicherhorizont	Obereozän	Obereozän	Obereozän	Obereozän
Bohrverlauf	seiger	seiger	seiger	seiger
Bohrlochlänge (m)	500	500	500	500
Bauzeit (Tage)	28	25	28	25
Bohrplatz mit Bohrkeller	130.000	20.000	100.000	100.000
Baustelleneinrichtung	60.000	60.000	80.000	80.000
Bohrarbeiten	415.000	385.000	415.000	385.000
Verrohrung	210.000	210.000	210.000	210.000
Zementation	80.000	80.000	80.000	80.000
Bohrlochmessung	30.000	30.000	30.000	30.000
Testausrüstung	45.000	20.000	45.000	35.000
Speicherreinigung und Test	75.000	75.000	75.000	75.000
Filterkomplettierung	120.000	120.000	120.000	120.000
Gravel-Pack	30.000	30.000	30.000	30.000
Stickstoffservice	20.000	20.000	20.000	20.000
Messservice	15.000	15.000	15.000	15.000
Probenahme und Laborleistungen	10.000	3.000	10.000	3.000
Dokumentation	3.000	3.000	3.000	3.000
Ingenieurleistungen	85.000	83.000	85.000	83.000
<b>Summe (netto)</b>	<b>1.328.000</b>	<b>1.154.000</b>	<b>1.318.000</b>	<b>1.269.000</b>
<b>Summe Dublette (netto)</b>	<b>2.482.000</b>		<b>2.587.000</b>	

## **6 Übertägiger Thermalwasserkreislauf**

### **6.1 Verfahrensbeschreibung**

Der übertägige Kreislauf des Wärmespeichers schafft die Verbindung zwischen der warmen und der kalten Bohrung und den Wärmeezeuger- und -abnehmeranlagen. Er enthält primär den Plattenwärmeübertrager zur Ein- bzw. Auskopplung von Wärme in bzw. aus dem Aquifer (Direkter Wärmeübergang). Des Weiteren sind Ausrüstungen erforderlich, welche der Verfahrenssicherheit dienen:

- Überdruckhaltung
- Vollhaltesystem
- Schutzgasbeaufschlagung von Bohrungsköpfen und übertägigem Kreislauf
- Partikelfiltration

Hydraulisch wird der Kreislauf durch die Unterwasserpumpen betrieben, die jeweils mit Frequenzstellern versehen sind. Deren Förderhöhe bemisst sich nach

- der erforderlichen Förderhöhe in der Bohrung,
- dem hydraulischen Verlust über die Rohrleitungen und Armaturen,
- dem Druckverlust über die Filter und Wärmetauscher,
- dem erforderlichen Injektionsdruck.

Des Weiteren ist es notwendig, an jeder Stelle des übertägigen Systems einen Überdruck gegen Atmosphäre vorzuhalten, um das chemische Gleichgewicht des Thermalwassers zu gewährleisten und den Sauerstoffzutritt in das System zu verhindern.

Das Thermalwasser wird aus der jeweiligen Bohrung mittels der unter dem dynamischen Wasserspiegel in den Bohrungen eingebauten Pumpen dem geologischen Speicher entnommen. Es durchläuft die erste Filterstufe und wird anschließend in die Wärmeübertragerstation transportiert und dort erwärmt bzw. abgekühlt. Dann wird es zurück zur jeweiligen Injektionsbohrung geleitet, aber vor Wiedereinleitung in den geologischen Horizont ein zweites Mal gefiltert.

Schaltungstechnisch ist die Richtungsumkehr des Systems, d. h. die Umschaltung von Einspeichern und Ausspeichern, derart zu realisieren, dass die Fließrichtung in den Wärmetauschern und in den Filtern unabhängig von der jeweiligen Betriebsart gleich bleibt.

An den Bohrungsköpfen erfolgt eine Umschaltung über Armaturengruppen, welche wahlweise

- den Förderbetrieb mit Wegeschaltung der Unterwassermotorpumpe
  - oder die Injektion mit Zuschaltung des Injektionsstranges realisieren.
-

Die Verbindungsleitungen zwischen den Bohrungen und der Wärmeübertragerstation werden direkt erdverlegt. Sie sind als Kunststoffmantelrohrsystem ausgelegt und mit einer Leckageüberwachung ausgerüstet.

Der übertägige Kreislauf wird in gleicher Weise wie die Ringräume der Bohrungen mit Stickstoff aufgelastet. Die Stickstoffversorgung wird über konventionelle Flaschenbatterien sichergestellt.

In einem Behälter wird Kreislaufwasser vorgehalten, um das System auch bei Anlagenstillstand voll und unter Überdruck zu halten. Dadurch wird auch in diesem Anlagenzustand der Zutritt von Luftsauerstoff permanent verhindert.

Die Aufstellfläche von Thermalwassereinrichtungen muss abgedichtet und mit separaten Bodeneinläufen, die in eine dichte, abflusslose Grube führen, versehen sein. Die Grube ist derart groß, dass sie neben den Leckagewässern auch ein komplettes Bohrlochvolumen aufnehmen kann.

Die folgenden Abbildungen zeigen die prinzipielle Gestaltung und die beiden differierenden Fahrweisen in grundsätzlicher Form.

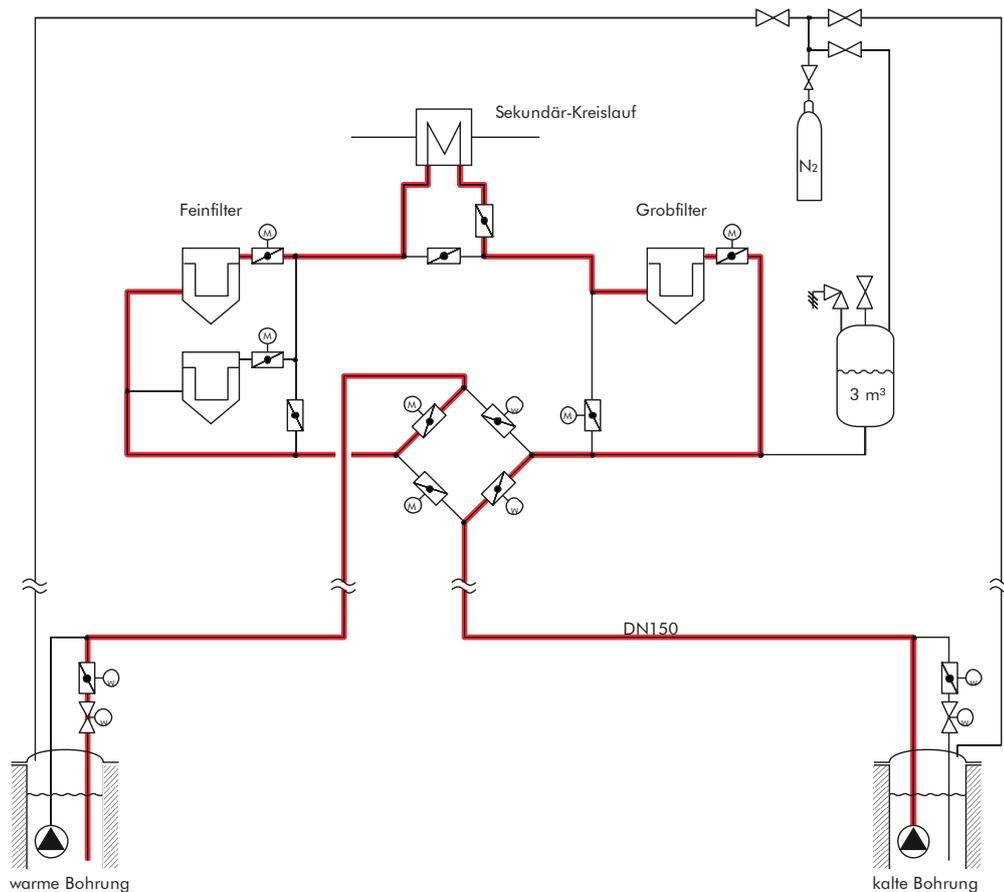


Abbildung 6-1: Prinzipschema des Thermalwasserkreislaufes (Sommerbetrieb)

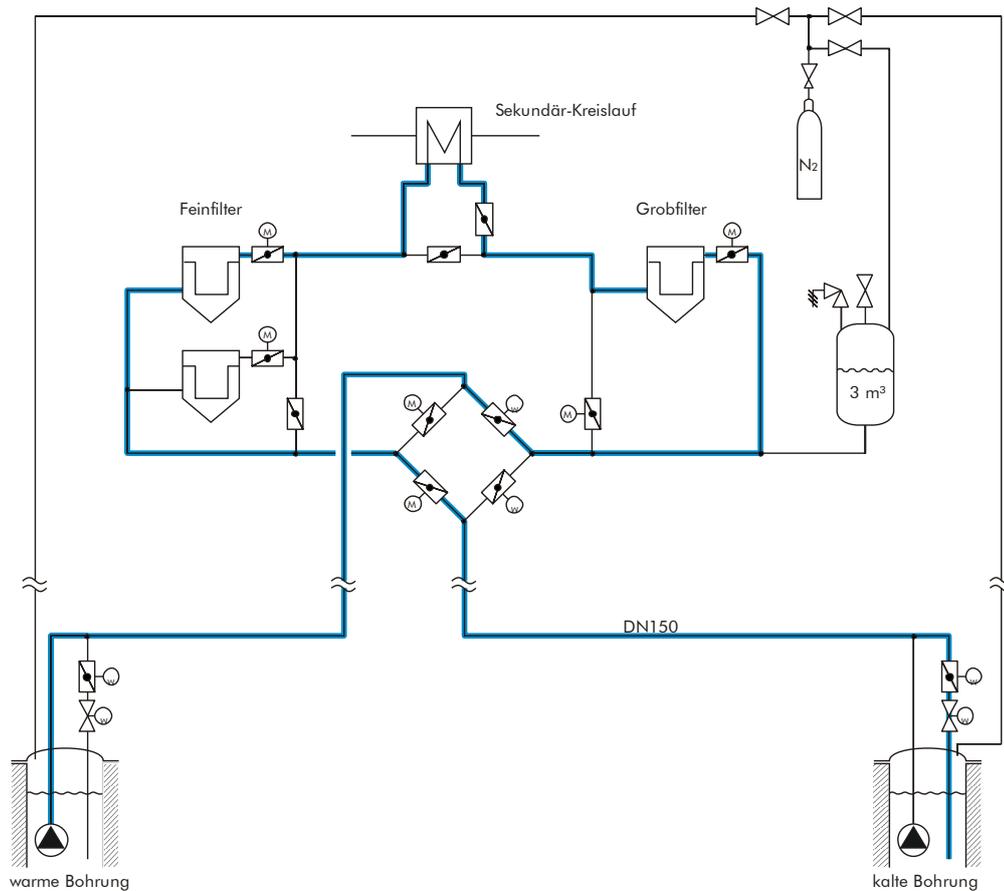


Abbildung 6-2: Prinzipschema des Thermalwasserkreislaufes (Winterbetrieb)

Auf der Basis der Modellierung des Anlagenbetriebes und des Aquiferspeichers ergibt sich unter aktuellen Wärmeabnahmekonditionen ein sinnvoller Auslegungsvolumenstrom von deutlich  $< 50 \text{ m}^3/\text{h}$ . Um zukünftige Entwicklungen nicht zu begrenzen, werden  $50 \text{ m}^3/\text{h}$  als Basis der Kostenschätzung verwendet.

Leit-ausrüstungen als Kalkulationsbasis:

- Richtnennweite DN 125 ( $50 \text{ m}^3/\text{h}$ )
- Erdverlegte Rohrleitungen KMR mit GFK-Innenliner und Lecküberwachung)
- Rohrleitungen GFK, PN 16 mit aufgebundener Mineralwolleisolierung und Blechmantel
- Plattenwärmetauscher geschraubter Apparat mit Titanplatten
- Absperrarmaturen Membranventile
- Stellarmaturen konventionell, aber zumindest 1.4571
- Druckbehälter Stahl gummiert
- Slopbehälter GFK

## **6.2 Lage und Platzbedarf der technischen Anlagen**

Die Lage der technischen Anlagen des Thermalwasserkreislaufes im Gelände ist in Abbildung 6-3 und Abbildung 6-4 dargestellt. Wie bereits unter Abschnitt 5 beschrieben, werden die beiden Varianten „Separate Bohrplätze“ und „Sammelbohrplatz“ unterschieden.

Auf den Bohrplätzen selbst sind konzeptgemäß keine Baulichkeiten errichtet. Die wenigen Installationen an den Bohrungsköpfen (im Wesentlichen Absperrorgane und Sensoren sowie Schutzgassystem) werden in den Bohrungskellern untergebracht.

Alternativ können bei ebenerdiger Anordnung der Bohrungsköpfe auch ein bzw. zwei leichte, demontierbare Gebäude oder Container (möglichst mit Kran in einem Teil beiseite zu heben) installiert werden. Dies ist aber nicht kostenrelevant, da die entsprechenden Mehrkosten durch Einsparung am Kellervolumen ausgeglichen werden.

Die Bohrungsköpfe sind jeweils über eine erdverlegte Trasse (Thermalwasserleitungen, Stickstoffleitung, Elektro- und Sensorkabel) mit dem Technikgebäude für den Thermalwasserkreislauf verbunden. Dieses soll, ohne das ein konkreter Platz bereits vorgesehen ist, in bzw. an der vorhandenen Heizzentrale errichtet werden.

Das Technikgebäude (-raum) für den Thermalwasserkreislauf dient der Aufnahme der zentralen Elemente des Speichers (Wärmetauscher, Filter, Druckhaltung, Stickstoffanlage, Trafos und Frequenzumrichter für die beiden Tiefpumpen, Automatisierung etc.). Auch die sekundärseitige Anbindung (Pumpen, Armaturen, Rohrleitungen) soll konzeptgemäß darin untergebracht werden. Insgesamt ist das Bauvolumen mit ca. 400 m<sup>3</sup> abzuschätzen (12 m \* 8 m \* 4 m Höhe).



Abbildung 6-3: Anordnung der Installationen des Aquiferwärmespeichers (zwei separate Bohrplätze)



Abbildung 6-4: Anordnung der Installationen des Aquiferwärmespeichers (Sammelbohrplatz)

### 6.3 Investitionen

Tabelle 6-1: Investitionen in den übertägigen Thermalwasserkreislauf

Variante	Sammelbohrplatz	Zwei Bohrplätze
Unterswassermotorpumpen	131.000 €	131.000 €
Erdverlegte Trasse (Thermalwasser, Stickstoff, Kabel)	34.900 €	287.000 €
Übertageinstallationen Warme Bohrung		
Armaturen und Zubehör	16.000 €	16.000 €
Rohrleitungen und Zubehör	11.400 €	11.400 €
Übertageinstallationen Kalte Bohrung		
Armaturen und Zubehör	12.600 €	12.600 €
Rohrleitungen und Zubehör	14.300 €	14.300 €
Installationen im Gebäude für den Thermalwasserkreislauf		
Ausrüstungen und Zubehör	128.000 €	128.000 €
Rohrleitungen und Zubehör	29.100 €	29.100 €
Armaturen und Zubehör	18.800 €	18.800 €
Slopanlage		
Slopbehälter	25.000 €	25.000 €
Rohrleitungen, Armaturen, Pumpe	5.600 €	5.600 €
MSR-Technik		
Messtechnik	61.400 €	61.400 €
Automatisationsanlage	93.000 €	93.000 €
Elektrotechnik	94.300 €	94.300 €
Gebäudeanpassungen	156.000 €	156.000 €
Sonstiges (Baustelleneinrichtung, Stahlbau, Inertisierung, Druckprüfung, Inbetriebnahme, Dokumentation, etc.)	25.400 €	31.300 €
Ingenieurleistungen	123.000 €	148.200 €
<b>Summe (netto)</b>	<b>979.800 €</b>	<b>1.263.000 €</b>

## **7 Einbindung der Aquiferspeicher in das Wärmeversorgungssystem**

### **7.1.1 Verfahrensbeschreibung**

In unmittelbarer Nähe zur warmen Bohrung des Aquiferwärmespeichers und des Technikgebäudes für den Speicher wird in vorhandenen und vor allem an den Umgang mit mineralisiertem Thermalwasser anzupassenden Räumlichkeiten eine Heizzentrale errichtet, von der aus die Versorgungsnetze Campus, Neubau Zentralgebäude und Bockelsberg bedient werden. Im Zentrum der Energieanlage steht ein mit Biomethan betriebenes Blockheizkraftwerk. Es besteht aus zwei Maschinen, von denen jede einzelne im Vollastzustand folgende Parameter aufweist:

- Stromerzeugung 527 kW
- Wärme 671 kW
- Gaseinsatz 1.322 kW

Anders als bei konventionellen Anlagen üblich, und so aktuell auch am Standort praktiziert, soll im Sommer und der Übergangszeit von der direkt wärmegeführten Fahrweise der BHKW abgegangen werden. Die Maschinen fahren also stromgeführt und erzeugen zeitweise einen Wärmeüberschuss, der begrenzt wird durch die Aufnahmefähigkeit des Aquifers. Diese ergibt sich aus

- dem maximalen Thermalwasserstrom von 50 m<sup>3</sup>/h,
- der maximalen Einspeichertemperatur von 90 °C und
- der mittleren Injektionstemperatur des letzten Winters (entspricht grob der mittleren winterlichen Heiznetzrücklauf­temperatur).

In Abbildung 7-1 ist der Grundaufbau der Energieerzeugeran­lage dargestellt.

Dem BHKW beigestellt ist ein Kurzzeit-Pufferspeicher, der die Bedarfscharakteristik der Wärmeabnehmer von der Betriebsweise des BHKW entkoppelt und so unnötige Regelvorgänge vermeidet. Der Aquiferspeicher ist auf Grund seiner Trägheit nicht in der Lage, diese Aufgabe zu erfüllen. Abgeleitet aus der konventionellen Betriebsweise der BHKW hat dieser Speicher eine Größe von 50 m<sup>3</sup>. Energetische Optimierungen, die im GeoForschungszentrum Potsdam durchgeführt wurden, verweisen darauf, dass im Falle der Installation eines Aquiferspeichers diese Größe auf 100 m<sup>3</sup> angehoben werden sollte.

Im Sommerbetrieb (Einspeicherung) belädt das BHKW, wie bisher auch geschehen, den Pufferspeicher auf dem Temperaturniveau von 95 °C (Auslegung). Alle Abnehmer entnehmen andererseits aus dem Pufferspeicher entsprechend ihres recht geringen Bedarfes. Da das BHKW in der stromgeführten Fahrweise nicht mehr auf den Ladezustand des Pufferspeichers reagiert, besteht die Tendenz, dass der Behälter überfüllt wird. Dem wirkt eine

---

Pumpe entgegen, die ladezustandsgeführt Heißwasser entnimmt und einem Wärmetauscher zuführt, der die Wärme an den Aquiferspeicher übergibt. Ein Ansteigen der Temperatur am unteren Ende des Pufferspeichers über eine zulässige Zulauftemperatur zu den BHKW (hier 60 °C) kann so zuverlässig verhindert werden.

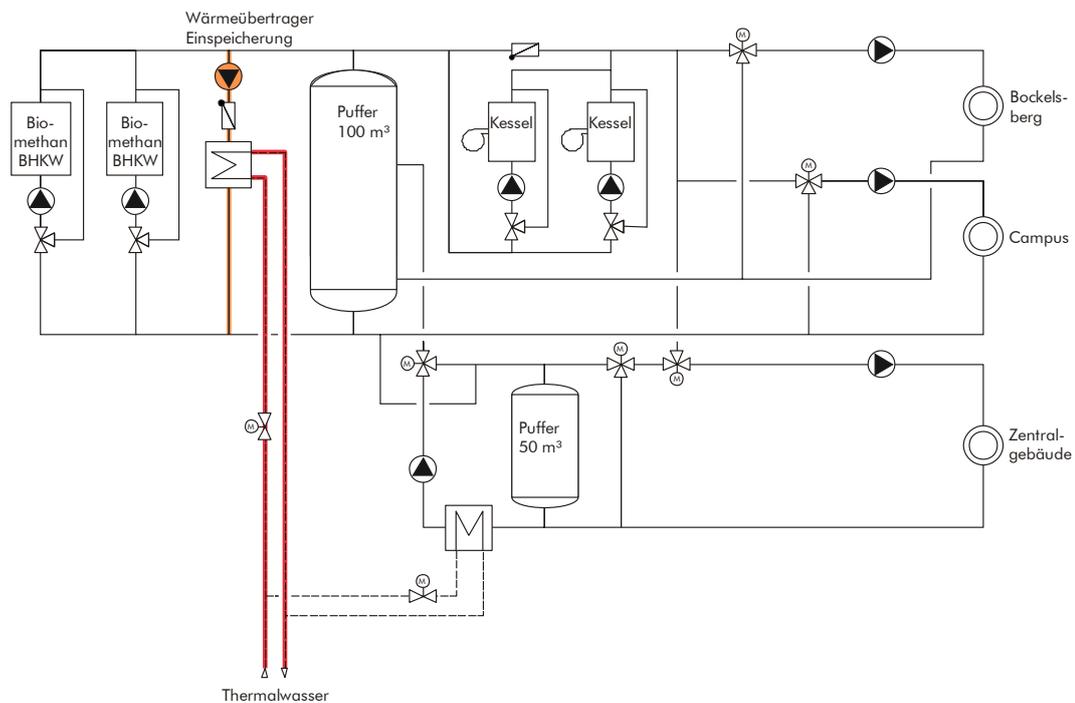


Abbildung 7-1: Prinzipschema im Einspeicherzustand

Im Winterbetrieb (Wärmeauspeicherung) erzeugt das BHKW im Tagesmittel weniger Wärme, als von den Abnehmern nachgefragt wird. Die Differenz oder ein Teil davon wird nun dem Aquiferspeicher entnommen. Dies geschieht in einem Wärmeübertrager, der parallel zum Heizungssystem, das das Zentralgebäude auf niedrigem Temperaturniveau versorgt, angeordnet ist. So ist gesichert, dass der Wärmeübertrager jederzeit mit der im Gesamtsystem denkbar geringsten Rücklauftemperatur beaufschlagt wird.

Je nach Lastsituation in den unterschiedlichen Abnehmersystemen und Ladezustand der beiden Pufferspeicher sind verschiedene Fahrweisen denkbar, die der Vergleichmäßigung der Speicherfahrweise mit Einhaltung der Betriebsgrenzen der Tiefpumpe im Speicherkreislauf und minimaler Injektionstemperatur dienen. Die folgenden Abbildungen stellen diese wesentlichen Betriebsweisen dar.

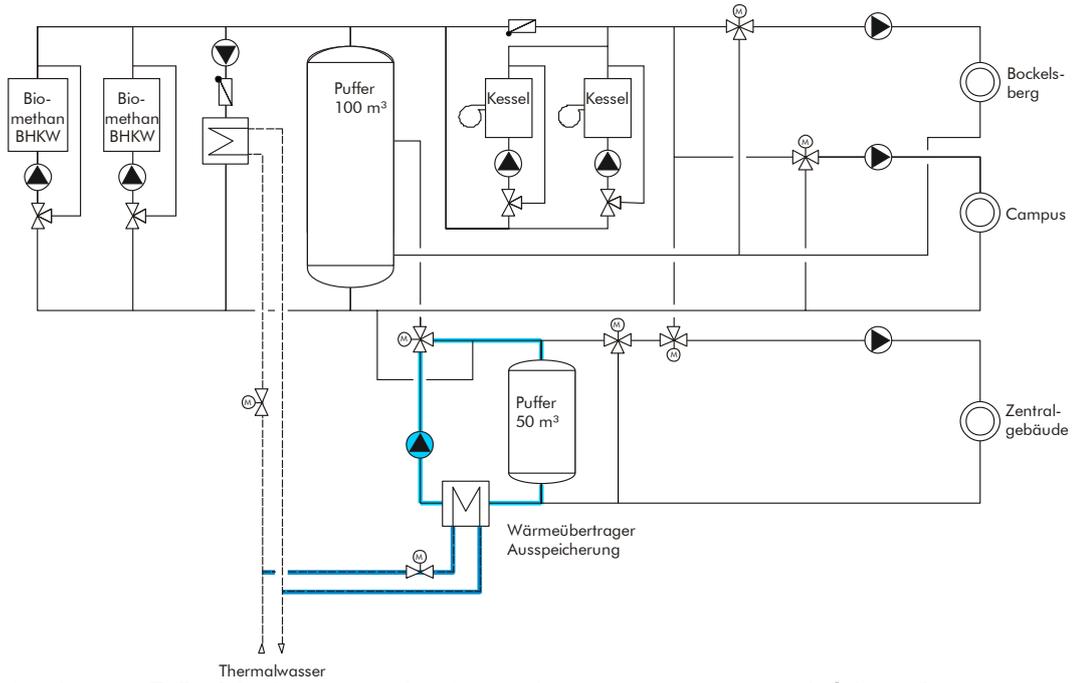


Abbildung 7-2: Prinzipschema im Ausspeicherzustand, ausschließliche Beladung des NT-Pufferspeichers

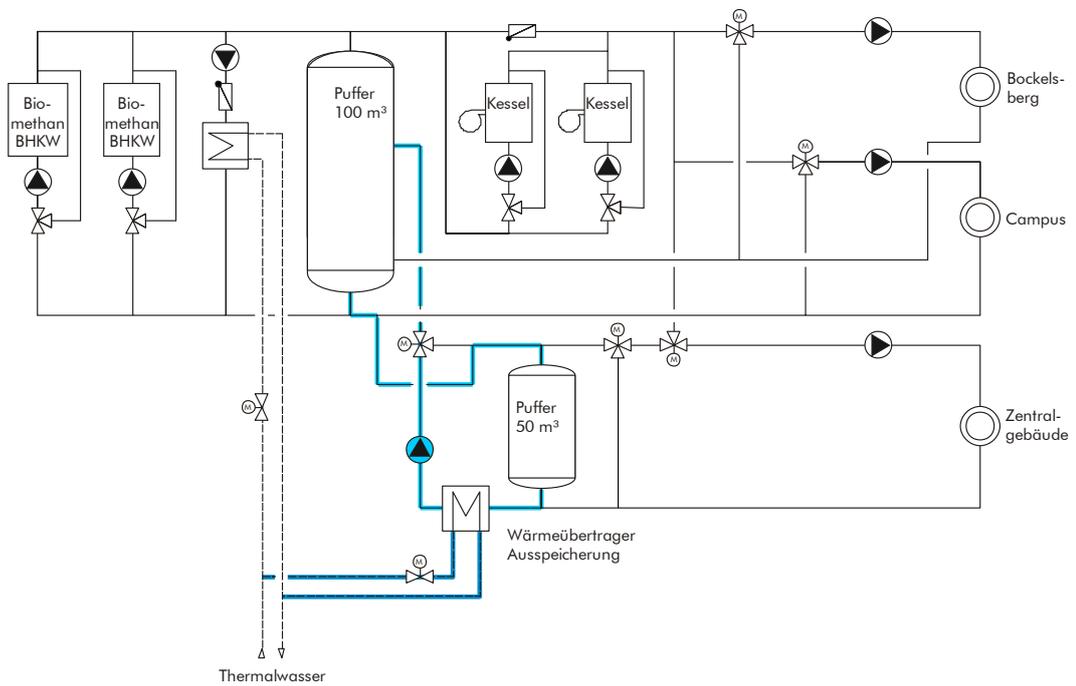


Abbildung 7-3: Prinzipschema im Ausspeicherzustand, ausschließliche Beladung des HT-Pufferspeichers

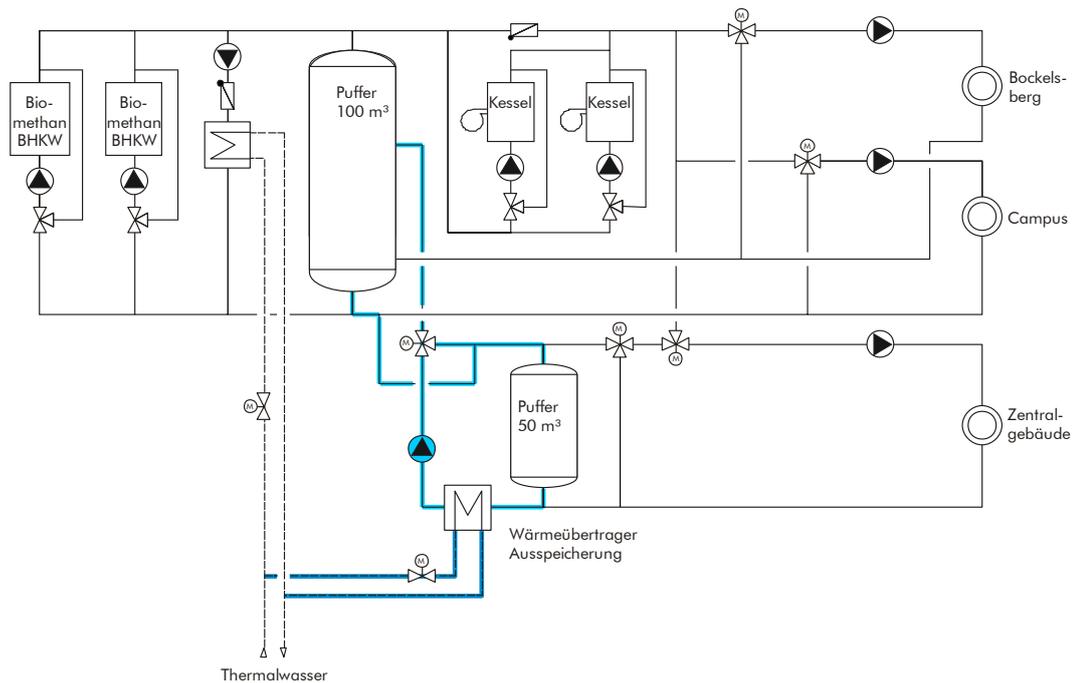


Abbildung 7-4: Prinzipschema im Ausspeicherzustand, Bedienung sowohl des NT- als auch des HT-Pufferspeichers

### 7.1.2 Investitionen

Die folgenden Positionen beinhalten nicht die notwendigen Anpassungs- und Anbindungsinstallationen auf der Abnehmerseite (Verteiler, Anbindung an die Verteiler, Umwälzung, Druckhaltung, zugehörige E-Technik, Regelung und Überwachung) sowie Investitionen in das Fernwärmenetz. Diese werden als Sowieso-Kosten bewertet.

Tabelle 7-1: Investitionen in die Einbindung des Aquiferspeichers

	<b>Investitionen</b>
Installationen im Gebäude für den Thermalwasserkreislauf	
Ausrüstungen und Zubehör	101.000 €
Rohrleitungen und Zubehör	9.200 €
Armaturen und Zubehör	13.600 €
MSR-Technik	
Messtechnik	9.200 €
Automatisationsanlage	22.000 €
Elektrotechnik	4.900 €
Gebäudeanpassungen	40.000 €
Sonstiges (Baustelleneinrichtung, Stahlbau, Inertisierung, Druckprüfung, Inbetriebnahme, Dokumentation, etc.)	5.700 €
Ingenieurleistungen	30.000 €
<b>Summe (netto)</b>	<b>235.600 €</b>

## 8 Energetische Bilanzierung

### 8.1 Ohne Berücksichtigung eines Aquiferwärmespeichers

- Mit den unter 3.1.1 und 3.2.1 definierten Bedarfszahlen,
- mit den Parametern des in Abschnitt 7.1.1 beschriebenen BHKW und
- einem Wirkungsgrad des Spitzenlastkessels von 85 %

werden jeweils die Anteile der einzelnen Wärmeerzeuger an der Bedarfsdeckung unterhalb der ungeordneten Jahres-Wärmebedarfskurven, die Stromerzeugung des wärmegeführten BHKW sowie der Primärenergieeinsatz für die Energieerzeugung ermittelt.

Die Bilanzierung geschieht über 8.760 Stunden im Jahr. Stillstandszeiten werden in dieser Phase der Betrachtung nicht berücksichtigt.

### 8.2 Variante 1 - Aktueller Status

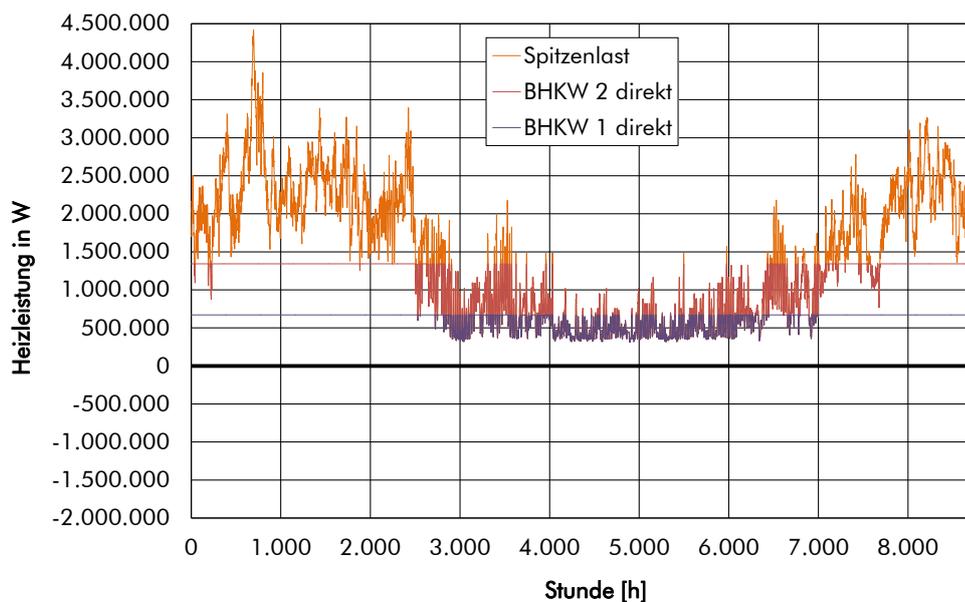


Abbildung 8-1: Anteile der einzelnen Erzeuger an der Gesamtwärmeerzeugung

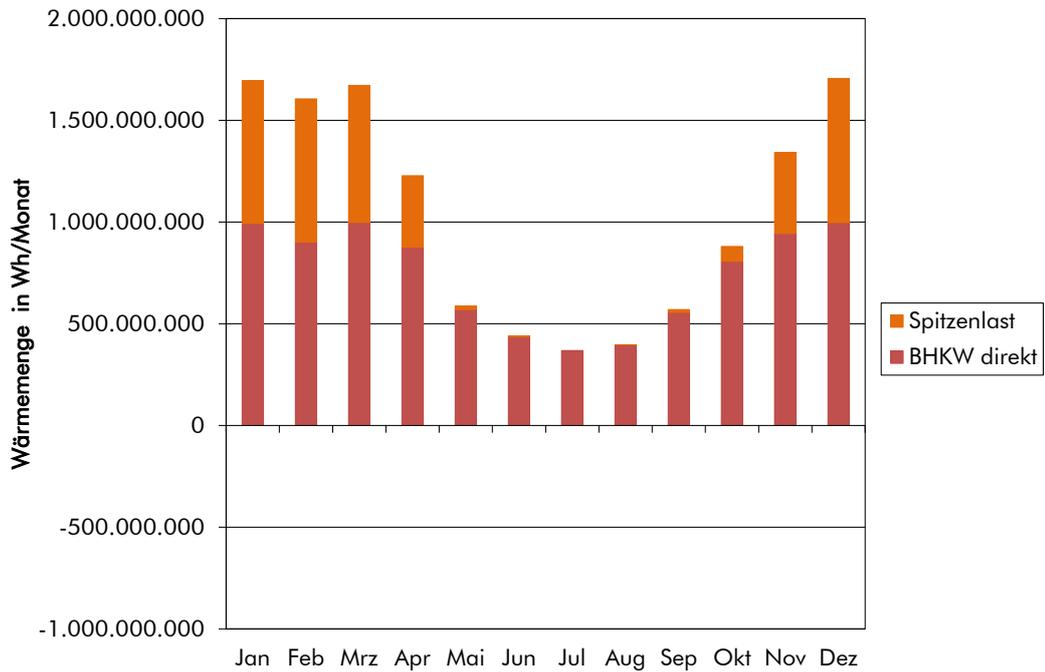


Abbildung 8-2: Anteile der einzelnen Erzeuger an der Gesamtwärmeerzeugung

### 8.3 Variante 2 – Verbesserung der Energieeffizienz im Heizsystem für den Uni-Campus

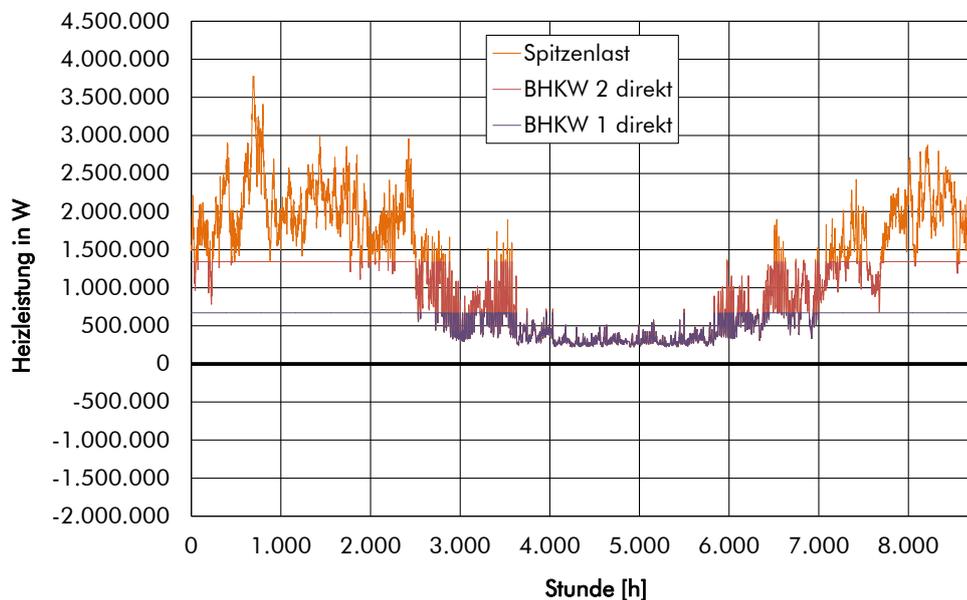


Abbildung 8-3: Anteile der einzelnen Erzeuger an der Gesamtwärmeerzeugung

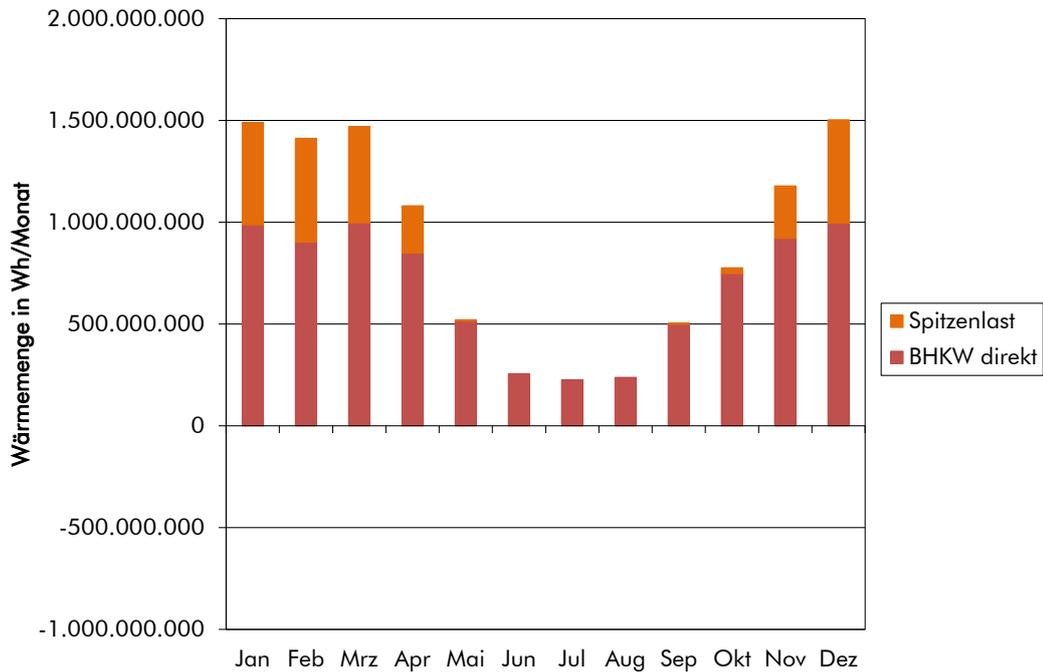


Abbildung 8-4: Anteile der einzelnen Erzeuger an der Gesamtwärmeerzeugung

### 8.3.1 Zusammenfassung

Tabelle 8-1: Zusammenfassung der Ergebnisse der energetischen Bilanzierung

	Variante 1	Variante 2
Wärmeerzeugung gesamt (MWh/a)	12.485	10.652
davon BHKW direkt	8.962	8.533
davon Spitzenlastkessel	3.523	2.119
Stromerzeugung BHKW (MWh/a)	7.039	6.702
Energieträger (MWh/a)		
Bio-Erdgas	17.657	16.812
Erdgas	4.144	2.493

### 8.4 Mit Integration des Aquiferwärmespeichers

- Mit den unter 3.1.1 und 3.2.1 definierten Bedarfszahlen,
- mit den unter 3.1.2 und 3.2.2 definierten Heiznetztemperaturen,
- mit den Parametern des in Abschnitt 7.1.1 beschriebenen BHKW,
- mit dem in Abschnitt 4 modellierten thermischen Verhalten des Aquifer-speichers,
- mit den in Abschnitt 2.5.2 benannten hydraulischen Parametern des Nutzhorizontes,
- mit einer Einspeichertemperatur von 90 °C und einem maximalen Einspeichervolumenstrom von 30 m<sup>3</sup>/h,

- mit einer Einspeicherperiode zwischen April und Oktober und einer Ausspeicherperiode zwischen November und März,
- einem Wirkungsgrad des Spitzenlastkessels von 85 %,
- einem Pumpen-Gesamtwirkungsgrad von 65 %,

werden jeweils die Anteile der Wärmeerzeuger BHKW, Wärmespeicher und Spitzenlastkessel an der Bedarfsdeckung unterhalb der ungeordneten Jahres-Wärmebedarfskurven, die Stromerzeugung des stromgeführten BHKW sowie der Primärenergieeinsatz für die Energieerzeugung ermittelt.

Die Bilanzierung geschieht über 8.760 Stunden im Jahr. Stillstandszeiten werden in dieser Phase der Betrachtung nicht berücksichtigt.

Die Berechnungen werden für jede der beiden Variante 1 (aktueller Bedarfsstatus) und 2 (Verbesserung der Energieeffizienz im Heizsystem für den Uni-Campus) in einem ersten Schritt für die beiden verschiedenen Anordnungen der warmen und kalten Bohrungen des Aquiferspeichers (zwei getrennte Bohrplätze bzw. ein Sammelbohrplatz, vgl. Abschnitte 5.1.2 und 6.2) angestellt. Für die sich dabei als jeweils energetisch günstiger darstellende Bohrungsanordnung werden dann aus Gründen der Maximierung des Speichereffektes Variationen in der Berechnung des Aquiferspeichers und in der Mengenstromführung bei Ausspeicherung (Begrenzung der maximalen Menge) durchgeführt.

## 8.4.1 Variante 1 - Aktueller Status

### 8.4.1.1 Vergleich des energetischen Verhaltens von Aquiferwärmespeichern mit zwei Bohrplätzen bzw. einem Sammelbohrplatz

Beide Varianten wurden unter der Rahmenbedingung modelliert, dass der maximale Volumenstrom im Ausspeicherfall auf 30 m<sup>3</sup>/h begrenzt ist.

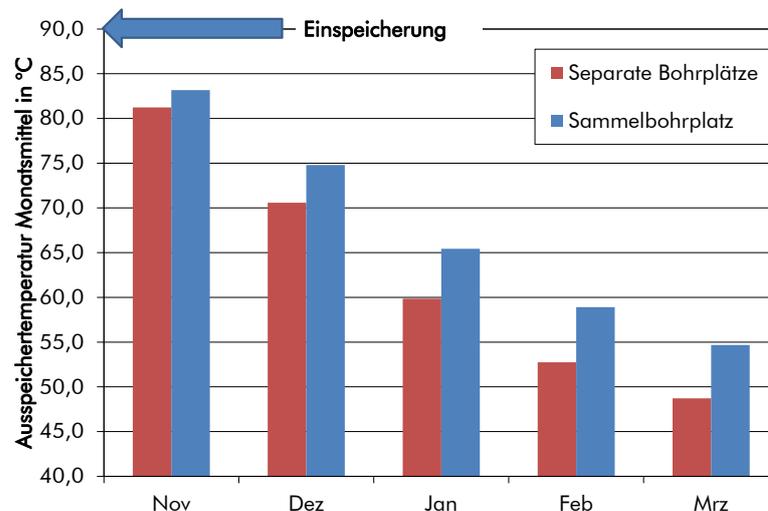


Abbildung 8-5: Vergleich der Ausspeichertemperaturen

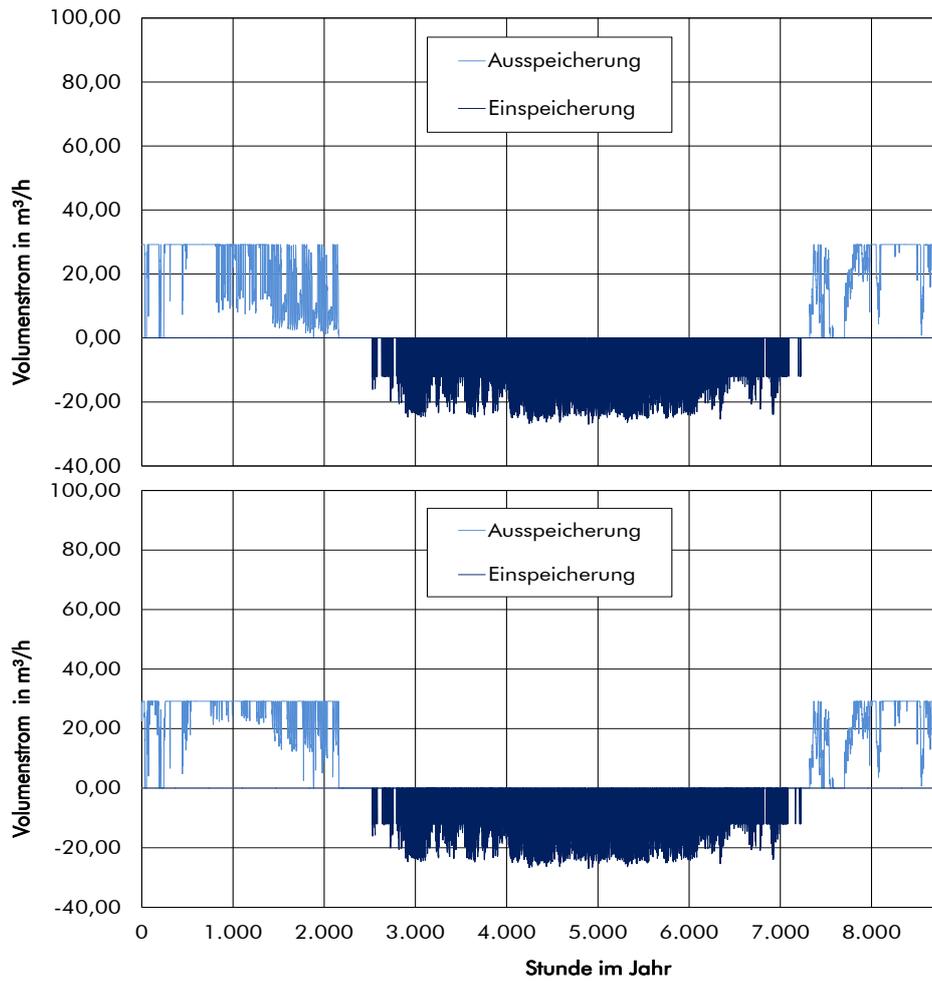


Abbildung 8-6: Vergleich der ein- und ausgespeicherten Volumenströme (Sammelbohrplatz unten)

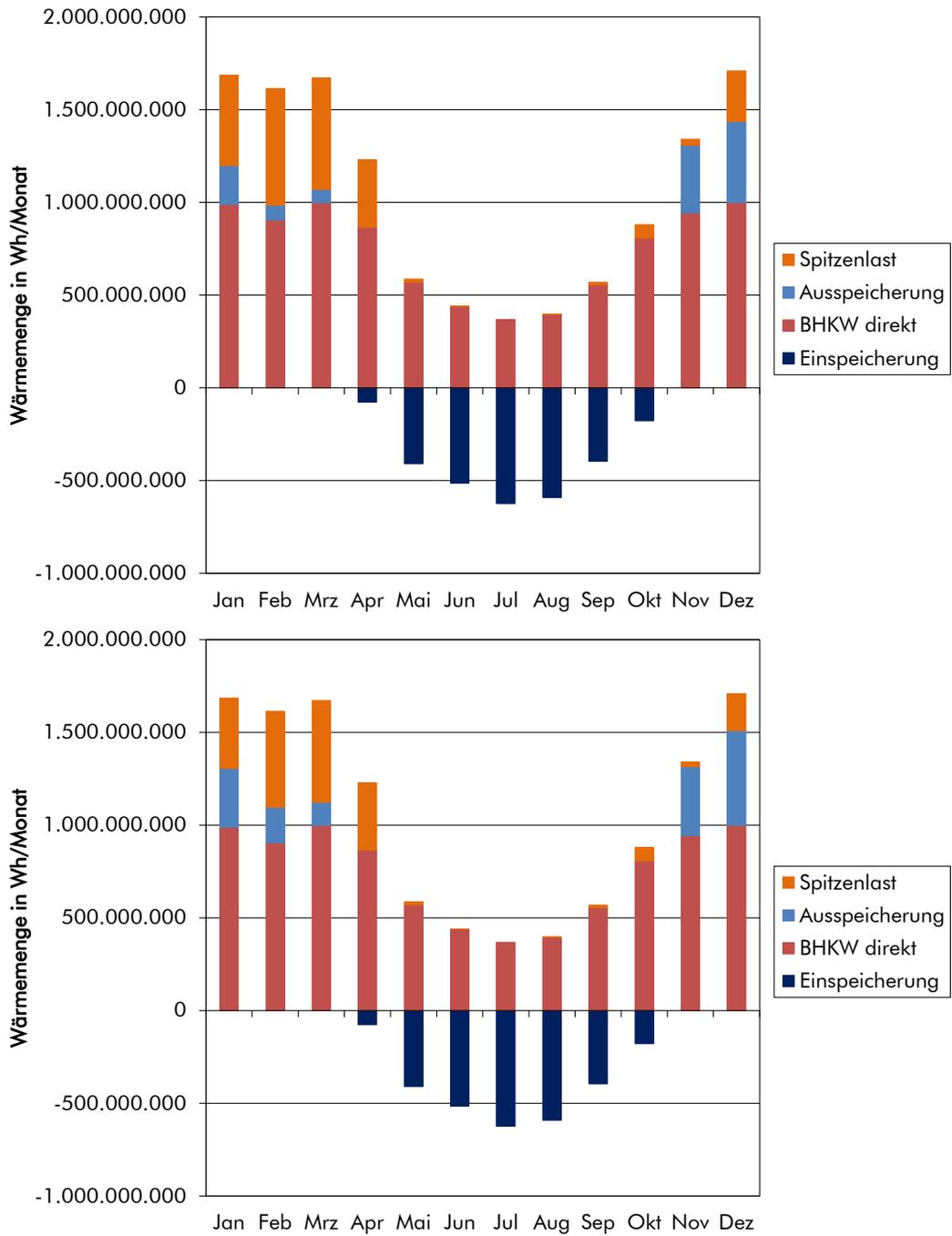


Abbildung 8-7: Vergleich der Anteile der Einzelerzeuger an der Wärmebedarfsdeckung (Sammelbohrplatz unten)

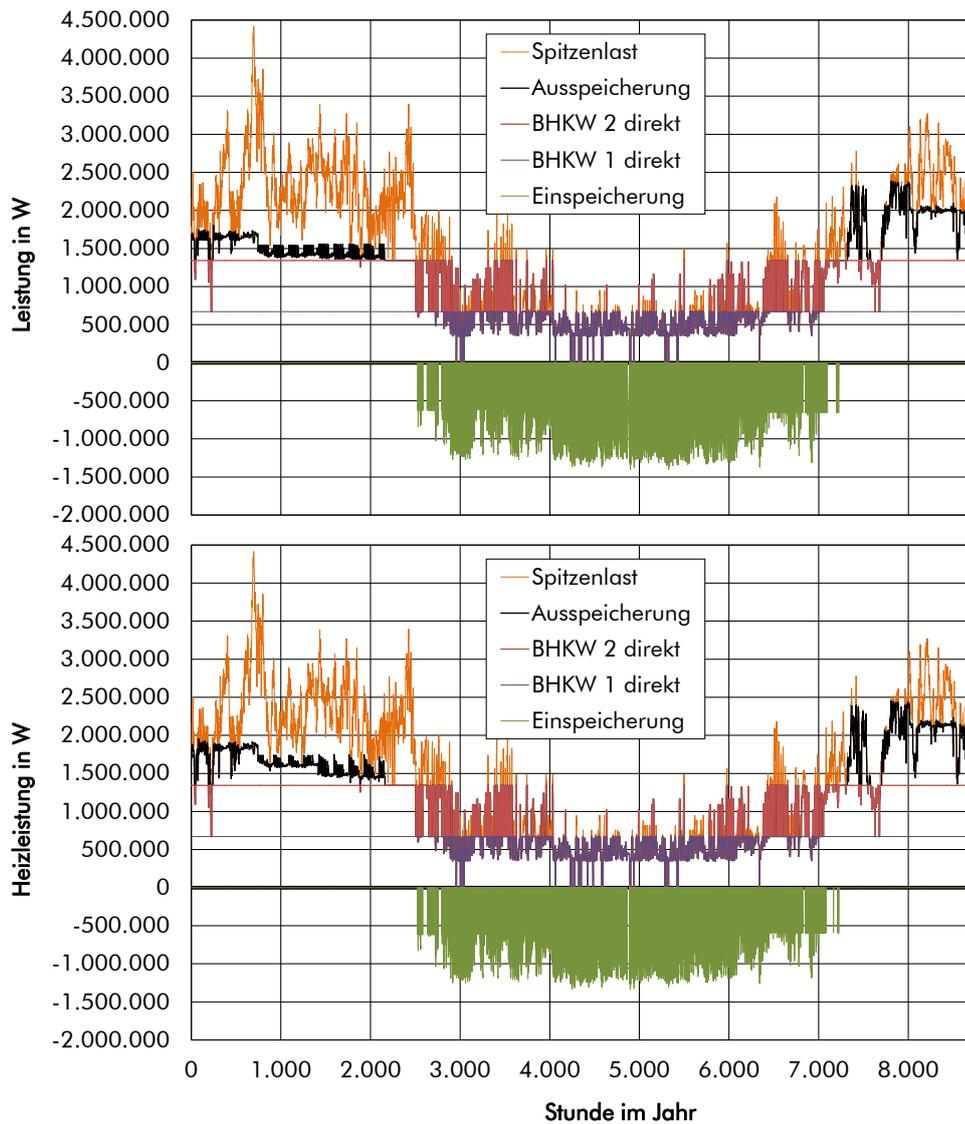


Abbildung 8-8: Vergleich der Anteile der Einzelerzeuger an der Wärmebedarfsdeckung (Sammelbohrplatz unten)

Tabelle 8-2: Zusammenfassung der Ergebnisse der energetischen Bilanzierung

	<b>Separate Bohrplätze</b>	<b>Sammelbohrplatz</b>
Wärmebedarf gesamt (MWh/a)	12.485	12.485
davon BHKW direkt	8.962	8.962
davon Ausspeicherung	1.163	1.516
davon Spitzenlastkessel	2.360	2.007
Stromerzeugung BHKW (MWh/a)	9.233	9.233
Energieträger (MWh/a)		
Bio-Erdgas	23.161	23.161
Erdgas	2.776	2.361
Eigenstrom	92	98

Durch die Anwendung eines geringeren Bohrungsabstandes im Speicherbereich (Sammelbohrplatz) steigen bei analoger Speicherbeladung die Ausspeichertemperaturen (vgl. Abbildung 8-5). Dies führt zu einer besseren Speichernutzung bei nur geringfügig höherem Aufwand für den Betrieb des Aquiferspeichers. Der Gaseinsatz im Spitzenlastkessel sinkt um ca. 15 %, während der Einsatz von Strom für den Eigenbedarf nur um ca. 6 % steigt. Bewertet mit den Energieträgereinkaufspreisen aus Abschnitt 9.1.2 führt das zu einem jährlichen Betriebskostenvorteil von ca. 16.000 Euro.

Berücksichtigt man darüber hinaus die geringeren Investitionen im Falle des Sammelbohrplatzes, ist die Entscheidung über die zu präferierende Systemgestaltung eindeutig.

#### 8.4.1.2 Weitere Optimierung des energetischen Verhaltens des Aquiferwärmespeichers mit einem Sammelbohrplatz

Tabelle 8-3: Zusammenfassung der Ergebnisse der energetischen Bilanzierung

Begrenzung des Ausspeichervolumenstromes	25 m <sup>3</sup> /h	30 m <sup>3</sup> /h	35 m <sup>3</sup> /h
Wärmeerzeugung BHKW gesamt (MWh/a)	11.755	11.755	11.755
davon Einspeicherung	2.793	2.793	2.793
Wärmebedarf gesamt (MWh/a)	12.485	12.485	12.485
davon BHKW direkt	8.962	8.962	8.962
davon Ausspeicherung	1.650	1.623	1.612
davon Spitzenlastkessel	1.873	1.900	1.911
Stromerzeugung BHKW (MWh/a)	9.233	9.233	9.233
Speicher-Rückgewinnungsgrad	0,59	0,58	0,58
Energieträger (MWh/a)			
Bio-Erdgas	23.161	23.161	23.161
Erdgas	2.204	2.235	2.248
Eigenstrom	87	95	99

Die Einführung einer realitätsnäheren Dispersion in die Modellierung des Untergrundes (vgl. Abschnitt 4) führt bei analoger Begrenzung des Ausspeichervolumenstromes (max. 30 m<sup>3</sup>/h) zu einer Erhöhung des Speicher-Rückgewinnungsgrades (von 1.516 MWh/a (54 %) auf 1.623 MWh/a (58 %)).

Ein auf 25 m<sup>3</sup>/h begrenzter Ausspeichervolumenstrom verbessert die Speichereinbindung weiter leicht auf einen Rückgewinnungsgrad von 59 % (1.650 MWh/a). Die jährlich entnommene Wassermenge sinkt (Abbildung 8-10, Abbildung 8-11) und folglich fällt die Rückgewinnungstemperatur zum Ende der Ausspeicherphase im März nicht so stark ab (Abbildung 8-9). Der Temperaturanstieg gegenüber der Variante mit höheren zugelassenen Ausspeichervolumenströmen überkompensiert die Mindermenge.

Für die weiteren Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen wird die Lösung mit einer Volumenstrombegrenzung auf 25 m<sup>3</sup>/h gewählt.

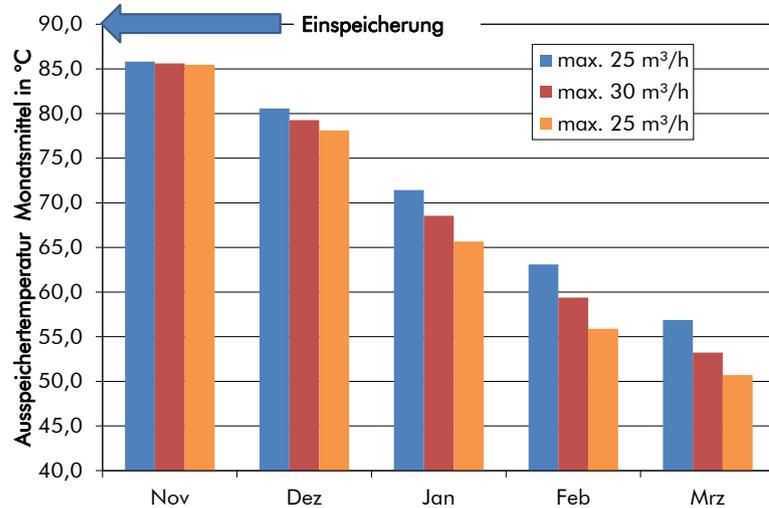


Abbildung 8-9: Vergleich der Ausspeichertemperaturen

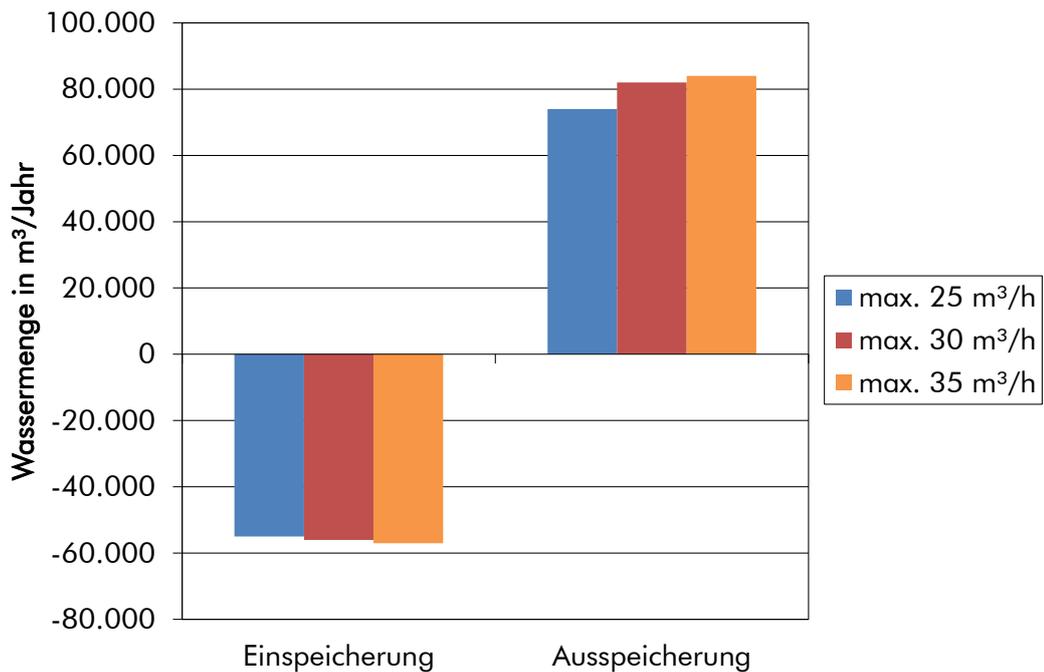


Abbildung 8-10: Vergleich der ein- und ausgespeicherten Wassermengen

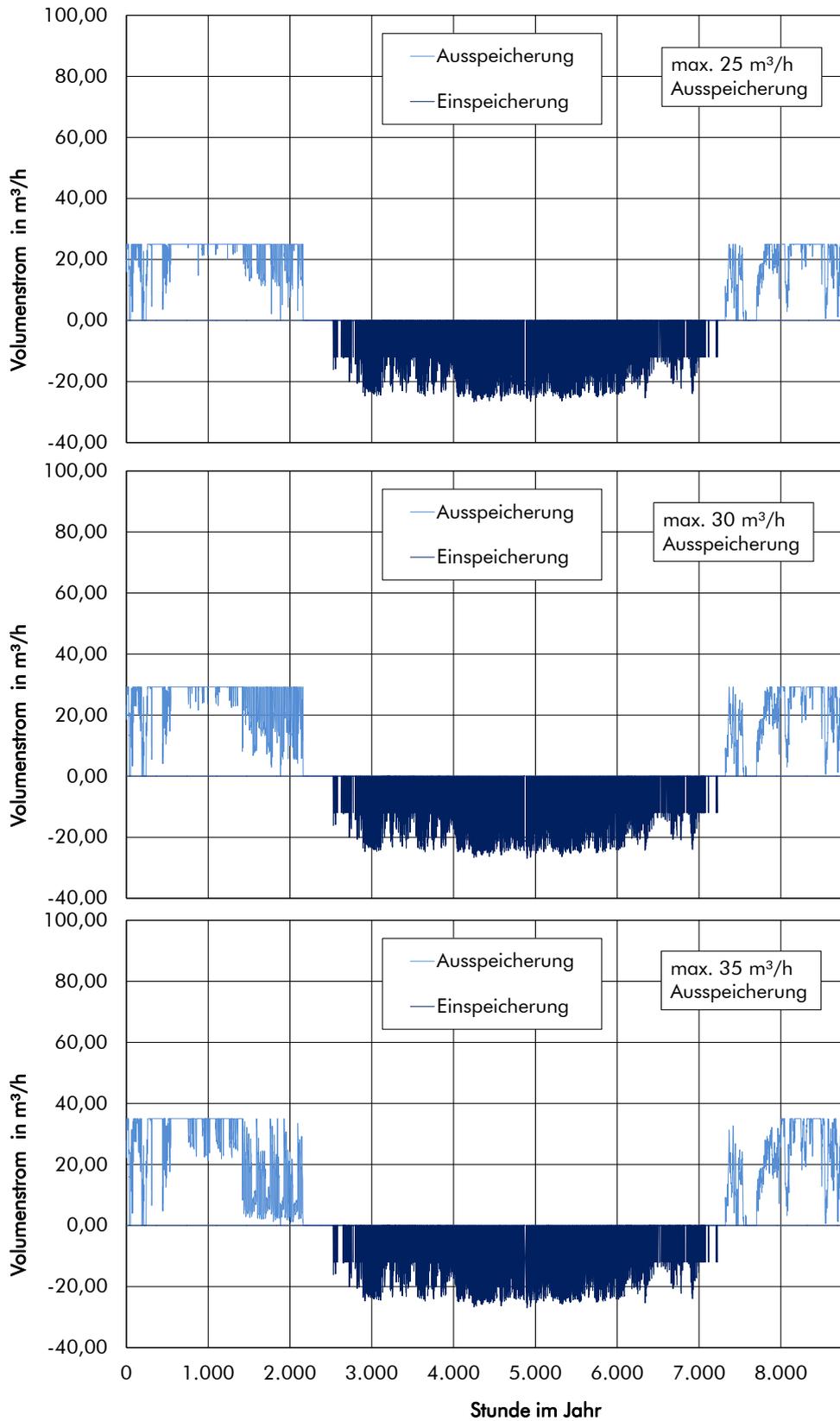


Abbildung 8-11: Vergleich der ein- und ausgespeicherten Volumenströme

## 8.5 Variante 2 – Verbesserung der Energieeffizienz im Heizsystem für den Uni-Campus

### 8.5.1.1 Vergleich des energetischen Verhaltens von Aquiferwärmespeichern mit zwei Bohrplätzen bzw. einem Sammelbohrplatz

Beide Varianten wurden unter der Rahmenbedingung modelliert, dass der maximale Volumenstrom im Ausspeicherfall auf die Summe der Heiznetzströme in Richtung Uni-Campus und Zentralgebäude begrenzt ist.

Tabelle 8-4: Zusammenfassung der Ergebnisse der energetischen Bilanzierung

	<b>Separate Bohrplätze</b>	<b>Sammelbohrplatz</b>
Wärmebedarf gesamt (MWh/a)	10.652	10.652
davon BHKW direkt	8.533	8.533
davon Ausspeicherung	1.537	1.755
davon Spitzenlastkessel	582	364
Stromerzeugung BHKW (MWh/a)	9.233	9.233
Energieträger (MWh/a)		
Bio-Erdgas	23.096	23.096
Erdgas	685	428
Eigenstrom	105	92

Durch die Anwendung eines geringeren Bohrungsabstandes im Speicherbereich (Sammelbohrplatz) steigen bei analoger Speicherbeladung wiederum wie bei Variante 1 die Ausspeichertemperaturen (vgl. Abbildung 8-12). Dies führt zu einer besseren Speichernutzung. Der Gaseinsatz im Spitzenlastkessel sinkt um ca. 20 % und der Einsatz von Strom für den Eigenbedarf um ca. 15 %.

Berücksichtigt man darüber hinaus die geringeren Investitionen im Falle des Sammelbohrplatzes, ist die Entscheidung über die zu präferierende Systemgestaltung wiederum eindeutig.

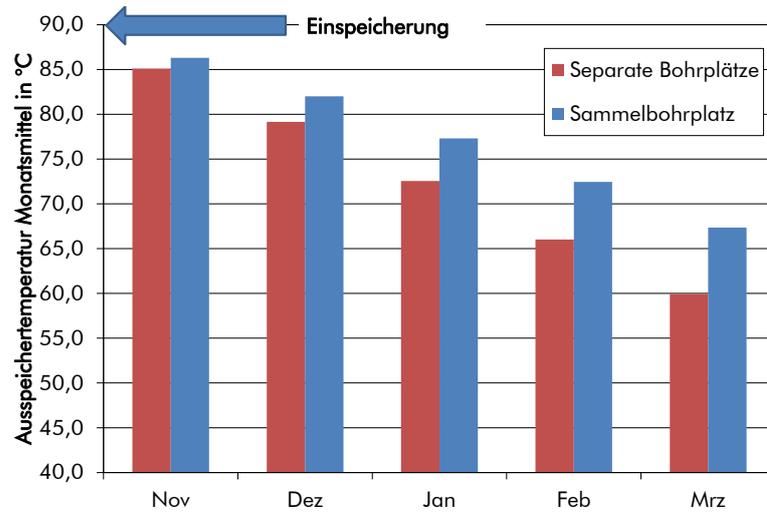


Abbildung 8-12: Vergleich der Ausspeichertemperaturen

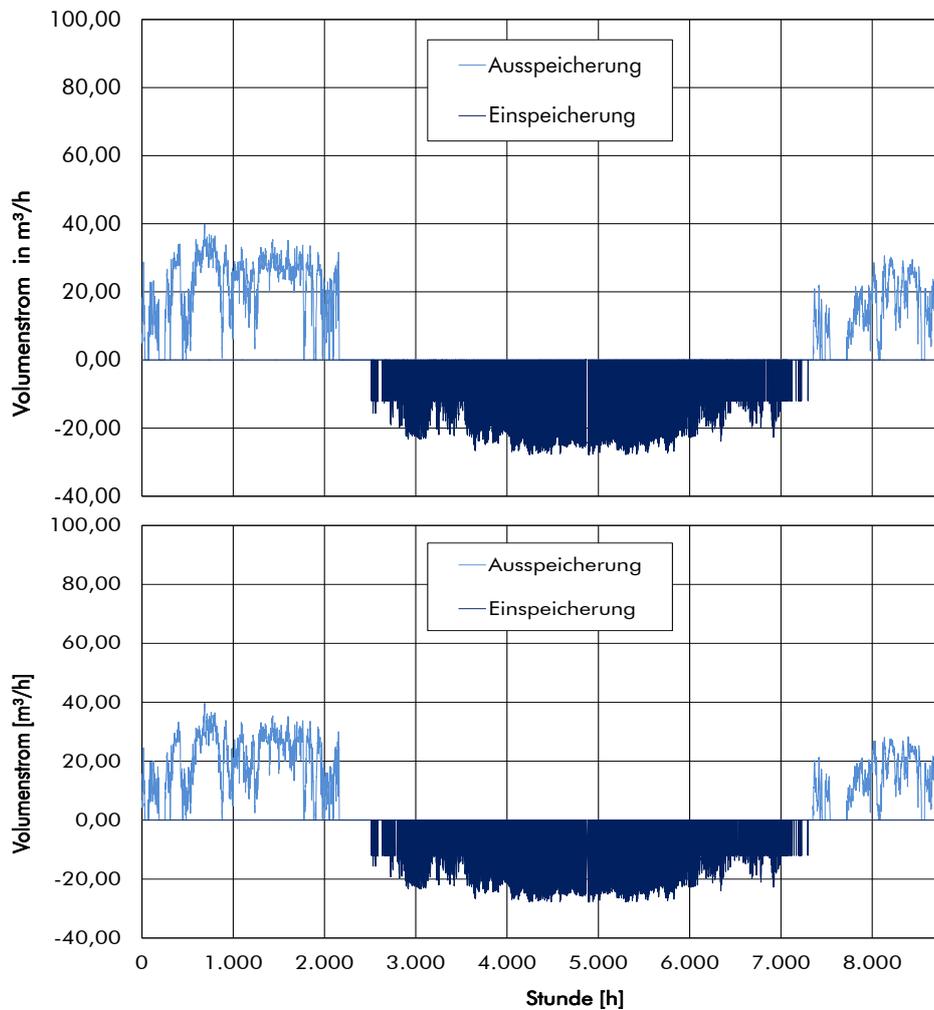


Abbildung 8-13: Vergleich der ein- und ausgespeicherten Volumenströme (Sammelbohrplatz unten)

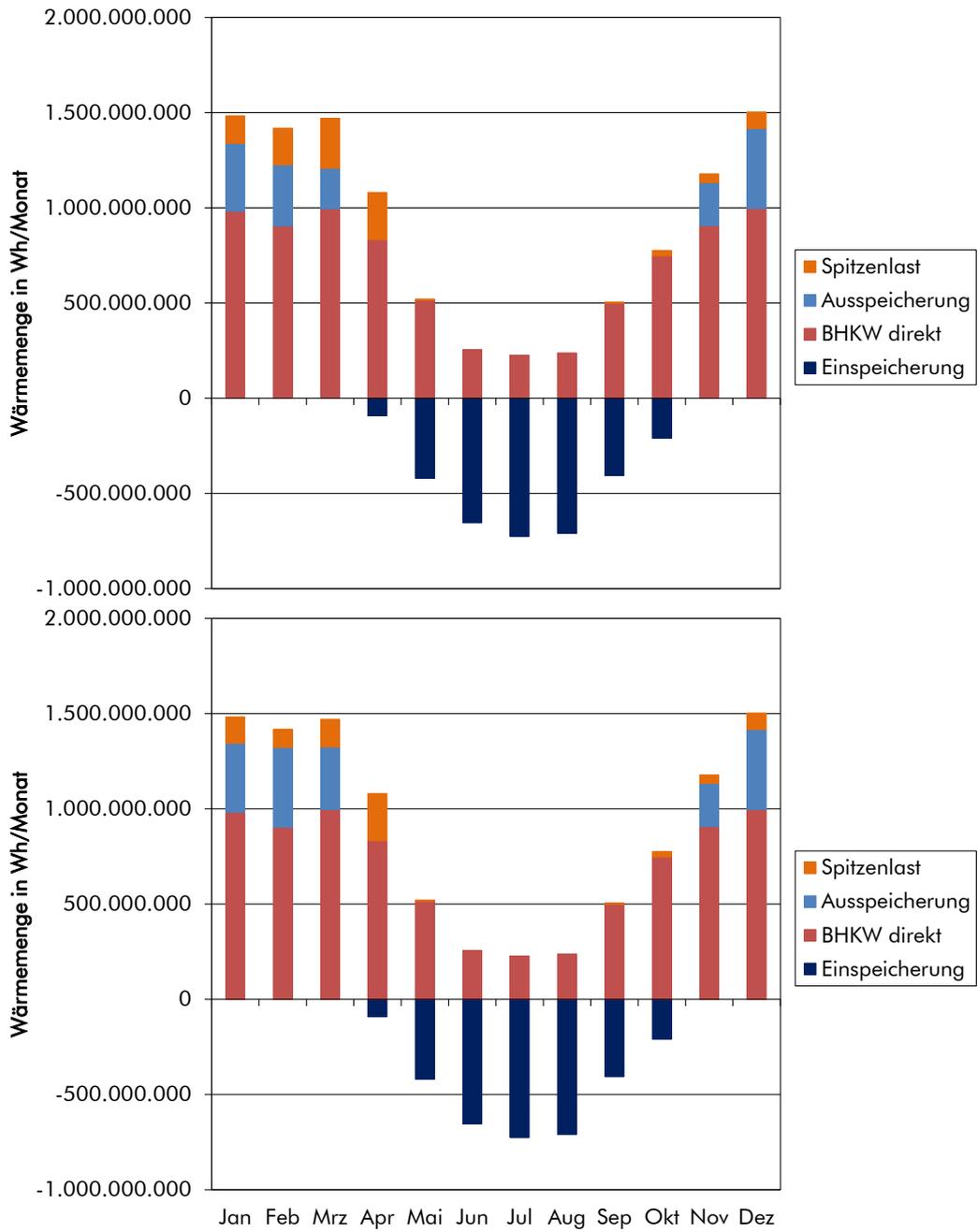


Abbildung 8-14: Vergleich der Anteile der Einzelerzeuger an der Wärmebedarfsdeckung (Sammelbohrplatz unten)

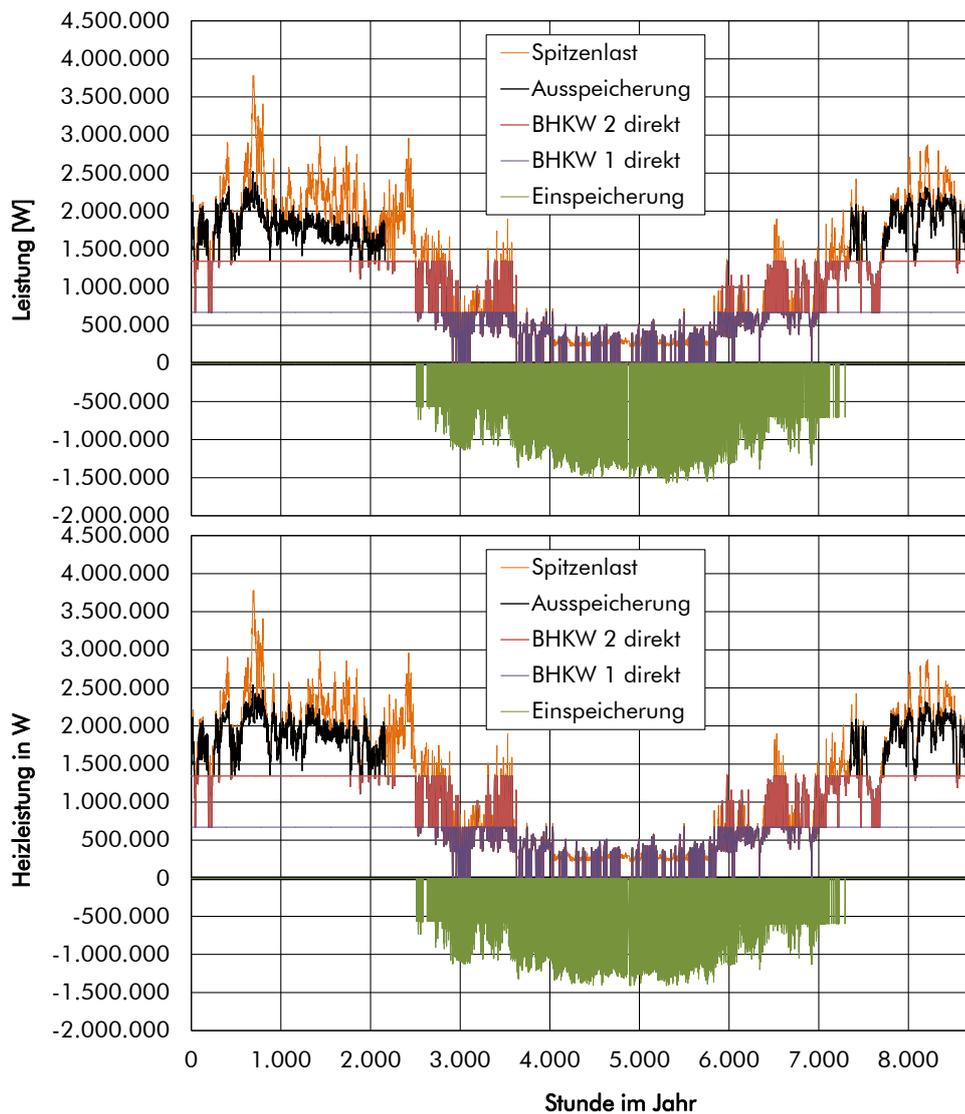


Abbildung 8-15: Vergleich der Anteile der Einzelerzeuger an der Wärmebedarfsdeckung (Sammelbohrplatz unten)

### 8.5.1.2 Weitere Optimierung des energetischen Verhaltens des Aquiferwärmespeichers mit einem Sammelbohrplatz

Anders als bei der Variante 1 bestehen hier für eine Steigerung des Thermalwasserstromes im Auspeicherungsfall über den bisher gewählten Ansatz hinaus keine realen Spielräume. Wegen des bei unveränderter BHKW-Größe verringerten Wärmebedarfes vermindert sich das theoretische Auspeicherungspotenzial. Schon mit dem ursprünglichen Ansatz wird dieses fast ausgeschöpft (vgl. Abbildung 8-15). Eine Verringerung des maximalen Auspeichervolumenstromes, wie sie hier mit 20 m<sup>3</sup>/h betrachtet wird, verzögert die Auskühlung des Speichers (Abbildung 8-16) und bietet im Frühjahr ein höheres Auspeicherungspotenzial. Wie Tabelle 8-5 zeigt, gleicht dies aber bilanziell nicht die Auspeicherverluste durch geringere Mengenströme im Herbst aus.

Für die weiteren Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen wird die Lösung mit einer Volumenstrombegrenzung auf die in Richtung der Netze Uni-Campus und ZG geleitete Heiznetzmenge gewählt.

Tabelle 8-5: Zusammenfassung der Ergebnisse der energetischen Bilanzierung

Begrenzung des Ausspeichervolumenstromes	Heiznetzstrom Richtung Uni-Campus und ZG	20 m <sup>3</sup> /h
Wärmeerzeugung BHKW gesamt (MWh/a)	11.755	11.755
davon Einspeicherung	3.222	3.222
Wärmebedarf gesamt (MWh/a)	10.652	10.652
davon BHKW direkt	8.533	8.533
davon Ausspeicherung	1.790	1.720
davon Spitzenlastkessel	329	399
Stromerzeugung BHKW (MWh/a)	9.233	9.233
Speicherrückgewinnungsgrad	55,6 %	53,4 %
Energieträger (MWh/a)		
Bio-Erdgas	23.161	23.161
Erdgas	387	469
Eigenstrom	82	71

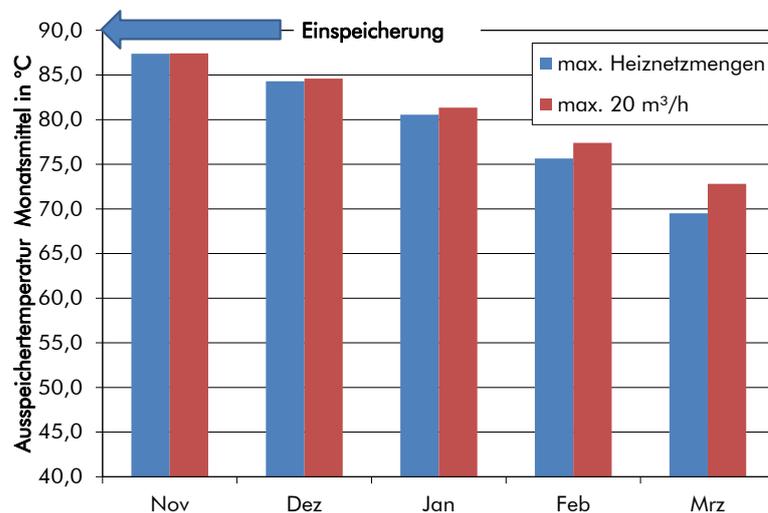


Abbildung 8-16: Vergleich der Ausspeichertemperaturen

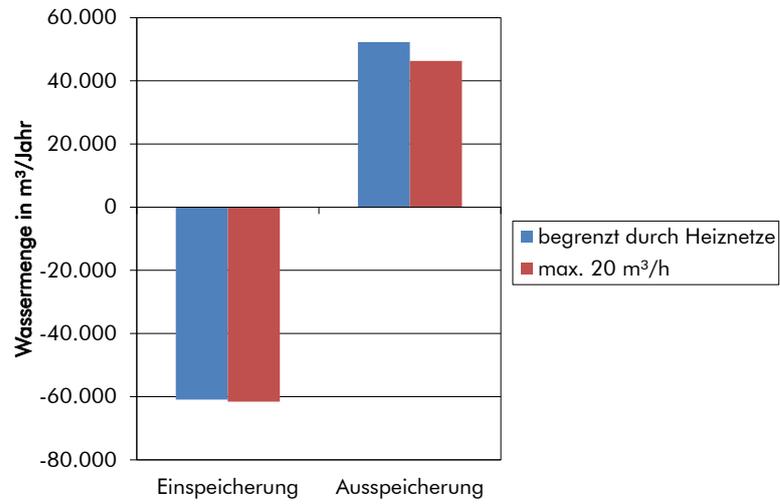


Abbildung 8-17: Vergleich der ein- und ausgespeicherten Wassermengen

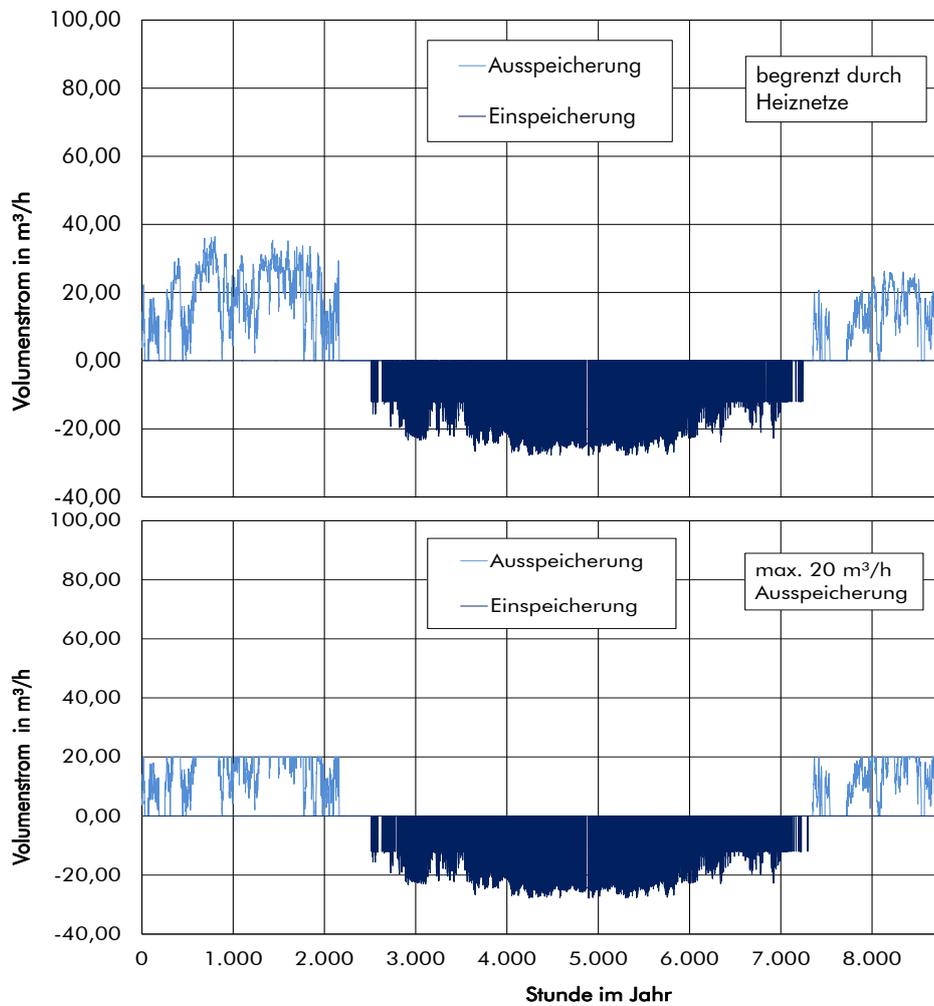


Abbildung 8-18: Vergleich der ein- und ausgespeicherten Volumenströme

## 9 **Wirtschaftlichkeitsbetrachtung**

In den vorstehenden Betrachtungen wurden zwei unterschiedliche Systemgestaltungen des Aquiferwärmespeichers im Übertagebereich berücksichtigt. Der Unterschied zwischen beiden besteht im Abstand zwischen kalter und warmer Bohrung im Aquifer.

Dies hat **zum einen** Investitionsdifferenzen zur Folge, da der kurze Abstand von einem Standort aus erschlossen werden kann (Sammelbohrplatz), während der größere Abstand zwei separate Bohrplätze sowie eine zugehörige Thermalwasser-Verbindungsleitung erfordert. **Zum anderen** wird durch diese differierenden Anordnungen auch das energetische Speicherverhalten beeinflusst. Beim kurzen Abstand beeinflussen sich warme und kalte Speicherseite thermisch, währenddessen das beim längeren Abstand ausgeschlossen werden kann.

Letztlich zeigte sich, dass alle die Wirtschaftlichkeit der Speicherung beeinflussenden Größen auf die Errichtung eines Sammelbohrplatzes hinweisen. Erwartungsgemäß waren die Investitionen hier geringer, aber auch, und das war nicht abzusehen, zeigte ein kürzerer Bohrungsabstand ein günstigeres energetisches Verhalten des Speicher.

Für den Wirtschaftlichkeitsvergleich mit der konventionell betriebenen BHKW-Anlage wurde also das System mit einem Sammelbohrplatz unmittelbar am BHKW-Standort ausgewählt.

### 9.1 **Randbedingungen der Wirtschaftlichkeitsbewertung**

Investitionen in die Wärmespeicher und ihre Einbindung in das Gesamtsystem führen zu mehr oder weniger umfangreicher Verminderung des Energieträgereinsatzes für die Erzeugung von Mittel- und Spitzenlastwärme.

Es gilt nun für verschiedene Varianten zu untersuchen, ob vorgenannte Investitionen und die damit verbundenen zusätzlichen Betriebskosten (Auszahlungen) zu Einzahlungen aus Energieträgereinsparung führen, die diese überkompensieren. Dann muss die Variante ausgewählt werden, bei der die sich einstellenden Bilanzvorteile am größten sind.

Zur Beantwortung der Fragestellung wird eine Kenngröße nach VDI 2067-1/VDI 6025 berechnet, die auch Preissteigerungsraten in unterschiedlicher Größenordnung berücksichtigt:

- **Kapitalwert:** Stellt den erwirtschafteten Überschuss einer Investition am Anfang des Betrachtungszeitraumes dar. Der auf den Zeitpunkt unmittelbar vor Beginn der Investition bezogene Kapitalwert wird aus der Differenz der Summe der Barwerte aller Ein- und Auszahlungen berechnet. Der somit bestimmte Kapitalwert muss positiv sein, um die Investition Erfolg versprechend durchführen zu können.
-

Wie bereits bei der Modellierung und energetischen Bilanzierung deutlich wurde, werden im Rahmen dieser vergleichenden Studie betriebs- oder wartungsbedingte Stillstandszeiten der BHKW nicht berücksichtigt, d. h. angenommen. Wohl aber gehen die laufzeitbedingt differierenden Wartungskosten in die Rechnungen ein.

### 9.1.1 Kapitalbezogene Kosten

- Zinssatz 5 %/a
- Betrachtungszeitraum 15 Jahre
- Nutzungsdauern
  - Bohrungen 40 Jahre
  - Anlagenbau Thermalwasserkreislauf 20 Jahre
  - Anlagenbau Einbindung Wärmeerzeugung 25 Jahre
  - Elektro/Automatisation 15 Jahre
  - Thermalwassertrassen 40 Jahre
  - Gebäude 50 Jahre
- Wartungssätze
  - Bohrungen 0,2 %/a
  - Anlagenbau Thermalwasserkreislauf 2,5 %/a
  - Anlagenbau Einbindung Wärmeerzeugung 1,5 %/a
  - Biomethangefeuerte BHKW (Vollwartungsvertrag) 0,6 Ct/kWh<sub>e</sub>
  - Elektro/Automatisation 1,5 %/a
  - Thermalwassertrassen 1,0 %/a
  - Gebäude 1,0 %/a
- Instandhaltungssätze
  - Anlagenbau Thermalwasserkreislauf 1,0 %/a
  - Anlagenbau Einbindung Wärmeerzeugung 1,0 %/a
  - Elektro/Automatisation 1,0 %/a
  - Gebäude 1,0 %/a

### 9.1.2 Verbrauchsgebundene Kosten bzw. Erlöse aus Energieverkauf

#### Kosten für Energieeinkauf:

- Strompreis zum Antrieb des Thermalwasserkreislaufes (netto)
  - Mischpreis 14,0 Ct/kWh
- Erdgaspreis (netto, ohne Netznutzung)
  - Mischpreis 4,00 Ct/kWh
- Biomethanpreis (netto) 6,00 ... **7,00** ... 8,00 Ct/kWh
- Preissteigerungsraten
  - optimistisch 2,0 %/a
  - pessimistisch 4,0 %/a

#### Erlöse aus Energieverkauf:

- Einspeisevergütung nach EEG 2013 für Einsatzstoffvergütungsklasse I

### 9.1.3 Betriebsgebundene Kosten

- Verbrauchsmaterial
  - Filter 1.500 Euro/a
  - Stickstoff 500 Euro/a
  - Slopentsorgung 2.000 Euro/a
- Tiefpumpen
  - Jeweils nach 5 Jahren je Bohrung ein Pumpenwechsel 15.000 Euro
  - Nach 5 Jahren je Bohrung eine Pumpenüberholung 20.000 Euro
  - Nach 10 Jahren je Bohrung eine komplett neue Pumpe 55.000 Euro
  - Zusammenfassung für beide Pumpen 18.000 Euro/a
- Preissteigerungsraten 2 %/a

### 9.1.4 Sonstige Kosten

- Versicherung  
Alle übertägigen Systeme werden für eine Prämie von 0,75 %/a versichert. Bohrungen sind nicht versicherbar.
- Preissteigerungsraten 2 %/a

## 9.2 Zusammenfassung der Investitionen in den Aquiferspeicher und seine Einbindung in das Gesamtsystem

Im Folgenden sind die Investitionen, wie sie in den Abschnitten 5.5, 6.3 und 7.1.2 für die Teilsysteme beschrieben werden, zusammengefasst und den Ausrüstungskategorien aus Abschnitt 9.1.1 zugeordnet.

Die Ingenieurleistungen sind dabei jeweils anteilig in den Einzelpositionen berücksichtigt.

Tabelle 9-1: Investitionen in den Aquiferspeicher mit Sammelbohrplatz

	<b>Investitionen</b>
Bohrungen	2.482.000 €
Anlagenbau Thermalwasserkreislauf	476.000 €
Anlagenbau Einbindung Wärmeerzeugung	148.100 €
Elektro/Automatisation	327.500 €
Thermalwassertrassen	38.400 €
Gebäude	225.400 €
<b>Summe (netto)</b>	<b>3.697.400 €</b>

## 9.3 Zusammenfassung der energetischen Parameter der Untersuchungsvarianten

	<b>Variante 1</b>		<b>Variante 2</b>	
	<b>ohne Aquifer- speicher</b>	<b>mit Aquifer- speicher</b>	<b>ohne Aquifer- speicher</b>	<b>mit Aquifer- speicher</b>
Wärmeerzeugung BHKW gesamt (MWh/a)	8.962	11.755	8.533	11.755
davon Einspeicherung		2.793		3.222
Wärmebedarf gesamt (MWh/a)	12.485		10.652	
davon BHKW direkt	8.962	8.962	8.533	8.533
davon Ausspeicherung		1.650		1.790
davon Spitzenlastkessel	3.523	1.873	2.119	329
Stromerzeugung BHKW (MWh/a)	7.039	9.233	6.702	9.233
Speicherrückgewinnungsgrad		59,1 %		55,6 %
Energieträger (MWh/a)				
Bio-Erdgas	17.657	23.161	16.812	23.161
Erdgas	4.144	2.204	2.493	387
Eigenstrom		87		82

## 9.4 Ergebnisse

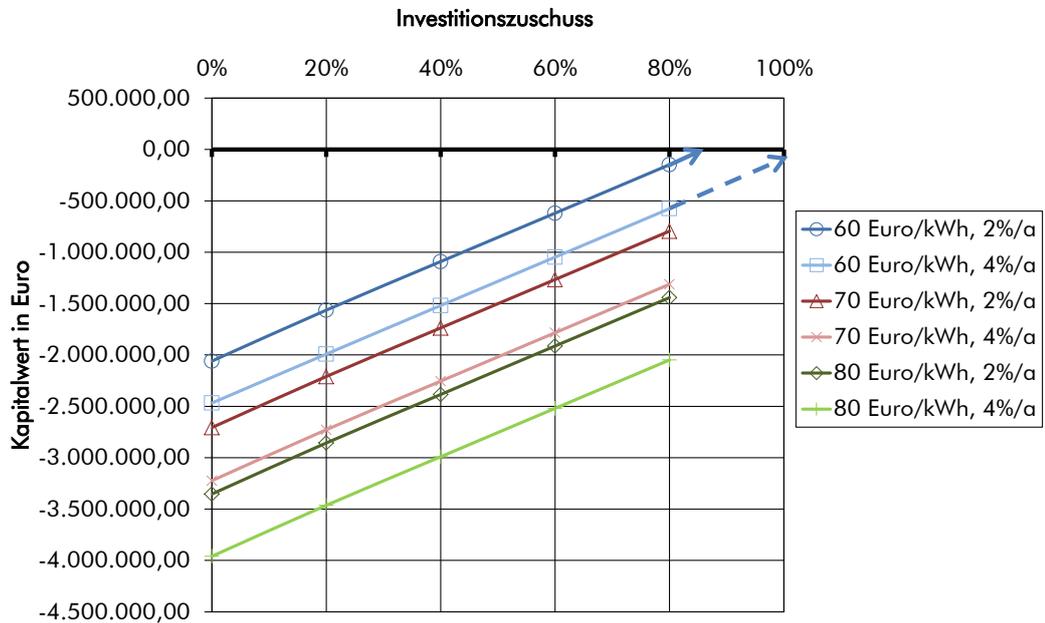


Abbildung 9-1: Kapitalwert der Investition in Abhängigkeit des Investitionszuschusses, Variante 1 – aktueller Wärmebedarf, Bioerdgaspreise zwischen 60 und 80 Euro/MWh, Preissteigerung für Energie 2 %/Jahr und 4 %/Jahr

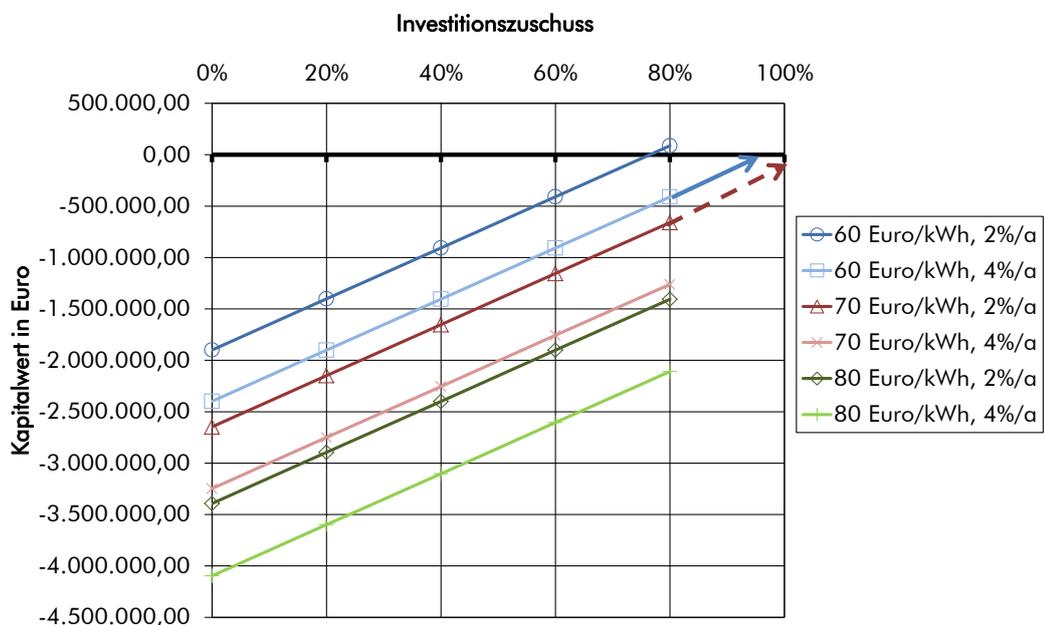


Abbildung 9-2: Kapitalwert der Investition in Abhängigkeit des Investitionszuschusses, Variante 2 – Verbesserung der Energieeffizienz im Heizsystem für den Uni-Campus, Bioerdgaspreise zwischen 60 und 80 Euro/MWh, Preissteigerung für Energie 2 %/Jahr und 4 %/Jahr

In den Berechnungen und Abbildungen wurde der Fall unterstellt, dass sich die Einspeisevergütung nach EEG auf den gesamten, zusätzlich erzeugten Strom bezieht, auch wenn ein Teil der dabei produzierten Wärme als Verlust im Aquiferspeicher verbleibt. Das ist grundsätzlich so möglich (der Speicher in Neubrandenburg wird derart betrachtet), jedoch unterliegt dies einer Einzelfallprüfung.

Die Abbildung 9-1 und die Abbildung 9-2 zeigen, dass sowohl für die Variante 1 als auch die Variante 2 des Verhaltens der Abnehmersysteme bei einem Bioerdgaspreis von 8 Ct/kWh am oberen Ende des Erwartungsspektrums unter keinen Umständen eine Wirtschaftlichkeit für den Einsatz eines Aquiferspeichers erreichbar ist. Der Kapitalwert ist in jedem Fall deutlich negativ.

Gleiches gilt auch für einen Bioerdgaspreis von 7 Ct/kWh in Variante 1 und (bei einer zukünftigen Energiepreissteigerung  $>2\%/a$ ) für Variante 2. Für letzteren Fall und einer zukünftigen Energiepreissteigerung  $<2\%/a$  wird die Wirtschaftlichkeitsgrenze (Kapitalwert = 0) erreicht, wenn (und das ist hypothetisch) alle Investitionen unberücksichtigt bleiben.

Für einen Bioerdgaspreis von 6 Ct/kWh am unteren Ende des Erwartungsspektrums sind in Variante 1 ca. 85 % Investitionszuschüsse vonnöten, um bei einer zukünftigen Energiepreissteigerung  $<2\%/a$  den Einsatz eines Aquiferwärmespeichers konkurrenzfähig zu machen. Erhöhen sich die zukünftigen Preissteigerungen auf bis zu  $4\%/a$  müssen für das gleiche Ergebnis wieder alle Investitionen unberücksichtigt bleiben.

In der für die Zukunft eher realistischen Variante 2 des Verhaltens der Abnehmersysteme verbessert sich die wirtschaftliche Situation leicht. Nun sind ca. 75 % Investitionszuschüsse bei Energiepreissteigerungen  $<2\%/a$  bzw. 95 % bei Energiepreissteigerungen von  $4\%/a$  einzuwerben.

Die Ursache der benannten sehr schlechten Wirtschaftlichkeit des Aquiferspeichereinsatzes im betrachteten Gesamtenergiesystem ist bei als akzeptabel einzuschätzendem Speicherverhalten im Wesentlichen eine Diskrepanz zwischen

- den Investitionen in die Speichererrichtung und
- dem geringen Speichereffekt, der sich aus der Größe des Abnehmersystems und der dieser angepassten Auslegung der BHKW ergibt.

Bei faktisch gleichen Investitionen in den Speicher könnte die eingelagerte Wärmemenge verzwei- bis verdreifacht werden. Bei ähnlichem bzw. wegen des günstigeren Inhalts-/Oberflächenverhältnisses der Wärmeblase im Aquifer sogar verbessertem Rückgewinnungsgrad stiege die wieder entnehmbare Wärme zumindest im gleichen Verhältnis. Während so die Differenz aus betriebsgebundenen Aus- und Einzahlungen steigt, würden die kapitalgebundenen Kosten faktisch unverändert bleiben. Die Wirtschaftlichkeit verbesserte sich.

In Abbildung 8-15 wird deutlich, dass in der Variante 2 des Verhaltens der Abnehmersysteme der Speicherrückgewinnungsgrad vor allem durch das begrenzte Aufnahmevermögen der Abnehmer im Winter bestimmt wird. Es ist zu erwarten, auch wegen der recht geringen Rücklauftemperaturen aus dem Campus-Fernwärmenetz, dass eine Verminderung der Wärmeeinlagerung im Sommer zu faktisch keiner Verminderung der ausgespeicherten Wärmemenge im Winter führen wird. Der Rückgewinnungsgrad steigt so.

Wird eine derartige Fahrweise zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit führen? Der Einsatz von Bioerdgas sinkt zwar, aber auch die nach EEG zu vergütende Strommenge.

Um einen Trend zu ermitteln, werden folgende Annahmen getroffen:

- Verminderung der sommerlichen Wärmeerzeugung (und somit -einlagerung) um 500 MWh/a
- d. h. Verminderung des Einsatzes von Bioerdgas um 985 MWh/a
- d. h. Verminderung der Stromerzeugung im BHKW um 393 MWh/a

Im Ergebnis zeigt sich das in Abbildung 9-3 gezeichnete Bild. Der Kapitalwert der Varianten mit hohen Bioerdgaspreisen vermindert sich (ohne wirtschaftlich zu sein), während sich die Wirtschaftlichkeit der Variante mit einem Bioerdgaspreis von 6 Ct/kWh leicht verschlechtert. Dies hat damit zu tun, dass sich im ersten Fall die negative Differenz zwischen EEG-Einnahmen und Brennstoffkosten vermindert, während dies im anderen Fall auf den Überschuss aus EEG-Einnahmen zutrifft.

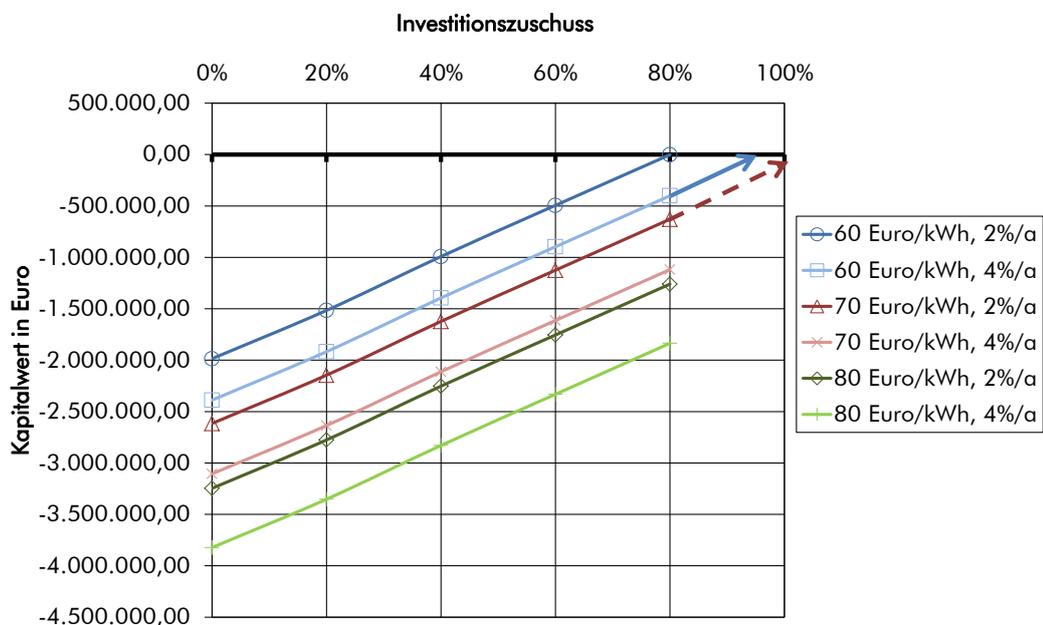


Abbildung 9-3: Kapitalwert der Investition in Abhängigkeit des Investitionszuschusses, Variante 2 – Verbesserung der Energieeffizienz im Heizsystem für den Uni-Campus, sommerlich verminderter BHKW-Betrieb, Bioerdgaspreise zwischen 60 und 80 Euro/MWh, Preissteigerung für Energie 2 %/Jahr und 4 %/Jahr

## **10 Zusammenfassung**

- Das Fernwärmesystem am Standort wird in der Grundlast von einer bioerdgasgefeuerten BHKW-Anlage (Stromerzeugung 2 \* 527 kW, Wärmeerzeugung 2 \* 671 kW) versorgt. Der Spitzenlastabdeckung dienen Erdgaskessel.
  - In dieser Studie wurde untersucht, ob, in welcher Weise und mit welchen Kosten ein sehr großer Langzeit-Wärmespeicher (Aquiferwärmespeicher) dazu dienen kann, den Umfang der in Kraft-Wärme-Kopplung und besonders auf Basis regenerativer Energieträger erzeugten Energien zu steigern.
  - Ein derartiger Speicher nimmt die sommerlichen Wärmeüberschüsse der stromgeführten BHKW auf und stellt sie im Winter für die Deckung der Mittellast in den Abnehmersystemen zur Verfügung.  
Er besteht primär aus zwei Bohrungen, die in einem angemessenen Abstand voneinander angeordnet sind. Beide Bohrungen sind mit Pumpen sowie einem Injektionsstrang ausgestattet, die das Durchströmen der Anlage in beiden Richtungen erlauben. Wärmetauscher, die in das die Bohrungen verbindende übertägige Rohrleitungssystem integriert sind, ermöglichen die Ein- und Auslagerung von Wärmeenergie.  
Aus der einen, der „kalten“ Bohrung, wird Thermalwasser gefördert und über eine Rohrleitung zum Wärmetauscher gepumpt, wo es Überschusswärme aus einer KWK aufnehmen kann (Sommerbetrieb). Anschließend wird es in die zweite, die „warme“ Bohrung, geleitet. Dort bildet sich im Untergrund eine sog. Wärmeblase.  
Besteht im Abnehmersystem ein Wärmebedarf, der mit der Abwärme der KWK nicht mehr abgedeckt werden kann, so wird die Strömungsrichtung im Speicherkreislauf geändert. Das Wasser aus der „warmen“ Bohrung dient nun dazu, den Heiznetzrücklauf direkt zu erwärmen (Winterbetrieb). Das ausgekühlte Thermalwasser wird wieder in die „kalte“ Bohrung geleitet, wo es für den nächsten Zyklus zur Verfügung steht.
  - Ein für die vorbeschriebene Aufgabe geeigneter Aquifer wurde am Standort der BHKW-Anlage in der geologischen Formation Obereozän identifiziert. In einer Tiefe zwischen ca. 450 m und 485 m befindet sich darin ein Sandsteinpaket, das gute hydraulische Eigenschaften ausweist. Die effektive Sandsteinmächtigkeit beträgt 30 m. Eine Thermalwassertemperatur von 25 °C sowie eine Mineralisation von 78 g/L werden erwartet.
  - Das geologische Risiko des Antreffens des Sandsteinpaketes mit den prognostizierten Parametern ist gering.
-

- Zwei Erschließungsvarianten des Aquiferspeichers wurden untersucht.
  - Zwei separate Bohrplätze mit seigeren Bohrungen:  
Der Bohransatzpunkt der „warmen“ Bohrung befindet sich in Lüneburg, Ecke Heinrich-Böll-Straße-Ülzener Straße, und der Ansatzpunkt für die „kalte“ Bohrung im Bereich der Wichernstraße.
  - Sammelbohrplatz mit Ablenkbohrungen:  
Die Ansatzpunkte beider Bohrungen der Dublette befinden sich in Lüneburg, Ecke Heinrich-Böll-Straße-Ülzener Straße.
- Im Thermalwasserkreislauf könnte unabhängig von der Erschließungsvariante bis zu 100 m<sup>3</sup>/h Thermalwasser umgewälzt werden. Wegen der Begrenztheit der Wärmeüberschüsse und auch der winterlichen Wärmesenke erfolgt die Auslegung der Bohrungen und des Übertagesystems aber auf maximal 50 m<sup>3</sup>/h.
- Die zulässige Einspeichertemperatur, auf die das Thermalwasser mit der Wärme der BHKW-Anlagen aufgeheizt werden kann, beträgt 90 °C.
- Das Speicherverhalten, d. h. letztlich die Thermalwassertemperaturen bei der Rückförderung aus der warmen Bohrung, ist neben den geologischen Aquiferparametern von der Größe und dem Betriebsverhalten der BHKW-Anlagen und von der Größe, den Temperaturanforderungen und den Lastschwankungen des angeschlossenen Fernwärmesystems beeinflusst. Entsprechende Daten lagen in stündlicher Auflösung für den Uni-Campus und das Wohngebiet Bockelsberg für das Jahr 2012 und als Monatsbedarfe für die Jahre 2008 bis 2011 vor und wurden zu charakteristischen Kurven aufbereitet. Das neu errichtete Zentralgebäude ging mit Simulationswerten in die Berechnungen ein.
- Zwei Bedarfsszenarien wurden in den Berechnungen berücksichtigt:
  - Variante 1 – aktueller Zustand:
    - unverändertes Verhalten des Uni-Campus und des Wohngebietes Bockelsberg, zusätzlicher Anschluss des neuen Zentralgebäudes über eine separate Trasse aus dem Heizhaus
    - Gesamtwärmebedarf 12.500 MWh/a
    - Heiznetztemperaturen der Netze für Campus und Bockelsberg im Vorlauf 70 °C bis 80 °C und im Rücklauf 55 °C bis 65 °C
    - Heiznetztemperaturen Zentralgebäude 58 °C/25 °C
  - Variante 2 – Verbesserung der Energieeffizienz im Heizsystem für den Uni-Campus
    - gegenüber dem aktuellen Betrieb unverändertes Verhalten des Wohngebietes Bockelsberg, Uni-Campus mit einem 25 %igen Abschlag auf alle thermischen Leistungen und ohne sommerliche Warmwasserbereitung, zusätzlicher Anschluss des neuen Zentralgebäudes über eine separate Trasse aus dem Heizhaus
    - Gesamtwärmebedarf 10.650 MWh/a
    - Absenkung der Rücklauftemperaturen im Uni-Campus um 10 K

- Für die Errichtung des Aquiferspeichers und seiner Einkopplung in das Versorgungssystem sind im Falle eines Sammelbohrplatzes Investitionen im Umfang von 3,70 Mio. Euro aufzuwenden, von denen ca. 2,50 Mio. Euro auf die Bohrungen entfallen. Diese Investitionen sind um ca. 390.000 Euro geringer als bei einem System mit zwei separaten Bohrplätzen, wo der Abstand im Untergrund so groß ist, dass eine thermische Wechselwirkung zwischen den Bohrungen ausgeschlossen ist.
- Da neben den vorgenannten geringeren Investitionen ein System mit Sammelbohrplatz und folglich thermischer Wechselwirkung zwischen den Bohrungen auch ein günstigeres energetisches Verhalten des Speichers (höhere Rückgewinnungstemperaturen) aufweist, ist diese Anlagengestaltung zu favorisieren.
- Wird ein Aquiferspeicher in die Erzeugeranlage integriert und versorgt diese ein Abnehmersystem nach Variante 1 (gegenüber aktuellem Zustand unveränderter Bedarf), so kann der Erdgasbedarf zur Deckung der Mittel- und Spitzenlast um ca. 50 % (von 4.200 auf 2.200 MWh) vermindert werden. Um dem Aquiferspeicher eine entsprechende Wärmemenge entnehmen zu können, ist er im Sommer mit 2.800 MWh zu beladen. Der Rückgewinnungsgrad des Speichers beträgt also ca. 60 %. Vorgenannte Einspeicherwärme entstammt zusätzlichem sommerlichen BHKW-Betrieb, was auf der einen Seite eine zusätzliche Stromerzeugung von ca. 2.200 MWh, aber auf der anderen Seite auch ein Mehr an Bioerdgaseinsatz von ca. 5.500 MWh/a bedeutet.
- In Verbindung mit einem Abnehmersystem nach Variante 2 (Bedarfsminderung und Absenkung der Rücklauftemperaturen) wird faktisch ein Erdgasbedarf zur Deckung der Mittel- und Spitzenlast vermieden (Senkung von 2.500 auf 400 MWh/a). Um dem Aquiferspeicher eine entsprechende Wärmemenge entnehmen zu können, ist er im Sommer mit 3.200 MWh zu beladen. Der Rückgewinnungsgrad des Speichers beträgt also ca. 56 %. Hier ist anzumerken, dass dieser Wert nicht durch den Speicher, sondern die begrenzte Größe der Wärmesenke im Ausspeicherfall bestimmt wird. Hier besteht im praktischen Betrieb noch ein Optimierungsrahmen.  
Die zusätzliche Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern erreicht einen Wert von ca. 2.550 MWh, aber auf der anderen Seite auch ein Mehr an Bioerdgaseinsatz von ca. 6.500 MWh/a.
- Sowohl für die Variante 1 als auch die Variante 2 des Verhaltens der Abnehmersysteme bei einem Bioerdgaspreis von 8 Ct/kWh am oberen Ende des Erwartungsspektrums ist unter keinen Umständen eine Wirtschaftlichkeit für den Einsatz eines Aquiferspeichers erreichbar.  
Gleiches gilt auch für einen Bioerdgaspreis von 7 Ct/kWh in Variante 1 und (bei einer zukünftigen Energiepreissteigerung >2 %/a) für Variante 2. Für letzteren Fall und einer zukünftigen Energiepreissteigerung

---

<2 %/a wird die Wirtschaftlichkeitsgrenze nur erreicht, wenn alle Investitionen unberücksichtigt bleiben.

- Für einen Bioerdgaspreis von 6 Ct/kWh am unteren Ende des Erwartungsspektrums sind in Variante 1 ca. 85 % Investitionszuschüsse vonnöten, um bei einer zukünftigen Energiepreissteigerung <2 %/a den Einsatz eines Aquiferwärmespeichers konkurrenzfähig zu machen. Erhöhen sich die zukünftigen Preissteigerungen auf bis zu 4 %/a, müssen für das gleiche Ergebnis wieder alle Investitionen unberücksichtigt bleiben.

In der für die Zukunft eher realistischen Variante 2 des Verhaltens der Abnehmersysteme verbessert sich die wirtschaftliche Situation leicht. Nun sind ca. 75 % Investitionszuschüsse bei Energiepreissteigerungen .. <2 %/a bzw. 95 % bei Energiepreissteigerungen von 4 %/a einzuwerben.

- Die Ursache der benannten sehr schlechten Wirtschaftlichkeit des Aquiferspeichereinsatzes im betrachteten Gesamtenergiesystem ist bei als akzeptabel einzuschätzendem Speicherverhalten im Wesentlichen eine Diskrepanz zwischen
  - den Investitionen in die Speichererrichtung und
  - dem geringen Speichereffekt, der sich aus der Größe des Abnehmersystems und der dieser angepassten Auslegung der BHKW ergibt.

Bei faktisch gleichen Investitionen in den Speicher könnte die eingelagerte Wärmemenge verzwei- bis verdreifacht werden. Bei ähnlichem bzw. wegen des günstigeren Inhalts-/Oberflächenverhältnisses der Wärmeblase im Aquifer sogar verbessertem Rückgewinnungsgrad stiege die wieder entnehmbare Wärme zumindest im gleichen Verhältnis. Während so die Differenz aus betriebsgebundenen Aus- und Einzahlungen steigt, würden die kapitalgebundenen Kosten faktisch unverändert bleiben. Die Wirtschaftlichkeit verbesserte sich deutlich.

## **Literaturverzeichnis**

- DIENER, I., et al. (1989): Geologische Grundlagen für die Geothermienutzung in Nordost-Deutschland (1 : 200000), Blatt Neubrandenburg T Torgelow.- Berlin, UWG GmbH.
- ENERGIE- UND PROZESSTECHNIK AACHEN GMBH (2011): Klimaneutraler Campus LEUPHANA Universität Lüneburg.- Statusbericht, Stand 09.08.2011.
- FELDRAPPE, H., OBST, K., WOLFGRAMM, M. (2008): Die mesozoischen Aquifere des Norddeutschen Beckens und ihr Potential für die geothermische Nutzung.- Z. geol. Wiss, 36, 4-5: 199-222.
- NOZON, A. (1987): Geologischer Abschlussbericht zur Bohrung Geothermie Neubrandenburg 1/86.- GTN Neubrandenburg, unveröff.
- NOZON, A. (1987): Geologischer Abschlussbericht zur Bohrung Geothermie Neubrandenburg 6/87.- GTN Neubrandenburg, unveröff.
- NOZON, A. (1988): Geologischer Abschlussbericht zur Bohrung Geothermie Neubrandenburg 4/86.- GTN Neubrandenburg, unveröff.
- VEB GEOTHERMIE NEUBRANDENBURG (1989): Eignungsnachweis Neubrandenburg.- Neubrandenburg - unveröff.
- VEB UNTERGRUNDSPEICHER MITTENWALDE (1982): Geologischer Ergebnisbericht über die Sucharbeiten und geologischer Eignungsnachweis für das Abwasserverpreßvorhaben Fermentationsbetrieb Neubrandenburg – Bohrung Dp Neubrandenburg 1/82.- Mittenwalde - unveröff.
- WOLFGRAMM, M., RAUPPACH, K., SEIBT, P. (2008): Reservoir-geological characterization of Mesozoic sandstones in the North German Basin by petrophysical and petrographical data.- Z. geol. Wiss, 36, 4-5: 249-265.
-

Forschungsbeitrag

# **Klimaneutraler Campus LEUPHANA Universität Lüneburg**

## **Abschlussbericht**

**Stand August 2016**

**Energie- und Prozesstechnik Aachen GmbH**

Jülicher Straße 338, 52070 Aachen

Tel.: 0241 / 15 90 9-0, Fax: 0241 / 15 90 9-29

[www.epa-aachen.de](http://www.epa-aachen.de)

Dr.-Ing. H.J. Röttger

[hjr@epa-aachen.de](mailto:hjr@epa-aachen.de)

Dipl.-Ing. (FH) T. Schild, M.B.A.

[ts@epa-aachen.de](mailto:ts@epa-aachen.de)

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	II
Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	IV
1. Einleitung.....	1
2. Ziel und Vorgehensweise.....	2
2.1. Zielsetzung.....	2
2.2. Vorgehensweise.....	2
3. Modelle, Beschreibung der Software DOE 2.1E.....	3
3.1. Modellierung.....	3
3.2. Rahmenbedingungen des Gebäudebestands.....	3
3.2.1. Wetterdaten.....	4
3.2.2. Gebäudedaten.....	4
3.2.3. Anlagendaten.....	4
3.2.4. Nutzungsdaten.....	5
3.3. Rahmenbedingungen des Neubaus.....	7
3.4. Gesamtmodell.....	8
4. Simulationsergebnisse (Sekundärnetze).....	8
4.1. Lastgänge des Gebäudebestands.....	8
4.2. Lastgänge des Neubaus.....	10
5. Systemtemperaturanalyse.....	12
5.1. Systemtemperaturen Bestandsnetz.....	12
5.1.1. Witterungsabhängigkeit.....	13
5.1.2. Statische Heizflächen.....	13
5.1.3. Lufterhitzer.....	18
5.1.4. Warmwasserbereiter.....	20
5.1.5. Ergebnis.....	20
5.2. Wärmeversorgung des Neubaus.....	21
5.2.1. Sekundärnetz der Wärmeversorgung des Neubaus.....	21
5.2.2. Systemtemperaturen der Heizkreise.....	21

5.2.3.	Jahreskurve der Rücklauftemperaturen des Sekundärnetzes.....	23
5.3.	Rückwirkung des Neubaus auf das Primärnetz.....	24
6.	Energiesystembetrachtung .....	26
6.1.	Energiebedarfsprofil des Campus .....	26
6.2.	Techniken zur Wärme- und/oder Stromversorgung.....	27
6.3.	Simulation und Analyse des Energiesystems.....	28
6.3.1.	Simulationsvarianten zentrale Energiewandlung .....	28
6.3.2.	Simulationsergebnisse.....	30
6.3.3.	Einschätzung der Vorteilhaftigkeit des Aquiferspeichers .....	32
7.	Fazit.....	32

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verlauf der Außentemperatur und absoluten Feuchte gemäß Testreferenzjahr für Lüneburg .....	4
Abbildung 2: Gesamtmodell Universität LEUPHANA Lüneburg mit Neubau .....	8
Abbildung 3: Lastgang Heizleistung gesamt (Simulation) .....	9
Abbildung 4: Lastgang elektrische Leistung gesamt .....	9
Abbildung 5: Lastgang Wärmebedarf Neubau (Var. B) .....	11
Abbildung 6: Lastgang Kälteenergie Neubau (Var. B).....	11
Abbildung 7: Lastgang elektrische Energie Neubau (Var. B).....	12
Abbildung 8: Jahresdauerlinie Außentemperatur und Wärmebedarf.....	13
Abbildung 9: Verteilung des Dimensionierungsfaktors.....	16
Abbildung 10: Temperaturkurve bei unterdimensionierter Heizfläche .....	17
Abbildung 11: Temperaturkurve bei genau dimensionierter Heizfläche .....	17
Abbildung 12: Temperaturkurve bei überdimensionierter Heizfläche.....	17
Abbildung 13: Temperaturkurven Erhitzer RLT02 Bibliothek.....	19
Abbildung 14: Temperaturkurven Erhitzer RLT01 Hörsaal 1 .....	19
Abbildung 15: Heizkreistemperaturen Umluftgebläsekonvektoren und Heizkörper .....	22
Abbildung 16: Heizkreistemperaturen RLT Zentrale 1 .....	23
Abbildung 17: Heizkreistemperaturen RLT Zentrale 2 .....	23
Abbildung 18: Mischtemperatur der Rückläufe aller Heizkreise des Neubaus .....	24
Abbildung 19: Vorlauftemperaturkurve des Primärnetzes bei Parallelschaltung .....	25
Abbildung 20: Vorlauftemperaturkurve des Primärnetzes bei Reihenschaltung .....	25
Abbildung 21: Jahresdauerlinie der Heizlast .....	29
Abbildung 22: Eckdaten der Energieversorgung - Variantenvergleich .....	31

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anlagendaten nach Nutzungsarten für den Gebäudebestand.....	5
Tabelle 2: Typisierung der Gebäude .....	6
Tabelle 3: Gebäudeübersicht.....	7
Tabelle 4: Energiebedarf des Neubaus aus dem Primärnetz .....	10
Tabelle 5: Relevante Eckdaten des Bedarfssystems .....	27
Tabelle 6: Variantenübersicht .....	30
Tabelle 7: Kennzahlen der Energieversorgung - Variantenvergleich .....	31

## 1. Einleitung

Dieser Abschlussbericht gibt die im Forschungsvorhaben „Klimaneutraler Campus LEUPHANA Universität Lüneburg“ (gefördert durch das BMWi) erzielten Ergebnisse aus dem Bereich Anlagen- und Energiesystemtechnik wieder.

Die EPA Energie- und Prozesstechnik Aachen GmbH (EPA) ist mit der Simulation und Analyse der Gebäude- und Anlagentechnik betraut. Insbesondere ist die Rolle, die thermische Speicher für das Energieversorgungssystem einnehmen können, zu betrachten und der ebenfalls im Rahmen dieses Projektes erforschte Aquiferspeicher unter dem Standort Lüneburg zu bedenken.

Aufgrund des Projektverlaufs ist die Betrachtung der ursprünglichen Liegenschaft, wie diese im Forschungsvorhaben berücksichtigt wird, nicht mehr gegeben. Mit dem Neubau des Zentralgebäudes auf dem Campus der LEUPHANA Universität, welcher ebenfalls über das zentrale Energiesystem versorgt wird, hat sich das Gesamtenergiesystem verändert. Der Neubau weist gegenüber den Bestandsbauten eine grundlegend andere Charakteristik des Energiebedarfs auf.

Im Rahmen eines weiteren Auftrages wurde die EPA mit einer Gebäude- und Anlagensimulation für den Neubau betraut. Dazu wurde ein weiteres Modell entwickelt, welches den Neubau in enger Anlehnung an die Planung und tatsächliche Ausführung abbildet. Die Ergebnisse wurden direkt an die LEUPHANA Universität Lüneburg berichtet.

Da beide Simulationsmodelle, von Bestand und Neubau, mit der gleichen Simulationsumgebung entwickelt wurden, konnten die Modelle kombiniert werden und somit der „neue“, um den Neubau erweiterte Campus, abgebildet werden. Auf diese Weise ist es möglich, das Potential des Neubaus bei der Analyse des Liegenschaftsenergiekonzeptes zu berücksichtigen, das Simulationsmodell fortzuschreiben und somit die Aktualität der in diesem Bericht zusammengetragenen Projektergebnisse aufrecht zu erhalten.

## **2. Ziel und Vorgehensweise**

### **2.1. Zielsetzung**

Zielsetzung ist die Abbildung der Energietechnik des Universitätscampus auf Basis einer Simulation, um eine im Hinblick auf die klimawirksamen Emissionen optimierte Energieversorgung entwickeln zu können. Neben der energetischen Optimierung der Gebäude und Anlagentechnik soll untersucht werden, inwieweit ein Aquiferspeicher in die Energietechnik eingebunden und zur Verbesserung der Ökobilanz des Campus beitragen kann.

Diese Optimierung ist Teil eines Maßnahmenpaketes der LEUPHANA Universität Lüneburg, welches zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Rahmen mehrerer Projekte bis hin zur Klimaneutralität, d.h. einer ausgewogenen CO<sub>2</sub>-Bilanz, führen soll.

### **2.2. Vorgehensweise**

Um die Energieströme und die Effizienz der energiewandelnden Systeme untersuchen und optimieren zu können, wird ein Simulationsmodell aufgebaut, anhand dessen eine dynamische Gebäude- und Anlagensimulation durchgeführt werden kann. In das Modell fließen sämtliche Einflüsse aus Nutzung, Bauphysik, Wetter und Anlagenkonfiguration ein, die Einfluss auf den Energiebedarf haben. Die Heiz- und Kühllasten werden aus Energiebilanzen um die Räume ermittelt, der Strombedarf zum Betrieb von Anlagen, Geräten und Beleuchtung wird bilanziert und die Verluste, die mit dem Energietransport und den Energiewandlungsprozessen einhergehen, werden entsprechend der Anlagenkonfiguration abgeleitet.

Auf diese Weise werden an jeder Stelle des Systems Lastgänge für thermische und elektrische Energie berechnet, die durch die Anlagentechnik, die Verteilungen und Komponenten bereitgestellt werden müssen. Die Lastgänge jedes Gebäudes und jeder Anlage beschreiben in Verbindung mit den systemspezifischen Temperaturanforderungen den Energiebedarf, der durch das gebäudeeigene System (Sekundärnetz) zu decken ist. In kumulierter Form ergibt sich daraus der Lastgang der Hauptverteilung (Primärnetz) und schlussendlich diejenigen Lastgänge der thermischen und elektrischen Energie, die durch die zentrale Energieversorgung zu decken sind. Dabei ist es abhängig von der Konfiguration dieses System, welche Energieströme und - in Abhängigkeit des Energieträgers - welche CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht werden.

In Kapitel 3 werden die verwendete Software und die Modelle näher beschrieben. Die Rahmenparameter werden aufgeführt und dokumentiert.

### **3. Modelle, Beschreibung der Software DOE 2.1E**

#### **3.1. Modellierung**

Das Modell basiert auf der Definition von Bilanzgrenzen (Zonen). Die physikalischen Eigenschaften der Zonen werden mittels spezifischer Syntax programmiert und so Geometrie und physikalische Eigenschaften aufgeprägt. Anhand der Sollwerte der einzelnen Zonen und der durch die Nutzung initiierten Energieströme wird für jede Stunde bilanziert, welcher Energiebedarf zur Einhaltung der vorgegebenen Grenzwerte benötigt wird (Loads). Die Bilanzierung basiert auf einer fiktiven Zählertopologie (Meters).

Die Deckung des Energiebedarfs hängt von der technischen Ausstattung der Zonen (Systems) und deren Dimensionierung ab. Ebenso werden Einflüsse der Regelungstechnik abgebildet, die auf unterschiedlichen Führungsgrößen aufbauend unter Berücksichtigung systemspezifischer Besonderheiten und Betriebszuständen implementiert werden kann. Durch Bilanzierung der Loads und Systems wird der Energiebedarf der Zonen in den Energiebedarf der Anlagentechnik überführt.

Der Energiebedarf der Anlagen wird aus fiktiven Quellen (Plants) gedeckt. Auch hierfür wird die technische Ausstattung beschrieben, diesmal jedoch nicht die der Gebäude, sondern die der zentralen Energiebereitstellung aus Eigen- oder aus Fremdversorgung. Wirkungsgrade und anlagenspezifische Restriktionen sind auch auf Ebene der Quellen variierbar.

Abhängig vom Projektverlauf und den Erkenntnissen wird die Anlagentechnik in diesem Modell so angepasst, dass die Übergabe von Primär- auf Sekundärnetz mit den nach Konzept verfügbaren Energieformen und deren Qualität (Temperaturen, Massenströmen, Potenziale) der Primärnetze kompatibel sind.

#### **3.2. Rahmenbedingungen des Gebäudebestands**

Die Datenerhebung erfolgte auf Basis folgender Unterlagen:

- Bestandspläne, Staatliches Baumanagement Lüneburger Heide, Stand 2007
- Übersichtsplan, Gebäudemanagement Leuphana, Stand 04.2011
- Verbrauchswerte aus Abrechnungen für Strom und Wärme 2010
- Gebäudearten und Bauweise nach Abstimmung mit der Universität, Stand 16.06.2011 und Energieberater-Bericht von keenco3 UG, Stand 06.2010
- Flächenbelegung nach Aufstellung der Universität, Stand 16.06.2011
- Nutzungsarten nach Abstimmung mit der Universität, Stand 16.06.2011

### 3.2.1. Wetterdaten

Als Wetterdatensatz wird das für die Region Lüneburg geltende Testreferenzjahr angewendet. Die Außentemperatur und absolute Feuchte dieses Datensatzes ist in Abbildung 1 exemplarisch dargestellt. Der Datensatz enthält zudem Informationen zu Wind, Solarstrahlung und Niederschlägen.

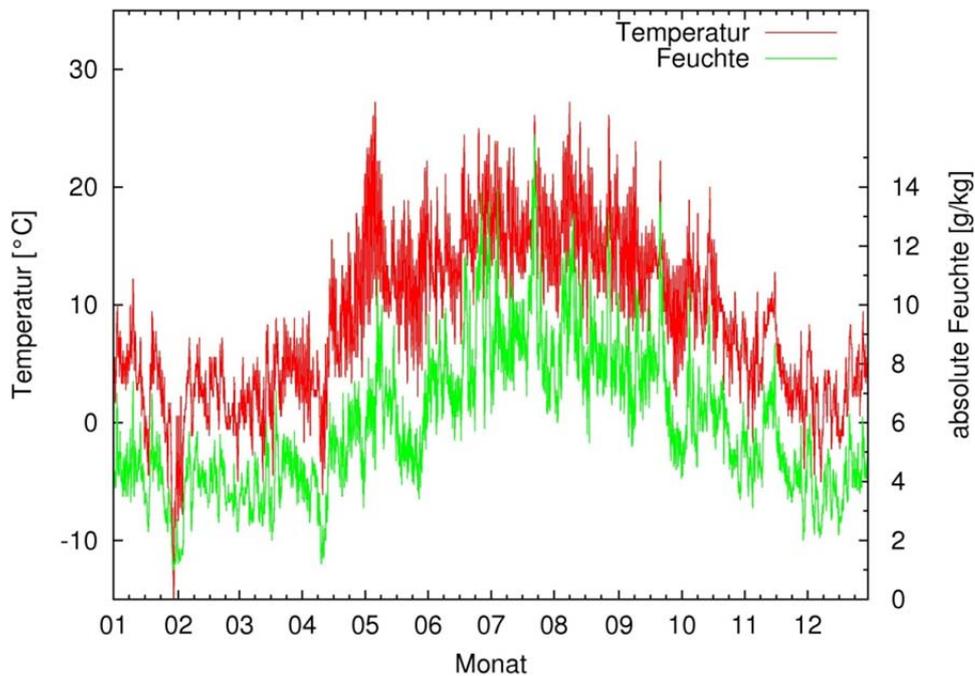


Abbildung 1: Verlauf der Außentemperatur und absoluten Feuchte gemäß Testreferenzjahr für Lüneburg

### 3.2.2. Gebäudedaten

Im Modell werden alle Gebäude berücksichtigt, die durch die zentrale Energieversorgung der LEUPHANA Universität versorgt werden. Die Gebäude werden soweit möglich durch Typisierung abstrahiert, Sondergebäude wie z.B. die Bibliothek oder Hörsaalgebäude werden individuell nachgebildet (siehe Tabelle 2 und Tabelle 3).

### 3.2.3. Anlagendaten

Die Anlagendaten sind in dargestellt.

Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Anlagendaten nach Nutzungsarten für den Gebäudebestand

Nutzungsarten	Betriebszeiten		Personen- belegung	Anforderungen						
	von	bis		Temperatur		Feuchte		Beleuchtung	Geräte	TGA
			m <sup>2</sup> /Pers	von °C	bis °C	von % r.F.	bis % r.F.	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	
Büro	8:00	17:00	13	21	22	-	-	12	10	
Seminarraum	8:00	20:00	2	20	22	-	-	11	6	
Nebenräume+ Lager			-	15	-	-	-	5	0	
Flur	8:00	20:00	-	15	-	-	-	4	0	
Hörsaal	8:00	20:00	0,75	20	22	-	-	10	4	RLT
Bibliothek	6:00	21:00				-	-			RLT
Öff. Bereich			10	21	22	-	-	30	5 (?)	
Verwaltung			13	21	22	-	-	12	10	
WC	8:00	20:00		17	20	-	-			
Technikräume						-	-			
Labor	8:00	20:00				-	-			

Die bauphysikalischen Eigenschaften der Gebäude stammen aus einem Energieberater-Bericht<sup>1</sup>, der für dieses Projekt vorbereitend durchgeführt wurde.

### 3.2.4. Nutzungsdaten

Die Nutzungsdaten beinhalten alle Daten, die zur Beschreibung der Nutzung und deren Anforderungen erforderlich sind. Abgegrenzt werden unterschiedliche Nutzungsformen durch Kategorisierung in charakteristische Nutzungsarten (siehe Tabelle 3).

Zu jeder Nutzungsart werden Betriebszeiten, Raumklimaanforderungen, Raumbelegungen und Lastdichten (nutzungsabhängig) definiert, mit denen der Energiebedarf ermittelt wird.

Saisonal und zeitlich variierende Änderungen der Nutzungsintensität werden als Lastfaktoren abgebildet, die in Abhängigkeit von Uhrzeit, Tag und Kalenderwoche für jede Stunde ermittelt werden.

<sup>1</sup> KempaEnergieConsult, „Klimaneutrale Campusentwicklung Leuphana Universität Lüneburg“, 22.11.2010

Tabelle 2: Typisierung der Gebäude

Bauart	Referenzgebäude	Anmerkung
A	6	langes Standardgebäude
B	14,9,3	nur 2 Vollgeschosse
C	1	kurzes Standardgebäude, 1 Treppenhaus
D	3	Individuell Mensa
E	19	KiTa
F	20	Individuell Sporthalle
G	21	Individuell Gymnastikraum
H	22	Individuell Mal- und Zeichensaal
I	25	Ladenzeile
J	26	Individuell Kulturhaus
K	27	Individuell Garagen Lager
L	27a	Werkstatt, Lager wird abgerissen
M	34	Individuell Werkstätten, werden abgerissen
N	Hörsaal 1+2	Individuell
O	Hörsaal 3+4	Individuell
P	Hörsaalgang	Individuell
Q	Bibliothek	Individuell
R	Hörsaal 5	Individuell
S	35	Neubau, Büros CampusLüneburg
T	Wohnheim	Studentenwerk BS
U	28	Werkstattgebäude/Parkpalette, Fertigstellung im Sommer 2011

Tabelle 3: Gebäudeübersicht

Gebäude-Nr	Bauart	Nutzungsart	Bemerkung
1	C	Büro, Seminar	
2	C	Wohnheim	CampusLüneburg
3	B	Büro	
3	D	Mensa	Neubau
4	C	Büro, Seminar	
5	A	Büro, Seminar	
6	A	Büro, Seminar	
7	A	Rechenzentrum, Seminar	
8	C	Büro	
9	B	Cafe (EG), 1. OG: Büro	
10	A	Büro	
11	A	Büro, Seminar	
12	C	Seminar, Büro	
13	A	Labor, Büro	
14	B	Seminar, Büro	
15	C	Wohnheim	
16	C	Büro, Seminar	
19	E	Kindertagesstätte	
20	F	Turnhalle	
21	G	GymStudio	
22	H	Atelier	
25	I	Ladenzeile	
26	J	Veranstaltungshalle	
27	K	Garagen	
27a	L	Werkstatt	wird abgerissen
34	M	Werkstatt	wird abgerissen
35	S	Büro	CampusLüneburg
Hörsaal 1	N		
Hörsaal 2	N		
Hörsaal 3	O		
Hörsaal 4	O		
Glasgang	P		
Bibliothek	Q		
Hörsaal 5	R		
Wohnheim, BS	T	Wohnheim	Studentenwerk BS

### 3.3. Rahmenbedingungen des Neubaus

Die Rahmenbedingungen des Neubaus sind detailliert in dem Simulationsbericht<sup>2</sup> zum Neubau beschrieben. Unterschiede zu den Rahmenbedingungen des Gebäudebestandes betreffen im Wesentlichen die zusätzlichen Nutzungsarten und die bauphysikalische und technische Güte.

<sup>2</sup> EPA Energie- und Prozesstechnik Aachen GmbH, „Thermische Gebäude- und Anlagensimulation - LEUPHANA Universität Lüneburg Neubau Zentralgebäude“, vom 01.07.2015

### 3.4. Gesamtmodell

Abbildung 2 zeigt eine Übersicht über das Simulationsmodell mit Gebäudebestand und Neubau.

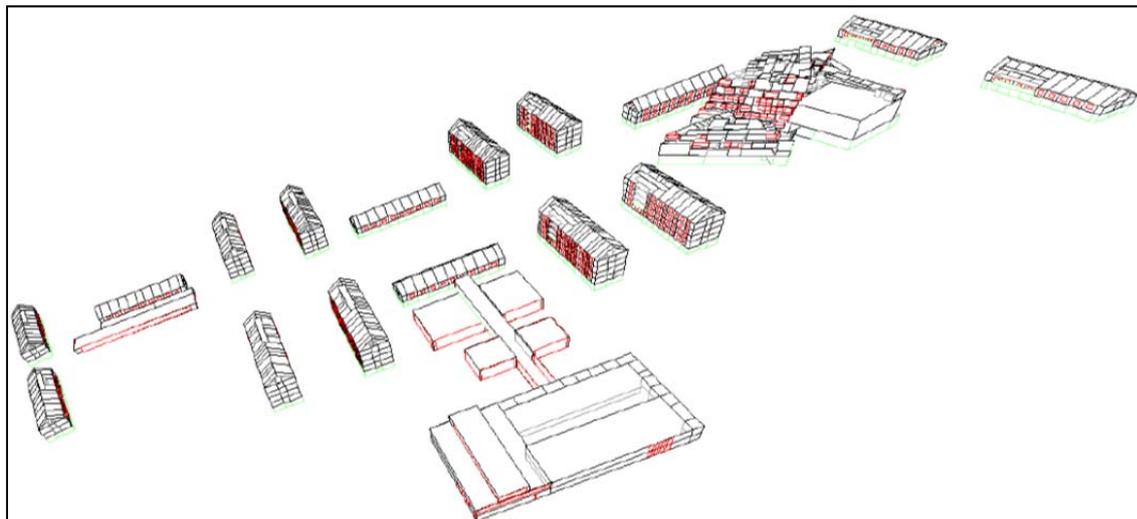


Abbildung 2: Gesamtmodell Universität LEUPHANA Lüneburg mit Neubau

## 4. Simulationsergebnisse (Sekundärnetze)

In diesem Kapitel werden die Simulationsergebnisse in Form der Lastgänge eines Jahres dargestellt. Absatz 4.1 beschreibt die Simulationsergebnisse für den Gebäudebestand (ohne den Neubau), Absatz 4.2 die des Neubaus.

### 4.1. Lastgänge des Gebäudebestands

Im Jahr 2009 lag der Wärmeverbrauch bei ca. 5,6 GWh, im Jahr 2010 bei ca. 6,6 GWh. Der Mehrverbrauch von 1 GWh ist zum Teil auf Witterungsunterschiede zurückzuführen, konnte jedoch auch im Gespräch mit der Universität nicht vollständig begründet werden. Die Spitzenleistung liegt gemäß Versorgungsvertrag bei 4,5 MW, was nach derzeitiger Informationslage auch auskömmlich ist.

Gemäß Simulation liegt die Spitzenleistung bei 2,8 MW, der Wärmebedarf bei 6,8 GWh/a.

Im Jahr 2009 lag der Stromverbrauch bei ca. 2,7 GWh, im Jahr 2010 bei ca. 2,8 GWh. Die Spitzenleistung liegt gemäß Vertrag bei 750 kW, was nach derzeitiger Informationslage auskömmlich ist.

Gemäß Simulation liegt die Spitzenleistung bei 850 kW und somit geringfügig über den real gemessenen Verbrauchswerten. Die elektrische Arbeit gemäß Simulation liegt mit 2,8 GWh im Bereich der gemessenen Verbrauchswerte.

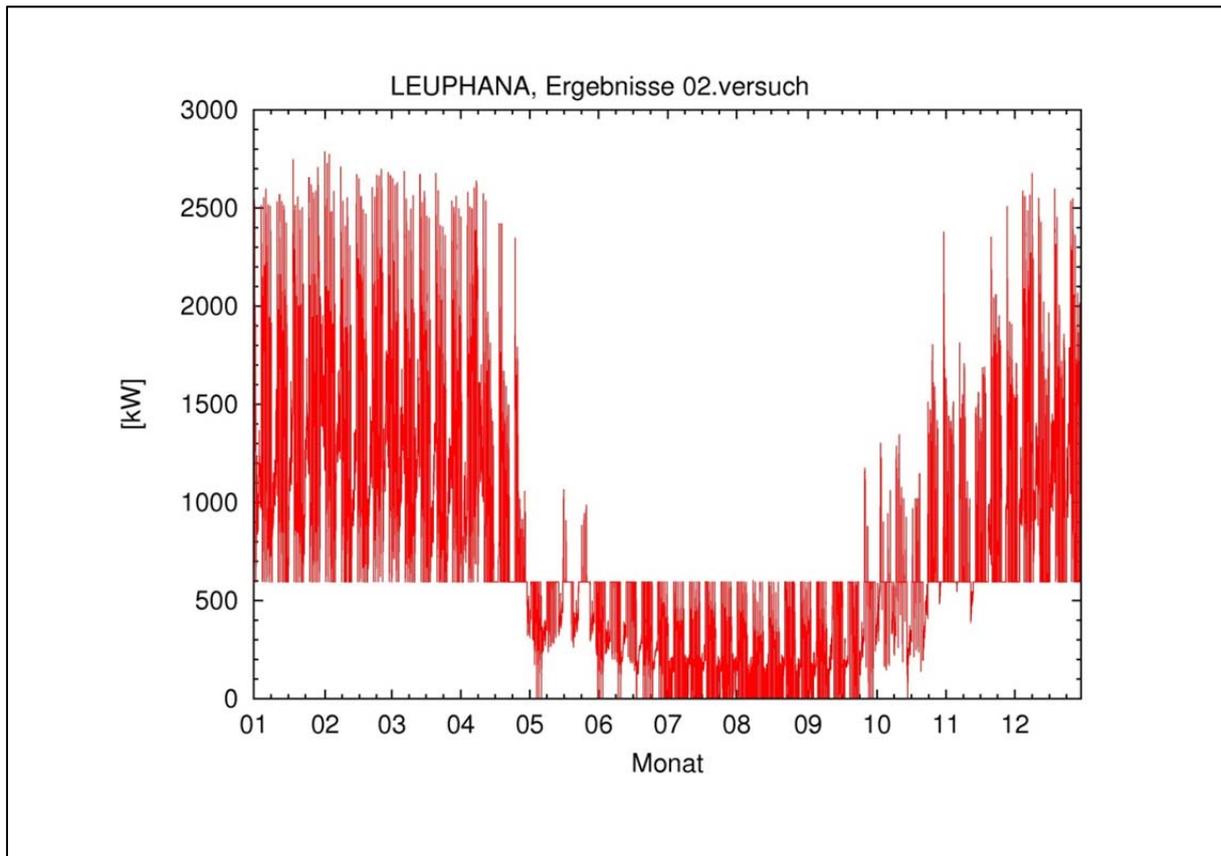


Abbildung 3: Lastgang Heizleistung gesamt (Simulation)

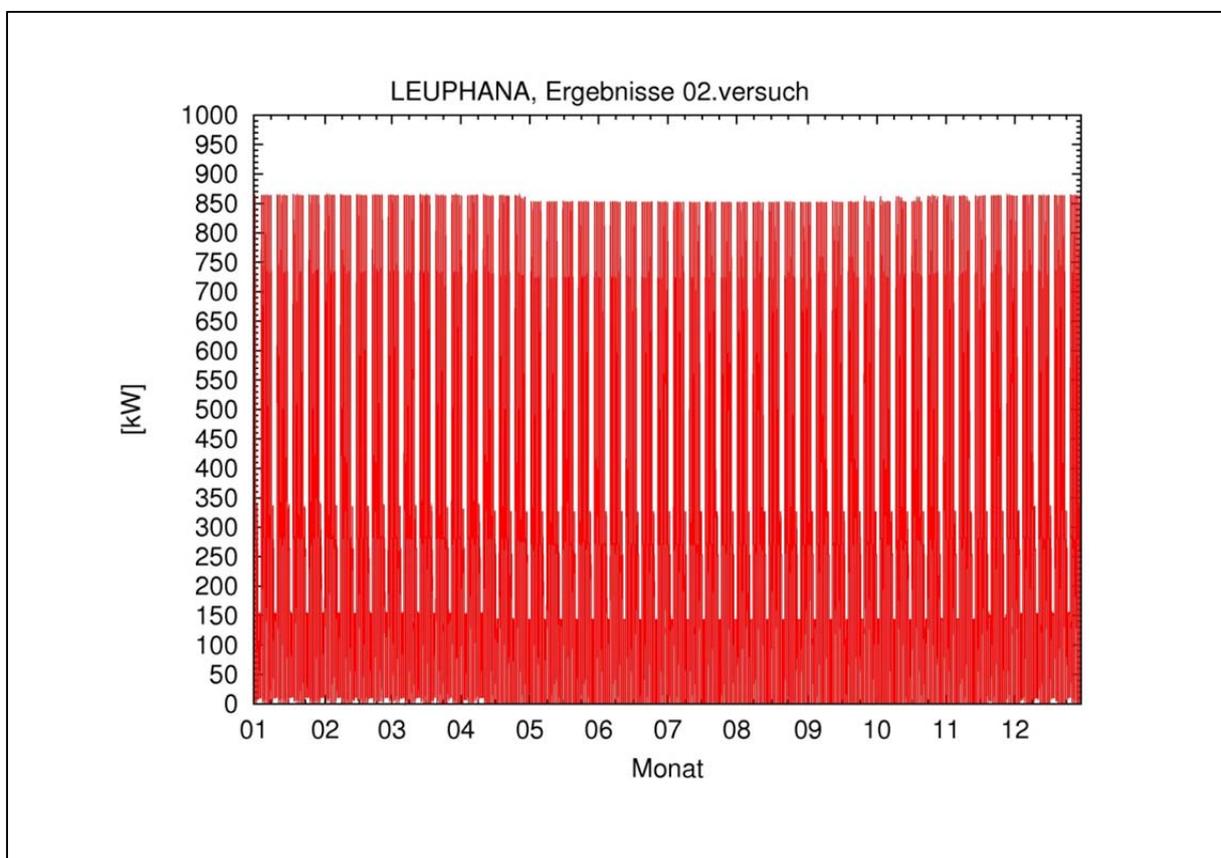


Abbildung 4: Lastgang elektrische Leistung gesamt

## 4.2. Lastgänge des Neubaus

Der Neubau des Zentralgebäudes wird primärseitig durch das Nahwärmesystem bzw. von der bestehenden Energiezentrale mit Wärme, Kälte und Strom versorgt. Der Energiebedarf des Neubaus wurde in einem separaten Gebäude-Energiekonzept (GEK) ermittelt. Es wurden verschiedene Varianten berechnet, um folgende Einflüsse auf den Energiebedarf aufzuzeigen:

- Betrieb im Auditorium
  - o Variante A: geringe Belegungsichte
  - o Variante B: hohe Belegungsichte
- E-Control-Verglasung
- Freikühlung
- Nachtkühlbetrieb

Tabelle 4 zeigt die Energiebedarfswerte des Neubaus für eine regelmäßig hohe Belegungsichte des Auditoriums bei Veranstaltungen (Variante B), die nachfolgenden Abbildungen die zugehörigen Lastgänge für Wärme, Kälte und Strom.

Basierend auf diesen Ergebnissen ist es möglich, die Netztemperaturen - als relevante Größen für die Beurteilung eines Langzeitspeichers - für das Primärnetz zu prognostizieren. Hierzu sind die Energiebilanzen um die Mischpunkte im Rohrnetz des Systemrücklaufs der Wärmeversorgung aus Massenströmen und Rücklauftemperaturen für jeden Zeitpunkt aufzustellen.

*Tabelle 4: Energiebedarf des Neubaus aus dem Primärnetz*

Neubau		Var. B
Heizleistung	kW	905
Kälteleistung	kW	304
elektrische Leistung	kW	259
Wärmebedarf	MWh/a	1184
Kältebedarf	MWh/a	61
Bedarf elektr. Energie	MWh/a	783
davon Luftförderung	MWh/a	283

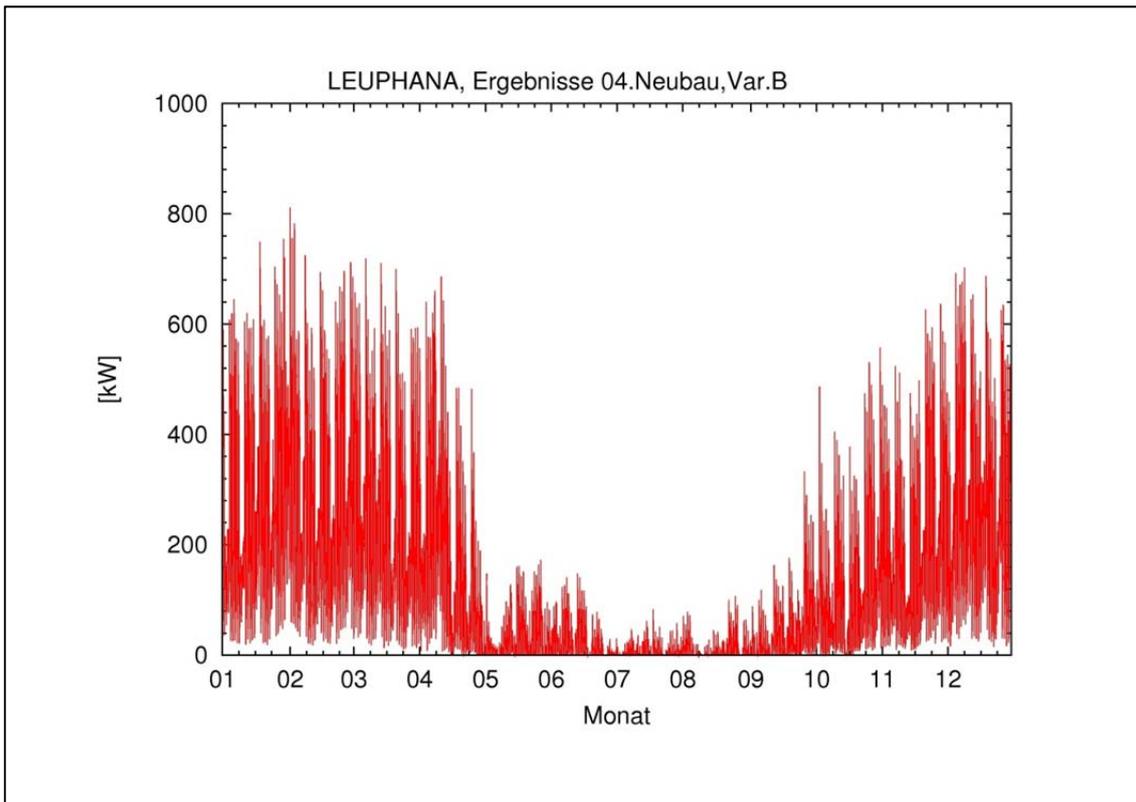


Abbildung 5: Lastgang Wärmebedarf Neubau (Var. B)

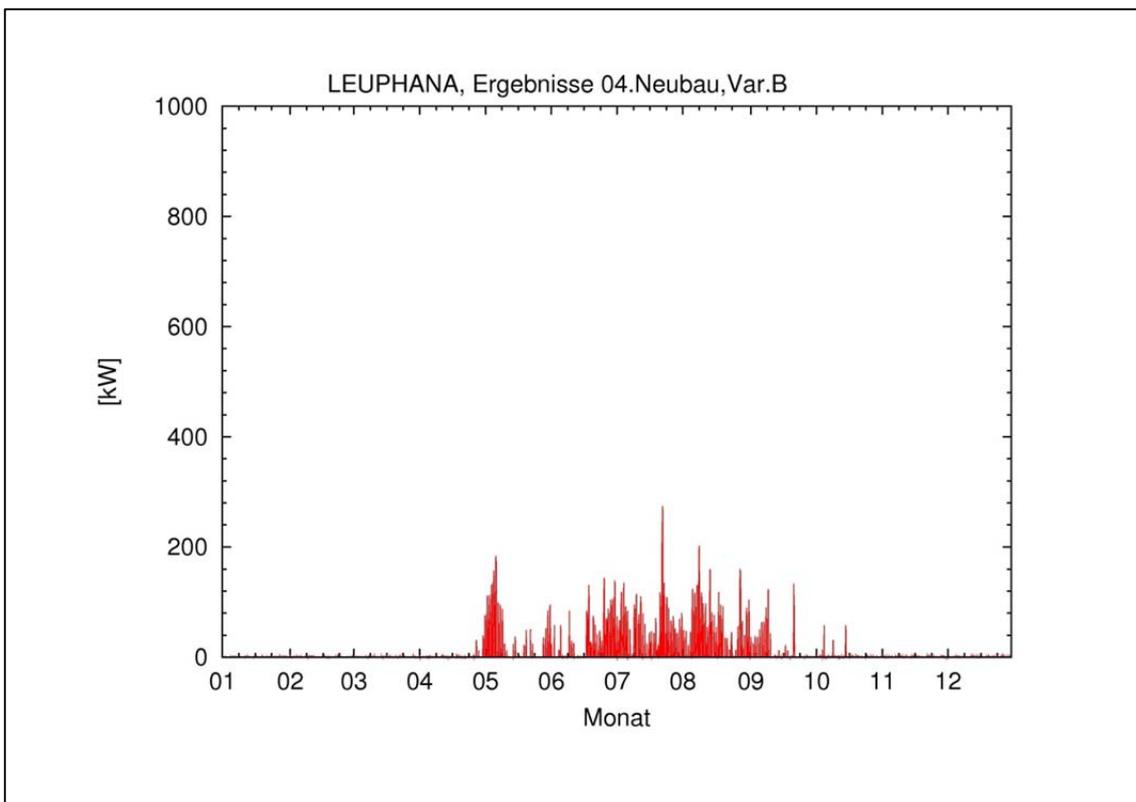


Abbildung 6: Lastgang Kälteenergie Neubau (Var. B)

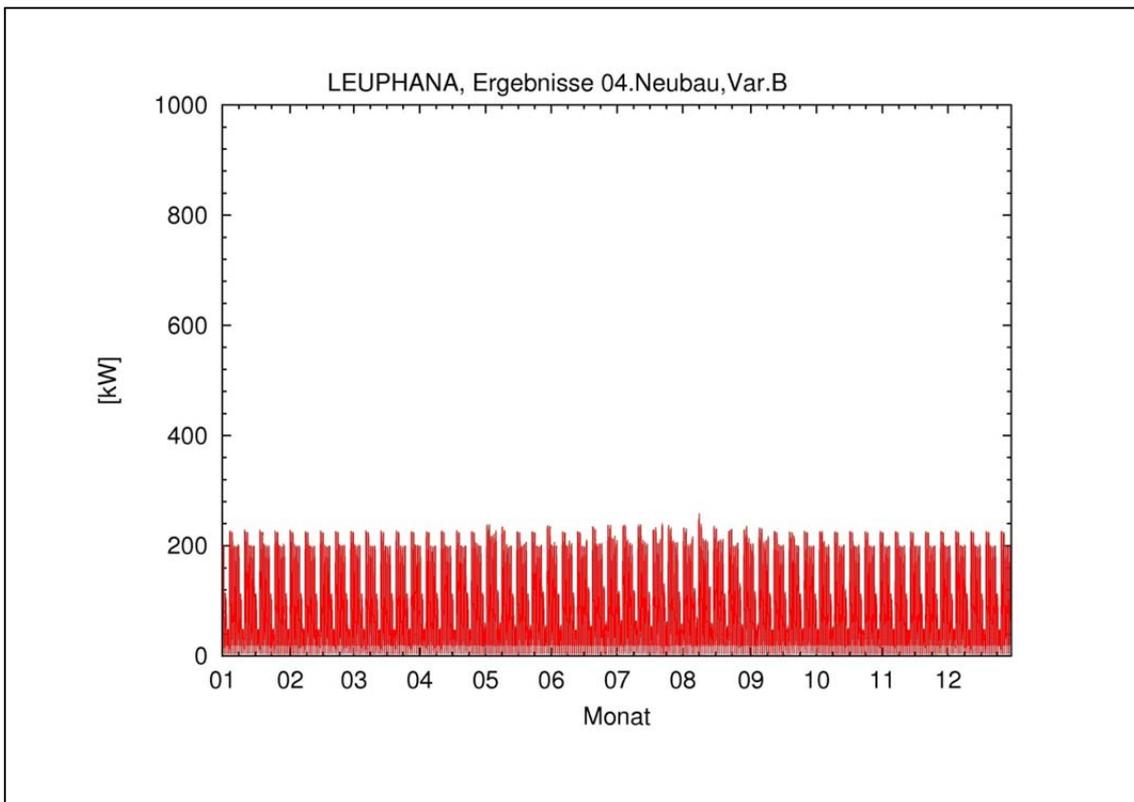


Abbildung 7: Lastgang elektrische Energie Neubau (Var. B)

## 5. Systemtemperaturanalyse

Die Analyse des Nahwärmenetzes ist der Schlüssel für die Bewertung möglicher Energiesystemvarianten mit Speichertechnik. In diesem Kapitel wird das Wärmeversorgungssystem, bestehend aus den Teilen Sekundärnetze der Bestandsgebäude, Sekundärnetz des Neubaus und Primärnetz beschrieben und basierend auf Simulationen hinsichtlich der Systemtemperaturen und Energieströme analysiert. Auf Basis der Ergebnisse dieses Kapitels erfolgt dann die Diskussion der Energiesysteme in Kapitel 6.

### 5.1. Systemtemperaturen Bestandsnetz

Für die Simulation der Einbindung des Aquiferspeichers soll ermittelt werden, inwieweit die Systemrücklaufemperatur im realen System abgesenkt werden kann. Eine hohe Spreizung zwischen Vor- und Rücklaufemperatur ist gewünscht. Das Minimum wird durch die Auslegung der Wärmeübertrager in den Gebäuden und raumlufttechnischen Anlagen bestimmt.

Es sind Systemtemperaturen für jeden Verbrauchertyp zu ermitteln, die in Korrelation mit der bestehenden Wärmeübertragercharakteristik und Hydraulik die minimale Rücklaufemperatur ergeben.

Aus diesen Einzelwerten kann die zu erwartende Systemrücklauf­temperatur als Eintritts­temperatur in den Aquiferspeicher abgeschätzt werden.

### 5.1.1. Witterungsabhängigkeit

Der Wärmebedarf der Liegenschaft hängt stark von der Witterung, im Wesentlichen der Außentemperatur, ab und folgt dem Gang der Außentemperaturen. Abbildung 8 zeigt die Jahresdauerlinie der Außentemperaturen und des Wärmebedarfs.

Zur Bestimmung der Systemtemperaturen zur Bewertung des Aquiferspeichers werden die Extremtemperaturen vernachlässigt und statistisch relevante Betriebszustände betrachtet. Der Grund hierfür ist, dass die Extremtemperaturen nur wenige Stunden/Tage im Jahr vorherrschen und die Ergebnisse vor dem Hintergrund von Unsicherheiten bei der Simulation verzerren können.

Wie Abbildung 8 zeigt, liegen Außentemperaturen  $< -5\text{ °C}$  gemäß Testreferenzjahr nur in ca. 100 h im Jahr vor, so dass diese Grenze als Basis für die nachfolgenden Betrachtungen gewählt wurde.

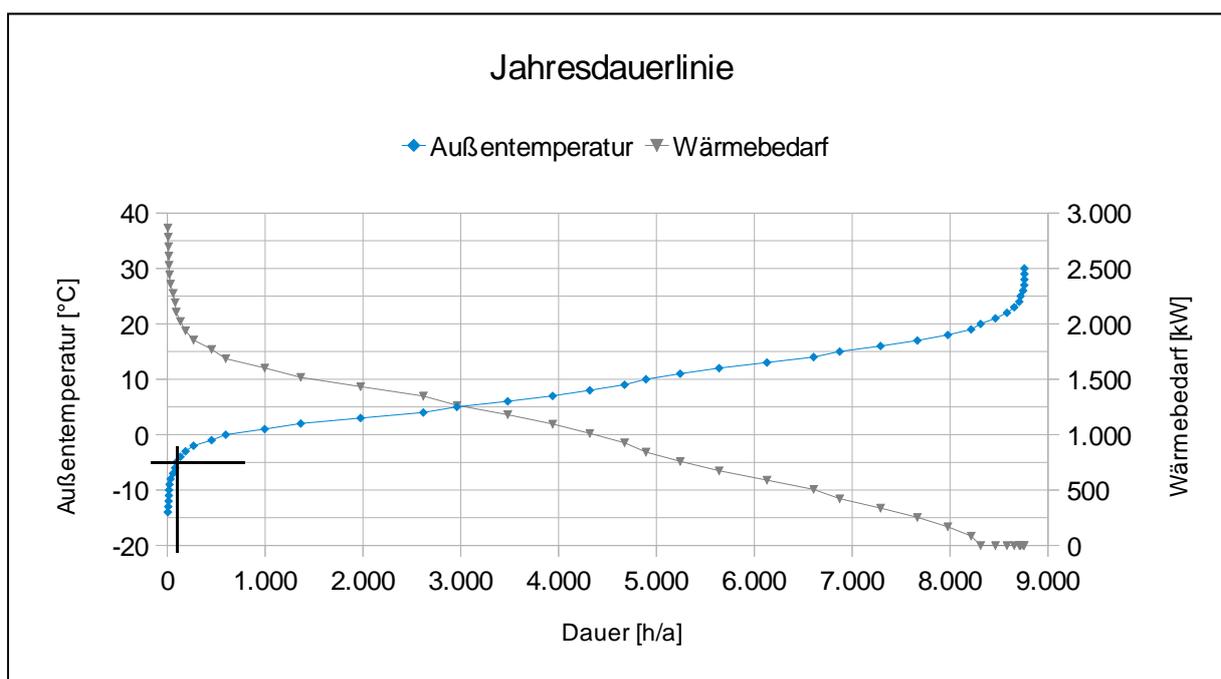


Abbildung 8: Jahresdauerlinie Außentemperatur und Wärmebedarf

### 5.1.2. Statische Heizflächen

Zur Leistungsanpassung der Wärmeübertrager an den witterungsabhängigen Wärmebedarf werden der Massenstrom des Heizmediums und die Vorlauf­temperatur geregelt. Die Vorlauf­temperatur wird zentral der Witterung entsprechend nach einer Heizkurve geführt, der Massenstrom mit den

Regeleinrichtungen direkt am Verbraucher nach der Regelabweichung. Die Rücklauftemperatur ergibt sich aus dem Wärmegleichgewicht zwischen dem Heizkörper und der Umgebung.

Die Wärmeübergabe an den Raum erfolgt in den Räumen über statische Heizflächen. Für die minimalen Systemtemperaturen eines Heizkörpers sind folgende Einflussgrößen ausschlaggebend:

- (a) Bauart/Typ des Heizkörpers (Platten- und Konvektorbelegung)
- (b) Größe des Heizkörpers
- (c) zu deckende Heizlast

Aus den Daten zu (a) und (b) kann die Norm-Heizleistung des Heizkörpers unter Normbedingungen ( $\vartheta_{VL,N}/\vartheta_{RL,N}/\vartheta_{Raum,N}=90/70/20$ ) ermittelt werden. Die Norm-Heizleistung ist bei Auslegung der Heizkörper auf andere Systemtemperaturen (hier:  $\vartheta_{VL,N}/\vartheta_{RL,N}/\vartheta_{Raum,N}=80/60/20$ ) um den Korrekturfaktor  $\tau_{Netz}$  zu korrigieren. Für einen Standardraum mit Plattenheizkörper ( $n_{\emptyset}=1,3$ ), der Raum-Solltemperatur  $\vartheta_{Raum}=20$  °C und den Auslegungsnetztemperaturen<sup>3</sup>  $\vartheta_{VL}=80$  °C und  $\vartheta_{RL}=60$  °C ergibt sich aus<sup>4</sup>

$$\tau_{Netz} = \frac{\dot{q}}{\dot{q}_N} = \left( \frac{\Delta \vartheta_{ln}}{\Delta \vartheta_{N,ln}} \right)^n \quad \text{mit } \Delta \vartheta_{ln} = \frac{\vartheta_{VL} - \vartheta_{RL}}{\ln \left( \frac{\vartheta_{VL} - \vartheta_{Raum}}{\vartheta_{RL} - \vartheta_{Raum}} \right)}$$

ein Korrekturfaktor  $\tau_{Netz} = 0,785$ . Damit kann das bestehende System „Raumheizung“ nachgebildet werden.

Werden die Systemtemperaturen verändert und in der Folge die Massenströme im hydraulischen Netz, ist dies zulässig, solange die resultierenden Massenströme nicht größer sind als die der Auslegung, da die Funktionstüchtigkeit der Wärmeverteilung dann nicht mehr unterstellt werden darf.

Der Zusammenhang von Heizleistung und Systemtemperatur kann nun abgebildet werden mit

$$\dot{Q}_{HK} = k \cdot A \cdot (\vartheta_m - \vartheta_{Raum}) \quad \text{mit } \vartheta_m = \frac{\vartheta_{VL} + \vartheta_{RL}}{2}$$

wobei der Ausdruck  $k \cdot A$  die Wärmeübertragereigenschaft des Heizkörpers beinhaltet und damit konstant ist (Anlagenbestand). Für die Wassertemperaturen gilt weiterhin

$$\dot{Q}_{HK} = \dot{m}_{Wasser} \cdot c_{p,Wasser} \cdot (\vartheta_{VL} - \vartheta_{RL}) .$$

<sup>3</sup> vgl. Trendkurvenausdruck vom 25.08.2011, Geb. 26 Gesamt Fernwärme VL-Temp. und RL-Temp.

<sup>4</sup> vgl. VDI-Wärmeatlas, Absatz Fb1, 10. Aufl., 2006

Aus diesen Abhängigkeiten kann die minimale Rücklauf­temperatur bei gegebener Heizleistung durch Variation der Vorlauf­temperatur und des Wassermassenstroms iterativ ermittelt werden.

Die zu deckende Heizlast (c) aus Transmission und Infiltration kann für die Standardgebäude vereinfacht ermittelt werden. Die treibende Temperatur­differenz ergibt sich aus der Soll-Raumtemperatur und der Außentemperatur, zusammengefasst zu

$$\dot{Q}_{Raum} = \left( \overline{u \cdot A}_{Fassade} + \dot{m}_{Inf, Luft} \cdot c_{p, Luft} \right) \cdot (\vartheta_{Raum} - \vartheta_{außen}) .$$

Mit  $\dot{Q}_{HK} \geq \dot{Q}_{Raum}$  ist die Heizleistung für die vorgenannte Iteration gegeben.

Eine stichprobenhafte Bestandsaufnahme der Heizkörper in verschiedenen Gebäuden hat gezeigt, dass ein durchgängiges Dimensionierungsschema nicht zu erkennen und lediglich die Heizkörperhöhe von H=500 mm weitgehend einheitlich ist, Typ und Baulänge der Heizkörper variieren.

Zur weiteren Diskussion wird deshalb ein Dimensionierungsfaktor  $\delta_{dim}$  eingeführt, der die Über- und Unterdimensionierung des Heizkörpers  $\dot{Q}_{HK, Dim}$  (Heizleistung bei Auslegungsbedingungen) auf die erforderliche Heizleistung  $\dot{Q}_{Raum}$  bezieht. Dadurch kann die Anzahl der zu betrachtenden Fälle reduziert und eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf alle Räume erreicht werden.

$$\delta_{Dim} = \frac{\dot{Q}_{HK, Dim}}{\dot{Q}_{Raum}}$$

Innerhalb der Stichprobe stellt sich die Verteilung von  $\delta_{dim}$  gemäß Abbildung 9 dar.

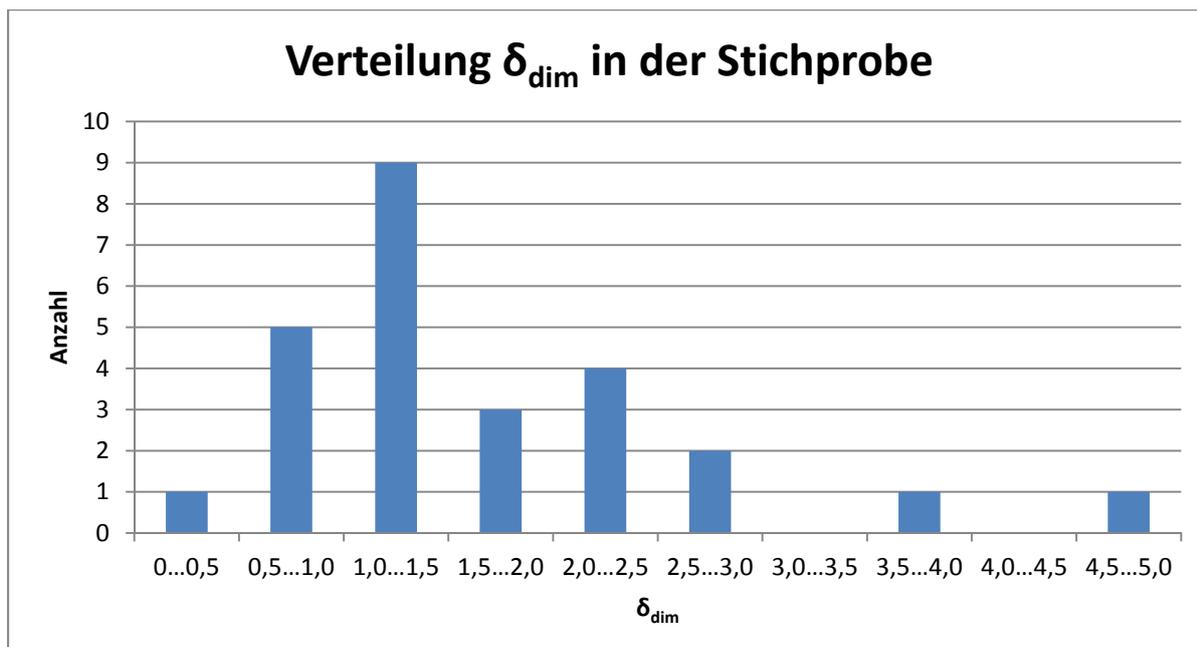


Abbildung 9: Verteilung des Dimensionierungsfaktors

Für einen Großteil der Räume liegt  $\delta_{\text{dim}}$  im Bereich von 0,5 bis 2,5, so dass die Betrachtung der Rücklauftemperaturen für diesen Bereich erfolgen kann (Räume im Bereich  $< 1,0$  sind ausschließlich Seminar- oder Laborräume, die Unterdeckung ist im realen Betrieb offensichtlich unkritisch).

Aus der Iteration ergeben sich Wassertemperaturkurven in Abhängigkeit der Außentemperatur für verschiedene Dimensionierungsfaktoren. Die Vorlauftemperaturkurve gibt die für den Verbraucher notwendige Heizkurve an, bei der sich die minimale Rücklauftemperatur unter Beachtung der Randbedingung des Massenstromes ergibt.

Folgende Fälle werden nachfolgend betrachtet:

- a. der Heizkörper ist unterdimensioniert (Abbildung 10)
- b. der Heizkörper ist genau auf die Heizlast ausgelegt (Abbildung 11)
- c. der Heizkörper ist überdimensioniert (Abbildung 12)

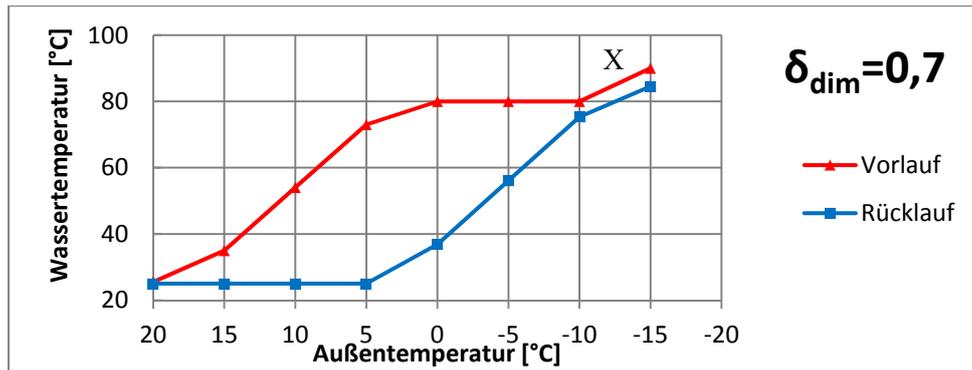


Abbildung 10: Temperaturkurve bei unterdimensionierter Heizfläche

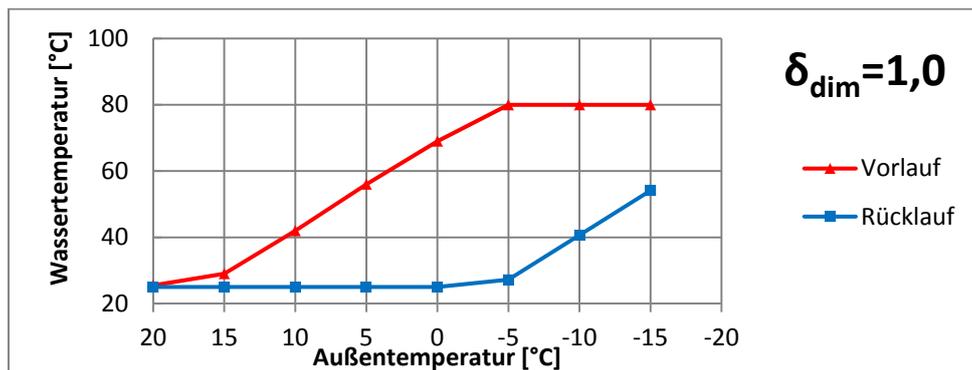


Abbildung 11: Temperaturkurve bei genau dimensionierter Heizfläche

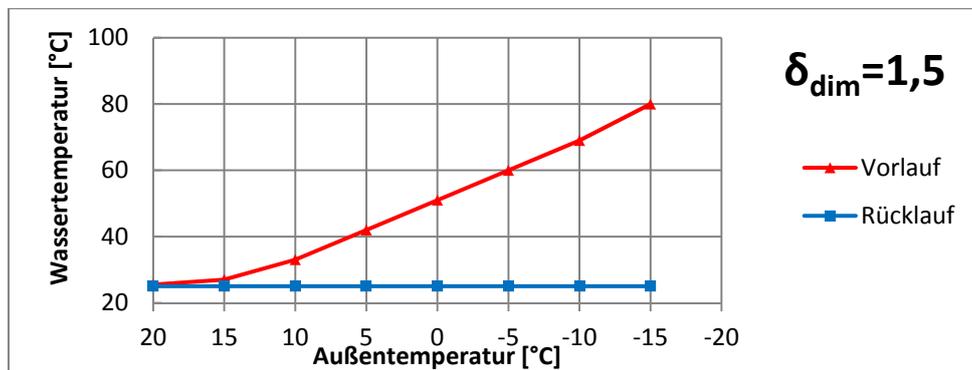


Abbildung 12: Temperaturkurve bei überdimensionierter Heizfläche

**Anmerkung zu Fall a:**

Durch die zu geringe Heizfläche gelingt es nicht, die Heizlast zu decken. Die mittlere Übertemperatur müsste höher sein als die verfügbare Vorlauftemperatur (siehe Abschnitt „X“ in der Kurve).

Den Kurven ist zu entnehmen, dass die Rücklauftemperatur bei rechtzeitiger Anhebung der Vorlauftemperatur bzw. ausreichend steiler Heizkurve konstant nahe der Raumtemperatur gehalten werden kann. Dies ist bei ausreichender Dimensionierung  $\delta_{dim} \geq 1,0$  erst bei relativ geringen Außentemperaturen erforderlich.

Bei der ausschlaggebenden Außentemperatur von  $-5\text{ °C}$  (siehe 5.1.1) liegt die Rücklauftemperatur bei Heizflächen mit  $\delta_{\text{dim}} \geq 1,0$  bei ca.  $25\text{ °C}$ , mit  $\delta_{\text{dim}} = 0,7$  bereits bei ca.  $58\text{ °C}$ , mit niedrigeren  $\delta_{\text{dim}}$  noch höher.

Unterdimensionierte Heizkörper sollten nochmals überprüft und die Fehlleistung kompensiert werden. Je nach deren Leistungsanteil kann die Rücklauftemperatur im gemeinsamen Rücklauf durch wenige unterdimensionierte Heizkörper deutlich erhöht werden.

Unter der Prämisse, dass der Leistungsanteil der unterdimensionierten Heizkörper gering ist, **erscheint eine Rücklauftemperatur in den statischen Heizkreisen von ca.  $30\text{ °C}$  erreichbar zu sein.**

### 5.1.3. Luftherhitzer

Die zweite Verbrauchergruppe sind die Luftherhitzer der Lüftungsanlagen. Diese werden als reine Gegenstromapparate betrachtet, da lokale Temperaturverhältnisse innerhalb der Register für die Beurteilung der theoretischen Heizkurve irrelevant sind und vernachlässigt werden können.

Neben den Temperaturen des Heizmediums ( $\vartheta_{\text{VL,N}}/\vartheta_{\text{RL,N}}$ ) sind die Lufteintritts- und Luftaustrittstemperaturen ( $\vartheta_{\text{L,EIN}}/\vartheta_{\text{L,AUS}}$ ) des Heizregisters zu berücksichtigen. Aus diesen resultiert die treibende Temperaturdifferenz

$$\Delta \vartheta_{m,\text{ln}} = \frac{(\vartheta_{\text{RL}} - \vartheta_{\text{L,EIN}}) - (\vartheta_{\text{VL}} - \vartheta_{\text{L,AUS}})}{\ln\left(\frac{\vartheta_{\text{RL}} - \vartheta_{\text{L,EIN}}}{\vartheta_{\text{VL}} - \vartheta_{\text{L,AUS}}}\right)}$$

Da die Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnungssystemen (WRG) ausgestattet sind, ergeben sich die Erhitzerleistungen nicht unmittelbar aus der Außentemperatur. Die Eintrittstemperatur in den Erhitzer ergibt sich aus der Rückwärmezahl  $\phi_{\text{WRG}}$  der WRG und der Ablufttemperatur  $\vartheta_{\text{AB}}$  aus dem jeweiligen Versorgungsbereich aus:

$$\vartheta_{\text{L,EIN}} = \vartheta_a + \Phi_{\text{WRG}} \cdot (\vartheta_{\text{AB}} - \vartheta_a)$$

Die Luftaustrittstemperatur  $\vartheta_{\text{L,AUS}}$  entspricht der Soll-Zulufttemperatur der jeweiligen Anlage.

$$\vartheta_{\text{L,AUS}} = \vartheta_{\text{L,Zu}}$$

Die Leistungsregelung funktioniert prinzipiell wie die der Heizkörper, d.h. Vorlauftemperaturregelung nach einer Heizkurve. Die Heizleistung des Erhitzers in Abhängigkeit der Außentemperatur ergibt sich zu

$$\dot{Q}_{\text{Erhitzer}} = k \cdot A \cdot \Delta \vartheta_{m,\text{ln}}$$

sowie durch

$$\dot{Q}_{\text{Erhitzer}} = \dot{m}_{\text{Wasser}} \cdot c_{p,\text{Wasser}} \cdot (\vartheta_{\text{VL}} - \vartheta_{\text{RL}})$$

Mit  $\dot{Q}_{Erhitzer} = m_{Luft} \cdot c_{p,Luft} \cdot (\vartheta_{L,Aus} - \vartheta_{L,Ein})$  ist die Heizleistung für die Iteration gegeben.

Beispielhaft werden zwei der größten Lüftungsanlagen im Wärmenetz betrachtet:

- a. RLT02, Bibliothek, 35.000 m<sup>3</sup>/h,  $\phi_{WRG}=0,286$ ,  $\vartheta_{L,Zu} = 22$  °C

Abbildung 13

- b. RLT01, Hörsaal 3, 7.000 m<sup>3</sup>/h,  $\phi_{WRG}=0,43$ ,  $\vartheta_{L,Zu} = 26$  °C

Abbildung 14

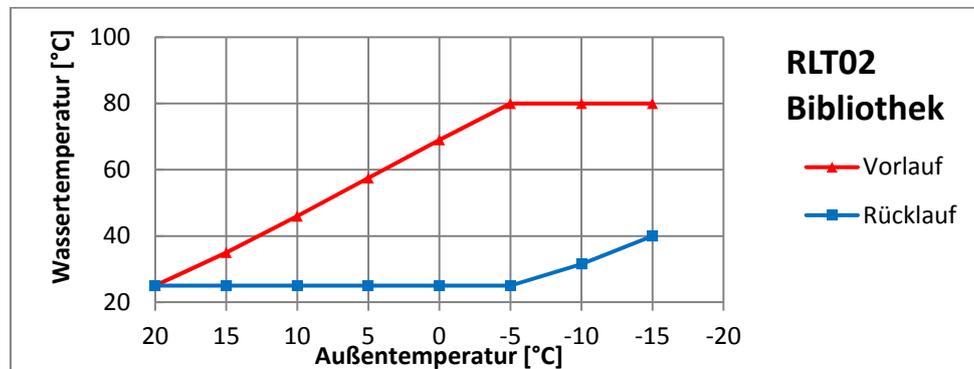


Abbildung 13: Temperaturkurven Erhitzer RLT02 Bibliothek

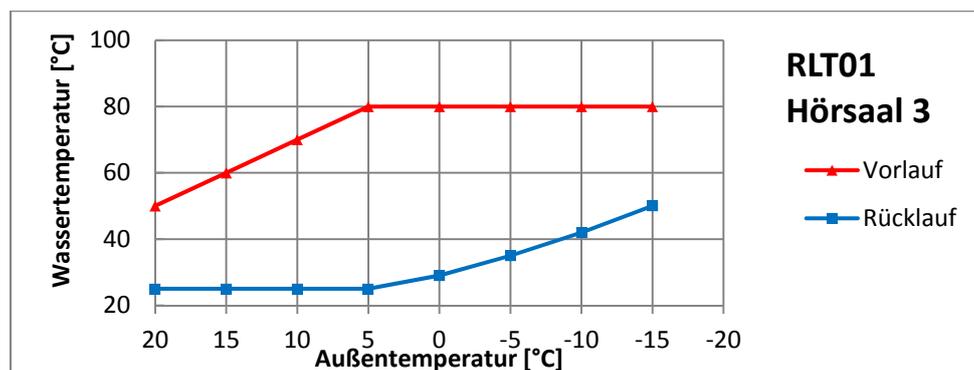


Abbildung 14: Temperaturkurven Erhitzer RLT01 Hörsaal 1

Den Kurven ist zu entnehmen, dass die Rücklauftemperatur bei rechtzeitiger Anhebung der Vorlauftemperatur bzw. ausreichend steiler Heizkurve konstant im Bereich der Lufttemperatur gehalten werden kann. Je nach Auslegung und Betriebspunkt steigt die Rücklauftemperatur erst bei Erreichen der maximalen Vorlauftemperatur.

**Bei den bestehenden Lufterhitzern erscheint eine Rücklauftemperatur von ca. 40 °C als realisierbar.**

#### **5.1.4. Warmwasserbereiter**

Die Warmwasserbereitung wird derzeit noch über das zentrale Wärmenetz versorgt, weshalb die Netztemperaturen an den Temperaturanforderungen der Warmwasserbereiter orientiert sein müssen.

Da die Warmwasserbereiter jedoch zeitnah auf elektrische Systeme bzw. dezentrale Lösungen umgestellt werden sollen, finden diese keine Berücksichtigung bei der Betrachtung des zentralen Wärmenetzes.

#### **5.1.5. Ergebnis**

Die Rücklauftemperatur aus dem Gebäudebestand resultiert aus den Heizkurven, nach denen die Vorlauftemperatur der verschiedenen Heizkreise gefahren wird. Das Ziel eines möglichst kühlen Systemrücklaufs kann durch steilere Heizkurven erreicht werden. Durch höhere Vorlauftemperaturen steigt die Übertemperatur des Heizmediums gegenüber der Raumtemperatur und damit die Heizleistung. Der Massenstrom stellt sich durch die lokalen Regeleinrichtungen auf einem niedrigeren Niveau ein. Die Temperaturspreizung steigt, bzw. die Rücklauftemperatur sinkt. Höhere Vorlauftemperaturen provozieren niedrigere Rücklauftemperaturen und entspannen die hydraulischen Verhältnisse. Die Wärmeverluste der Verteilung steigen hingegen.

**Aus den Wassertemperaturkurven lässt sich unter folgenden Annahmen und Vereinfachungen eine erreichbare Systemrücklauftemperatur von ca. 40 °C abschätzen:**

1. die Stichprobe hat repräsentativen Charakter für alle Gebäude
2. Außentemperaturen  $< -5$  °C werden vernachlässigt, da diese nur phasenweise und zu einer geringen Stundenzahl im Jahr auftreten
3. stark unterdimensionierte Heizflächen werden bei Bedarf vergrößert oder fehlende Heizleistungen anderweitig kompensiert
4. Kurzschlussstrecken und Bypässe von Vor- zu Rücklauf werden eliminiert, die Leitungen somit strikt getrennt, die Hydraulik und Regelung entsprechend geändert
5. Warmwasserbereiter werden nicht oder weiterhin nur dann zentral versorgt, wenn diese keine höheren Temperaturen in den Systemrücklauf leiten.
6. die mittlere Vorlauftemperatur über ein Jahr betrachtet wird steigen, somit auch der Wärmeverlust im Verteilnetz; die Energieeinsparung muss die zusätzlichen Verluste überkompensieren.

## 5.2. Wärmeversorgung des Neubaus

Ergänzend zu den in 5.1 aufgeführten Überlegungen wird auch der Einfluss des im Bau befindlichen Zentralgebäudes analysiert. Die der Planung zu Grunde gelegten Systemtemperaturen sind im Vergleich zum Gebäudebestand niedrig, so dass auch die Rücklauftemperatur des Neubaus deutlich unter der des Bestandsnetzes liegen wird. Nachfolgend wird untersucht, ob und wie der Neubau die Einbindung eines Aquifer-Speichers durch Absenkung der Rücklauftemperatur unterstützen kann.

### 5.2.1. Sekundärnetz der Wärmeversorgung des Neubaus

Der Neubau wird - wie auch die Bestandsgebäude - durch das Nahwärmenetz des Campus mit Wärme versorgt. Die Systemtrennung erfolgt durch einen Wärmeübertrager, der primärseitig auf eine Sekundärvorlauftemperatur von 55 °C geregelt wird. Im Gebäude werden zwei Wärmenetze aufgebaut:

- das Niedertemperaturnetz (35 °C/25 °C) versorgt die Flächen mit Fußbodenheizung sowie die dynamischen Heizkreise der RLT-Anlagen in Zentrale 1
- das Mitteltemperaturnetz (55 °C/35 °C) versorgt die statischen Heizflächen im gesamten Gebäude sowie die dynamischen Heizkreise der RLT-Anlagen in Zentrale 2

Beide Netze werden außentemperaturabhängig geregelt. Die resultierende primärseitige Rücklauftemperatur hängt von der Mischtemperatur der Rückläufe beider Netze und der Lastverteilung auf die Netze ab.

### 5.2.2. Systemtemperaturen der Heizkreise

Die Heizkurven der statischen Heizkreise werden außentemperaturgeführt geregelt. Zu unterscheiden sind die massebehafteten Heizflächen im Niedertemperaturnetz (Fußbodenheizung) und die massearmen Heizflächen im Mitteltemperaturnetz (Umluftgebläsekonvektoren, Heizkörper).

#### Rücklauftemperatur der massebehafteten Heizflächen

Die massebehafteten Verbraucher weisen eine hohe thermische Speicherfähigkeit und eine große wirksame Heizfläche auf. Diese Heizflächen werden nur geringfügig temperiert, um die Raumtemperaturen in den relativ engen Grenzen (z.B. 20 bis 26 °C) halten zu können. Zudem führt die Speicherfähigkeit zu einer erheblichen Totzeit im Regelverhalten, weshalb auf die üblichen Lastschwankungen in Gebäuden nicht in ausreichender Geschwindigkeit reagiert werden kann.

Die Heizkurve wird mit dem Ziel der Kompensation einer saisonal schwankender Grundlast sehr flach gewählt. In der Heizperiode liegt die Vorlauftemperatur ca. 15 K über der angestrebten Raumtemperatur, im Auslegungsfall also 35 °C auf der Primärseite. Die Temperatur der Speichermasse folgt der Vorlauftemperatur und hebt die Raumtemperatur. Zudem wird die

Schwankung der Raumtemperatur durch den sogenannten Selbstregelleffekt (keine Leistungsabgabe an die Raumluft, wenn diese die gleiche Temperatur wie die Oberflächentemperatur aufweist) geglättet.

Die Heizkurve dieser Kreise steht also in engem Verhältnis mit der tatsächlichen Einbindung dieser Heizflächen. Losgelöst davon werden die Rücklauftemperaturen dieser trägen Heizflächen vergleichsweise konstant im Bereich der angestrebten Raumtemperatur liegen. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die Rücklauftemperaturen im Mittel über die Heizperiode bei 24 °C liegen.

### Rücklauftemperatur der massearmen Heizflächen

Massearme Heizflächen im Neubau sind z.B. Umluftgebläsekonvektoren und Heizkörper. Die Heizkurven, hier auf niedrige Rücklauftemperaturen optimiert angenommen, stellen sich gemäß Abbildung 15 dar. Räume, in denen diese Heizflächen vorgesehen sind, werden in der Regel natürlich be- und entlüftet und sind überdies nicht mit weiterer Klimatechnik ausgestattet. Die Heizlast hängt somit von der Außentemperatur ab. Aufgrund des Dämmstandards des Neubaus kann die Heizkurve bereits bei einer Außentemperatur von -5 °C reduziert werden, da die Rücklauftemperatur bereits nah an der Raumtemperatur (der thermodynamisch minimalen Rücklauftemperatur) liegt.

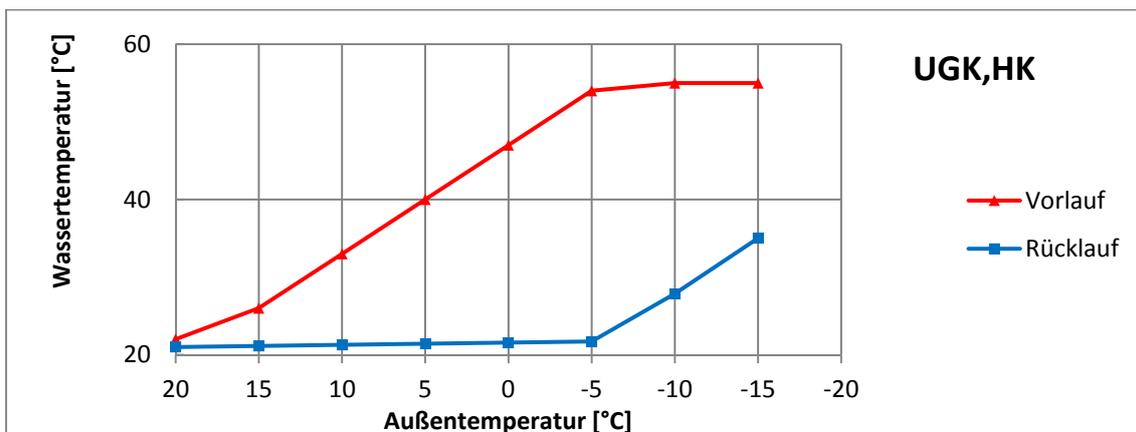


Abbildung 15: Heizkreistemperaturen Umluftgebläsekonvektoren und Heizkörper

### Rücklauftemperaturkurve der RLT-Anlagen

Die Heizkurven, hier auf niedrige Rücklauftemperaturen optimiert angenommen, stellen sich gemäß Abbildung 16 für RLT-Zentrale 1 und Abbildung 17 für RLT-Zentrale 2 dar. Dieser Betrachtung liegen der Betrieb der Wärmerückgewinnungsanlagen und das Berechnungsmodell für reine Gegenstromapparate für die Nacherhitzer zu Grunde.

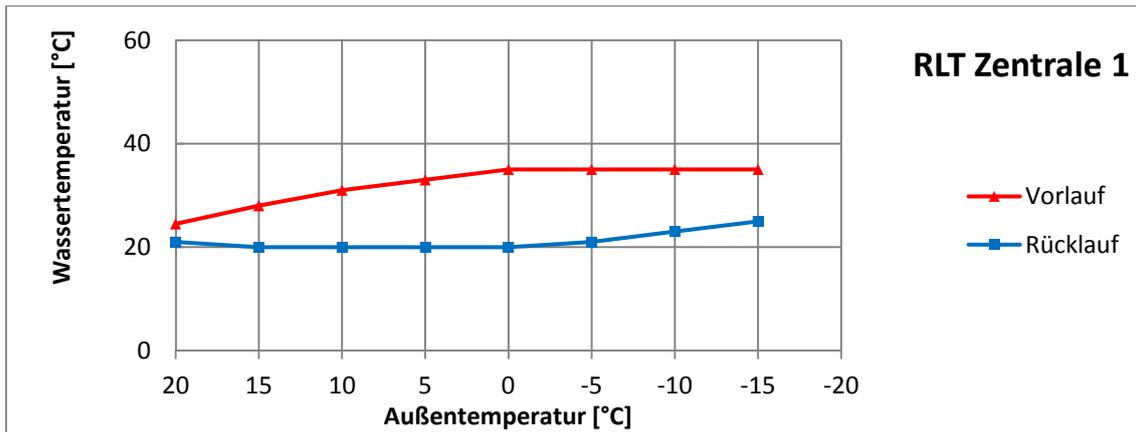


Abbildung 16: Heizkreistemperaturen RLT Zentrale 1

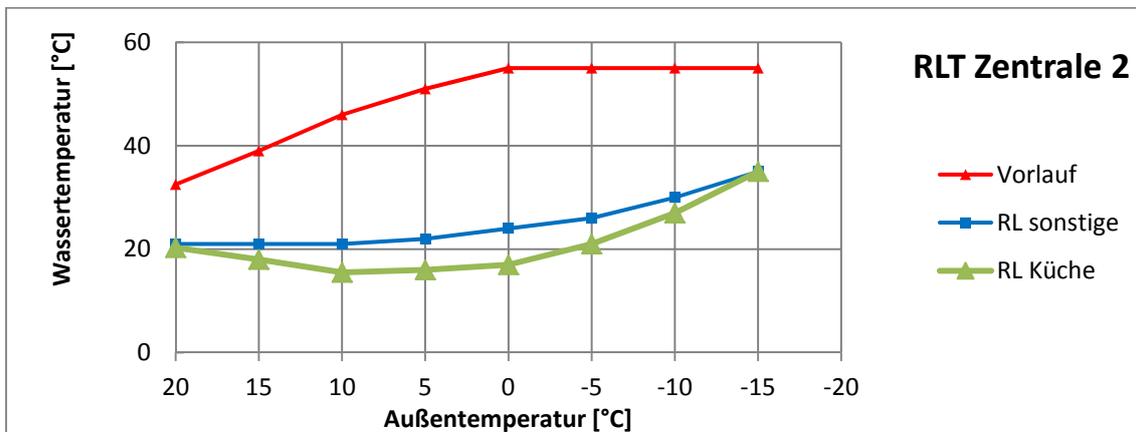


Abbildung 17: Heizkreistemperaturen RLT Zentrale 2

Auf Basis der hier dargestellten Heizkurven liegen die Rücklauftemperaturen beider dynamischen Kreise bei ca. 20 °C. Die Rücklauftemperaturen der RLT-Anlage „Küche“ liegen unterhalb derer der übrigen RLT-Anlagen, da die WRG dieser Anlage aufgrund der konstruktiven Anforderungen an Küchenabluft einen schlechteren Wirkungsgrad aufweist, wodurch die Eintrittstemperaturen in den Erhitzer niedriger liegen. Dennoch liegt die Rücklauftemperatur auch bei dieser Anlage im Bereich von 20 °C.

### 5.2.3. Jahreskurve der Rücklauftemperaturen des Sekundärnetzes

Unter der Annahme der vorstehend beschriebenen Heizkurven, denen die Minimierung der Rücklauftemperatur zu Grunde liegt, ergibt sich die Rücklauftemperatur des Sekundärnetzes (als Eintrittstemperatur in die Übergabestation) aus der Mischtemperatur aller Rückläufe:

$$\vartheta_{RL,Neubau} = \frac{\sum (\dot{m}_{RL,Heizkreis} \cdot \vartheta_{RL,Heizkreis})}{\sum \dot{m}_{RL,Heizkreis}}$$

Die Massenströme  $\dot{m}_{RL,Heizkreis}$  ergeben sich aus den Lastkurven der Heizkreise des Neubaus:

$$\dot{m}_{RL,Heizkreis} = \frac{\dot{Q}_{Heizkreis}}{(\vartheta_{VL,Heizkreis} - \vartheta_{RL,Heizkreis})}$$

Abbildung 18 zeigt den Temperaturverlauf über das Jahr unter Berücksichtigung der Lastverläufe und Charakteristika der einzelnen Heizkreise. Dieser Kurve liegen die vorstehend beschriebenen optimierten Heizkurven zugrunde. Es ist zu erkennen, dass die Rücklauftemperatur im Sekundärnetz praktisch ganzjährig im Bereich von ca. 22 °C liegen kann.

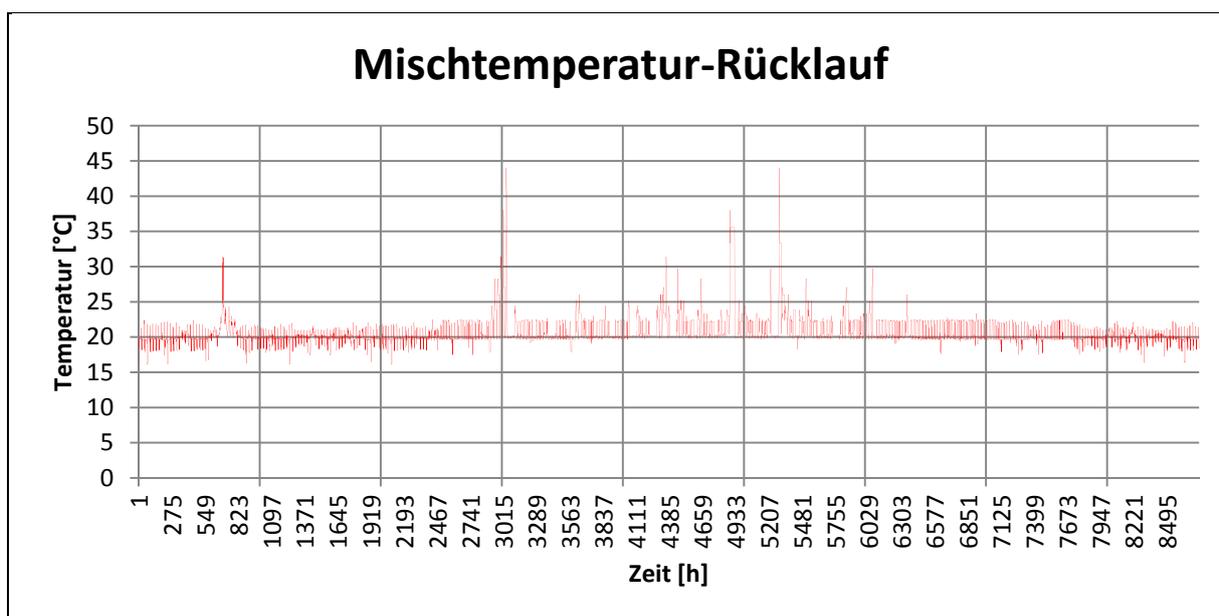


Abbildung 18: Mischtemperatur der Rückläufe aller Heizkreise des Neubaus

### 5.3. Rückwirkung des Neubaus auf das Primärnetz

Die Rückwirkung der niedrigen Rücklauftemperaturen des Sekundärnetzes auf die des Primärnetzes wird durch den Wärmeübertrager der Wärmeübergabestation und die Leistungsregelung bestimmt, die aus einem Drosselorgan auf der Primärseite des systemtrennenden Wärmeübertrager besteht. Dieses Drosselorgan bestimmt den primärseitigen Massenstrom und wird nach der sekundärseitigen Vorlauftemperatur geregelt.

Die primärseitige Vorlauftemperatur hängt von der hydraulischen Einbindung des Neubaus in das Nahwärmenetz des Campus ab. Folgende Alternativen bestehen:

1. Parallelschaltung zu den Bestandsgebäuden (Vorlauftemperaturkurve nach Abbildung 19)
2. Reihenschaltung in den Rücklauf des Bestandsnetzes (Vorlauftemperaturkurve nach Abbildung 20)

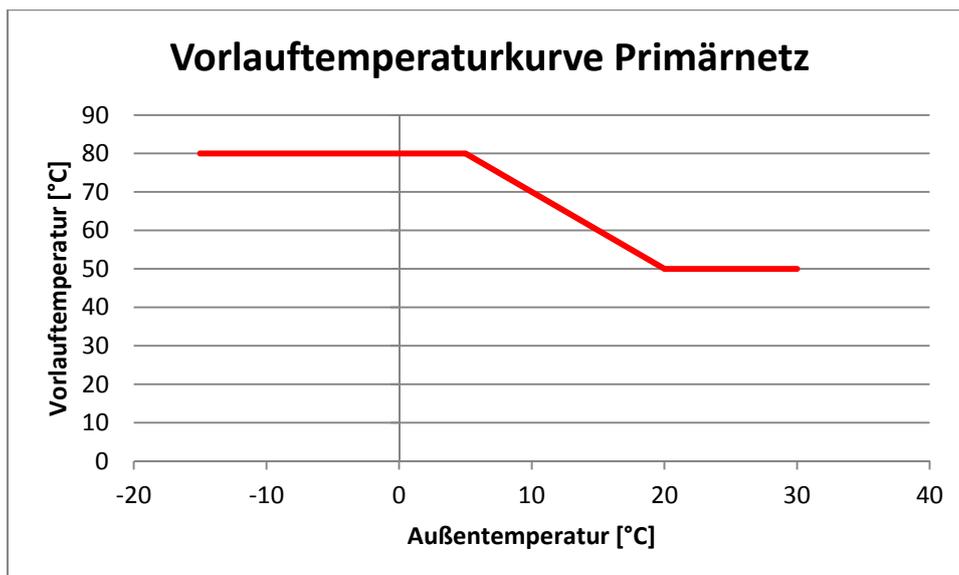


Abbildung 19: Vorlauftemperaturkurve des Primärnetzes bei Parallelschaltung

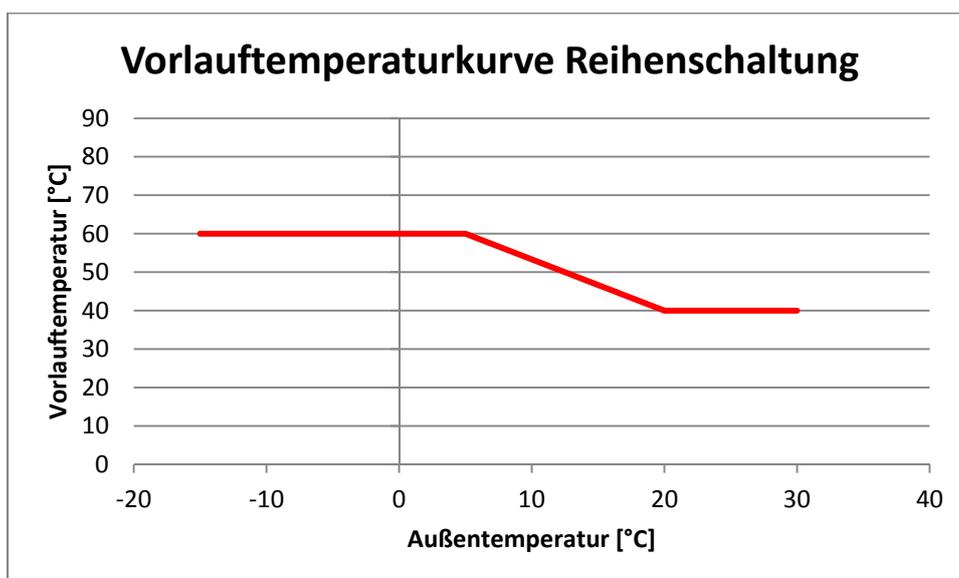


Abbildung 20: Vorlauftemperaturkurve des Primärnetzes bei Reihenschaltung

Die daraus resultierende Rücklauftemperatur hängt von der Auslegung des Wärmeübertrager und der Güte der Regelung ab. Da die sekundärseitige Rücklauftemperatur zwischen 20 und 25 °C liegt, können primärseitige Rücklauftemperaturen im Bereich von 25 bis 30 °C erzielt werden, sofern der primärseitige Massenstrom ausreichend gering gehalten wird.

Für die Berechnung der potentiellen Rücklauftemperatur-Absenkung ist eine detaillierte Berechnung der primärseitigen Rücklauftemperatur des Neubaus nicht erforderlich. Es wird kein zweiter Rücklauf vom Neubau in die Heizzentrale verlegt, der eine energiesystemtechnische Verwertung eines zweiten Rücklauftemperaturniveaus ermöglichen würde. Zudem ist der Leistungsanteil des Neubaus am

Leistungsbedarf des gesamten Campus recht gering. Dieser beträgt in der Heizperiode zwischen 5 und 10 %, außerhalb zwischen 0 und 5 %.

Daraus ergibt sich das Abkühlpotential wie folgt:

$$\dot{Q}_B = \dot{m} \cdot c_p \cdot (\mathcal{G}_{VL} - \mathcal{G}_{RL})_B = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T_B$$

unter Annahme unveränderter Pumpenleistung und damit unveränderter Massenströme im Primärnetz gilt  $\dot{Q} \sim \Delta T$ , wodurch sich die Leistungsveränderung linear auf die Temperaturdifferenz des Primärnetzes auswirkt. Im Falle einer Realisierung der in diesem Bericht identifizierten Temperaturpotentiale ergibt sich eine Primär-Vorlauftemperatur von 80 °C und eine Primär-Rücklauftemperatur von 40 °C, die in Abhängigkeit des momentanen Lastverhältnisses nochmals zwischen 0 und 4 K reduziert werden kann. Da sich diese Abkühlung jedoch sehr dynamisch verhält und unmittelbar durch den variabel geregelten primärseitigen Massenstrom des Neubaus bestimmt wird, wird von einer Berücksichtigung dieses Potentials bei der Konzeptionierung und Bewertung der Energiesysteme abgesehen.

## 6. Energiesystembetrachtung

Die Freiheitsgrade bei der Gestaltung des Liegenschaftsenergiekonzeptes mit Fokus auf der Wärmeversorgungstechnik sind die in den benötigten Leistungsklassen verfügbaren Techniken und die Platzierung thermischer Speicher innerhalb dieser Kombinationen.

In Kapitel 6.1 wird das Energiebedarfsprofil des zukünftigen Campus mit Gebäudebestand und Neubau zusammengefasst. Dieses stellt die Mindestanforderung an das zentrale Energieverbundsystem dar. In Kapitel 6.2 werden die in entsprechender Leistungsklasse verfügbaren Techniken sowie deren Vor- und Nachteile reflektiert. Auf dieser Basis wird eine Basiskonfiguration abgeleitet, für die in Kapitel 6.3 drei Varianten untersucht und verglichen werden. Abschließend erfolgt eine Diskussion, ob und unter welchen Voraussetzungen ein Aquiferspeicher in das Liegenschaftsenergiekonzept eingebunden werden könnte.

### 6.1. Energiebedarfsprofil des Campus

Nachdem sowohl der Bestand als auch der Neubau in ein vollständiges Simulationsmodell überführt wurden, erfolgt die Konzeptentwicklung unter Verwendung dieses Modells. Als Bezugssystem (base-case) dient hierfür die Kombination der Bedarfs-Lastgänge Wärme, Kälte und Strom auf der Systemebene. Die Werte entsprechen der Liefergrenze des Energieverbundsystems, sprich den Netzeintrittspunkten in die Campus-Verteilung. Anhand der Bedarfs-Lastgänge können die Verbrauchs-Lastgänge abgeleitet werden, auf deren Basis die Rücklauftemperaturen an den Netzaustrittspunkten berechnet werden können. Die Modifikation dieser Lastgänge erfolgt

ausschließlich durch die energiewandelnden Systeme des Energieverbundsystems, wodurch Aussagen über die Effizienz und die Güte verschiedener Varianten möglich sind.

Der Energiebedarf ergibt sich aus den Lastgängen des Gebäudebestandes (siehe Kapitel 4.1) und des Neubaus (siehe Kapitel 4.2). Die für die Auslegung der zentralen Energieversorgung relevanten Eckdaten sind:

*Tabelle 5: Relevante Eckdaten des Bedarfssystems*

<b>BEDARFSSYSTEM</b>	<b>Bestand</b>	<b>Neubau</b>	<b>Campus</b>
Leistungsbereich thermisch MW	0 - 2,7	0 - 0,9	0 - 3,6
Wärme [GWh/a]	6,1	1,2	7,3
Leistungsbereich elektrisch MW	0 - 0,9	0 - 0,6	0 - 1,5
Arbeit [GWh/a]	2,8	0,8	3,6

## 6.2. Techniken zur Wärme- und/oder Stromversorgung

Für die Versorgung der LEUPHANA Universität steht eine zentrale Kälteversorgung nicht zur Diskussion, da Kälteerzeuger nur dezentral an Bedarfsschwerpunkt installiert sind und ein Kälteverteilnetz somit nicht besteht. Damit beschränkt sich der mögliche Energieverbund auf Systeme der Wärme- und Stromerzeugung, sprich Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK).

Zur Wärmeerzeugung, insbesondere zur Deckung der Lastspitzen, stellen **Brennwertkessel oder Niedertemperaturkessel** die technisch einfachste Lösung dar. Diese gebräuchliche Technik steht in der benötigten Leistungsklasse standardmäßig zur Verfügung. Die Apparate sind dadurch günstig und aufgrund der hohen Feuerungsleistung und -temperatur außerordentlich flink und flexibel in der Wärmebereitstellung. Insbesondere durch die hohen Temperaturen der Feuerung ist diese Technik jedoch aus exergetischer Sicht stark verlustbehaftet.

**KWK-Systeme** (Mikro-Gasturbine, BHKW) stellen die Wärme- und Stromerzeugung in einen unmittelbaren Kontext und sind somit stark von der Bedarfsstruktur abhängig. Auch aufgrund der hohen Investitionskosten werden diese Techniken nur zur Grundlastdeckung herangezogen, die eine ausreichende Laufzeit und damit Amortisation ermöglichen sollte. Bei gut gewählter Auslegung können die Aggregate maximal (sprich im Dauerbetrieb) genutzt werden und einen nennenswerten Deckungsanteil liefern. Wesentlicher Unterschied zwischen einem BHKW und einer Mikro-Gasturbine ist das Wärmeverhältnis, welches bei dem BHKW niedriger liegt. Dadurch stellt sich das Problem der Wärmeabfuhr zu Zeiten mit geringem Wärmebedarf für BHKW als deutlich unkritischer dar. Der Einsatz von Mikro-Gasturbinen bietet sich also nur in speziellen Anwendungen mit

ganzjährig hohem Wärmebedarf an, weniger zur Substitution der aus dem Stromnetz bezogenen elektrischen Arbeit.

**Wärmepumpen** sind zwar auch im MW-Bereich verfügbar (umgedrehte Kältemaschine), erfordern jedoch aufgrund der moderaten Temperaturgefälle große und damit hoch-investive Wärmeübertrager auf der Wärmequellenseite (Erdsonden, Grundwasser) und weisen erst bei niedrigen Temperaturhuben zwischen Verdampfungs- und Kondensationstemperatur gute Wirkungsgrade auf. Für das vorliegende Netz sind Wärmepumpensysteme nicht sinnvoll einzusetzen, da die geforderten Netztemperaturen nicht mit einem vertretbaren COP erzeugt werden können, oder sehr aufwendige Techniken mit entsprechenden Betriebsdrücken eingesetzt werden müssten. Durch Variation des Arbeitsmediums und des Kreisprozesses können grundsätzlich geeignete und effiziente Systeme konfiguriert werden, diese sind jedoch nicht in der hier erforderlichen Leistungsklasse verfügbar oder lassen eine Wirtschaftlichkeit nur für Produktionsprozesse, nicht aber für eine einfache Wärmeversorgung abbilden.

**Wärmespeicher** dienen der Flexibilisierung der Bedarfsdeckung (Verschiebung von Lasten auf die Energieträger Gas und Strom) sowie der Optimierung des Deckungsanteils von z.B. KWK-Systemen. Diesen Ansatz verfolgt auch der Aquifer-Speicher, der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens betrachtet wurde. Durch die Entkopplung von Wärmebedarf und -bereitstellung durch z.B. ein BHKW, welches in Deutschland wärmegeführt betrieben werden muss, um von einem Teil der EEG-Umlage befreit betrieben werden zu dürfen und damit wirtschaftlich konkurrenzfähig sein zu können, kann die Laufzeit zur Maximierung der Stromerzeugung verlängert werden. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine ausreichende Speicherkapazität, Temperaturschichtung im Speicher und eine ausreichende Entladung des Speichers. Zugleich ist es erforderlich, die Verluste des Speichers gering zu halten, da Betriebszeit sonst auf Kosten von Wärmeverlusten erkaufte wird. Im Weiteren wird also ein Energiekonzept bestehend aus BHKWs, Spitzenlastkesseln und Wärmespeichern untersucht.

### **6.3. Simulation und Analyse des Energiesystems**

Um die Auslegung des Energieverbundsystems insbesondere mit Blick auf das Potential eines thermischen Großspeichers für die LEUPHANA Universität analysieren zu können, werden drei Varianten betrachtet.

#### **6.3.1. Simulationsvarianten zentrale Energiewandlung**

Alle Varianten werden mit zwei Gaskesseln mit je 1,7 MW Feuerungsleistung gerechnet, die gemeinsam die Heizlast des Campus decken und die notwendige Redundanz sicherstellen. Die minimale Teillast eines Kessels beträgt 25 %, sprich 425 kW, wodurch sich ein Regelbereich der Kesselanlage von 425 bis 3.400 kW ergibt. Darunter taktet die Kesselanlage.

Zusätzlich zum Kessel ist in jeder Variante ein KWK-Anteil durch BHKWs vorgesehen. Diese werden wärmegeführt betrieben. Überproduzierter Strom wird in das Stromnetz eingespeist und verkauft. Das

BHKW wird mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 41 % bei einem Gesamtwirkungsgrad von 83 % angenommen. Abbildung 21 zeigt die Jahresdauerlinie mit Darstellung der BHKW-Auslegung der drei Varianten.

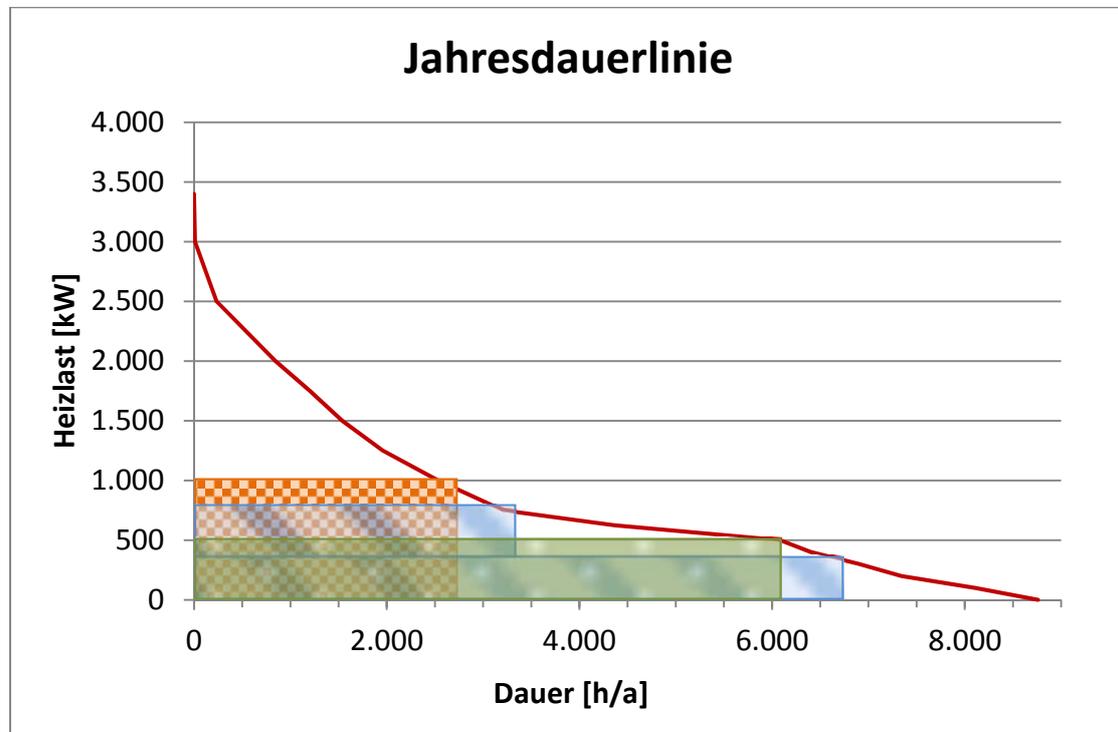


Abbildung 21: Jahresdauerlinie der Heizlast

Die thermischen Speicher sind als zylindrische Behälter berücksichtigt, die mit 20 cm Wärmedämmung (WLG040) gedämmt werden, was einem U-Wert von ca. 0,2 W/m<sup>2</sup>K ergibt. Der Behälter hat einen Durchmesser von 3,5 m und eine Höhe von 10 m, was einem Speichervolumen je Einheit von etwa 100 m<sup>3</sup> bei einem Wärmeverlust-Koeffizient von 50 W/K entspricht. Die Behälter sind mit Blick auf eine gute Temperaturschichtung und damit optimalem Lade- und Entladeverhalten ausgeführt, d.h. mit einem günstigen Höhen-/Querschnittsverhältnis und möglichst turbulenzarmer Einströmung.

Zusammenfassung der Varianten (Zahlen in Tabelle 6):

- Variante 1: BHKW-Dimensionierung mit einer Betriebszeit von ca. 6.000 h/a, Ausnutzen eines Knickpunktes in der Jahresdauerlinie, zudem Einsatz zweier Speichereinheiten
- Variante 2: doppelte BHKW-Leistung, Einsatz von vier Speichereinheiten
- Variante 3: Einsatz von zwei BHKWs mit mittlerer Leistung, Einsatz von vier Speichereinheiten

Tabelle 6: Variantenübersicht

Energiesysteme	Einheit	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Leistung Kessel	MW	1,7	1,7	1,7
Anzahl Kessel	Stück	2	2	2
Leistung BHKW	MW	0,5	1	0,4
Leistung BHKW, thermisch	MW	0,53	1,06	0,42
Anzahl BHKW	Stück	1	1	2
Kapazität Speicher	MWh	4,65	9,31	9,31
Anzahl Behälter	Stück	2	4	4
Volumen	m <sup>3</sup>	200	400	400
Spreizung	K	20	20	20
Lade-Leistung	MW	1	1	1
Entlade-Leistung	MW	3	3	3

### 6.3.2. Simulationsergebnisse

Die Simulation der verschiedenen Varianten basiert auf dem identischen Bedarfsmodell, lediglich die Dimensionierung der Komponenten BHKW und Speicherkapazität wurden variiert. Abbildung 22 zeigt die wesentlichen Eckdaten der Energieversorgung.

Es ist zu erkennen, dass die Varianten mit großer Speicherkapazität bereits eine Überproduktion an Strom ermöglichen, so dass kein Strombezug aus dem Netz erfolgen muss. Bezogen auf Variante 1 werden in Variante 2 ca. 40 % mehr Strom erzeugt und nur 16 % mehr Erdgas benötigt, in Variante 3 sind dies sogar 60 % mehr Strom bei zugleich nur 25 % mehr Erdgas.

Tabelle 7 zeigt die Kennzahlen der verschiedenen Varianten. Der Endenergiebedarf der Variante 2 liegt 7,6 %, der der Variante 3 um 4,6 % über dem der Variante 1. Dies resultiert aus dem erhöhten Brennstoffbedarf der BHKWs, der auf Endenergieniveau nicht durch den damit produzierten Strom kompensiert werden kann. Dies stellt sich mit Blick auf die Primärenergie anders dar. Der Primärenergiebedarf liegt für Variante 3 16,5 % unter dem von Variante 1, der von Variante 2 sogar 24,6 % niedriger. Dementsprechend deutlich fällt auch die Verbesserung der Anlagenaufwandszahl aus, die bei Variante 3 ca. 20,2 %, bei Variante 2 sogar 30 % beträgt.

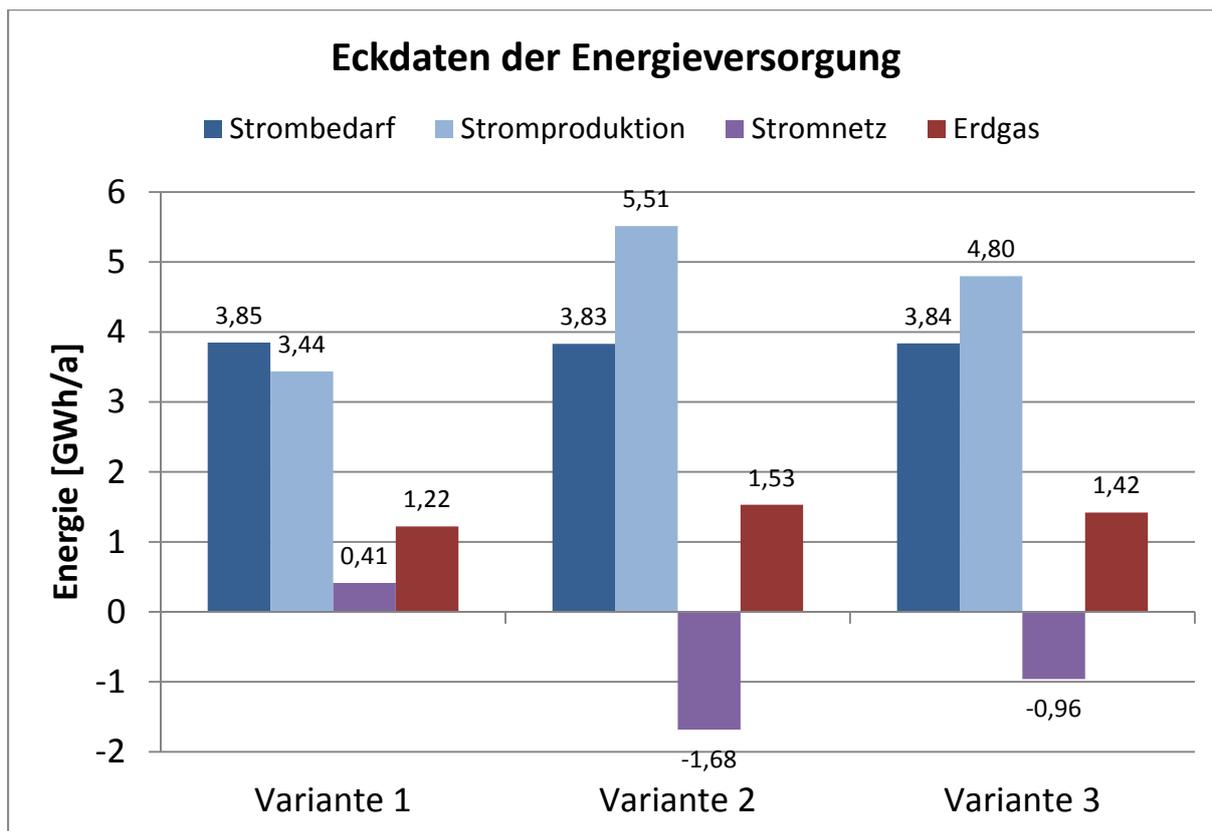


Abbildung 22: Eckdaten der Energieversorgung - Variantenvergleich

Auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen lassen sich auf Basis dieser Simulationsergebnisse ermitteln. Gemäß Bundesumweltamt<sup>5</sup> beträgt der CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor für Strom 569 g/kWh unter Berücksichtigung des für 2014 prognostizierten Strom-Mix. Je kWh Wärme aus Erdgas ergibt sich gemäß GEMIS<sup>6</sup> ein CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor für Erdgas 250 g/kWh.

Die CO<sub>2</sub>-Emission liegt für Variante 3 36,6 % unter dem von Variante 1, der von Variante 2 sogar 55,5 % niedriger.

Tabelle 7: Kennzahlen der Energieversorgung - Variantenvergleich

Kennzahl	Einheit	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Endenergiebedarf	GWh/a	12,4	13,3	13,0
Primärenergiebedarf	GWh/a	13,2	10,0	11,0
Aufwandszahl	-	1,07	0,75	0,85
CO <sub>2</sub> -Emission	t/a	882	393	558

<sup>5</sup> <http://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/strom-waermeversorgung-in-zahlen>

<sup>6</sup> <http://www.kea-bw.de/service/emissionsfaktoren/>

### 6.3.3. Einschätzung der Vorteilhaftigkeit des Aquiferspeichers

Wie der Vergleich der Varianten zeigt, genügt bereits ein Speichervolumen von ca. 400 m<sup>3</sup>, um mit den BHKW einen Strom-Überschuss produzieren zu können. Dabei liegt der Verlustanteil des Speichers zwischen 3,0 und 6,9 %, was wesentlich durch die gute Dämmung mit 50 W/K je Speichereinheit zu begründen ist. Dem entgegen steht ein Aquiferspeicher, der eine weitaus größere, schlechter gedämmte Hüllfläche aufweist und aufgrund der sehr großen Wärmekapazität kaum entladen werden kann, was die mittlere Übertemperatur auf einem höheren Niveau hält, als dies bei den oben beschriebenen Tanks der Fall ist.

Ein einfaches Gedankenspiel:

Unter der Annahme eines (sehr kleinen) Aquiferspeichers mit den Abmessungen 50 m x 100 m x 50 m (BxLxH) beträgt das Volumen 250.000 m<sup>3</sup> und die Hüllfläche 25.000 m<sup>2</sup>. Unter der Annahme, dass das Erdreich in Lüneburg in etwa die Wärmeleitfähigkeit von Sand mit  $\lambda=1,2$  W/mK aufweist und eine thermisch dämmende Mantelschicht von 4,0 m besteht, ergibt sich ein Wärmeübergangskoeffizient von 0,6 W/m<sup>2</sup>K, bzw. ein Verlustbeiwert von 15.000 W/K.

Zieht man die Jahresmitteltemperatur von Lüneburg mit ca. 10 °C und einer mittleren Erdreichtemperatur von ebenfalls 10 °C heran, ergibt sich z.B. ausgehend von der mittleren Systemtemperatur von 55 °C ein Temperaturunterschied von 45 K. In diesem Fall beträgt der Wärmeverlust der Behälter mit 2,25 kW nur gut 3 % des Wärmeverlustes des Aquiferspeichers mit 675 kW.

Bereits aus überschlägiger Berechnung zeigt sich, dass die thermische Kapazität eines Aquiferspeichers für eine einzelne Liegenschaft wie der LEUPHANA Universität deutlich zu groß ist, wenn dieser aus fossilen Energieträgern geladen wird (wie hier durch BHKW) und gar kontraproduktiv im Sinne des Ziels der Klimaneutralität.

## 7. Fazit

Für die Integration eines thermischen Speichers großer Kapazität, wie z.B. einem Aquiferspeicher, ist insbesondere das Verhältnis von Bedarf und Verlust thermischer Energie zu berücksichtigen. Der im Rahmen dieses Projektes betrachtete Anwendungsfall zeigt, dass die Integration eines Aquiferspeichers für eine einzelne Liegenschaft kaum darzustellen ist. Vielmehr zeigen konventionelle thermische Speicher in Form von Tanks ihr Potential in Verbindung mit KWK-Anlagen, ohne dass wirtschaftliche Fragestellungen in Betracht gezogen wurden müssen.

Unter anderen Rahmenbedingungen, z.B. dem Betreiben eines Fernwärmenetzes für ganze Stadtquartiere und der Integration des Speichers in ein Energieversorgungssystem größerer Leistung (Gigawatt-Bereich), kann ein Aquiferspeicher durchaus eine interessante Lösung für die Optimierung eines Energiesystems darstellen, insbesondere dann, wenn

- das Fernwärmesystem für heute übliche moderate Temperaturen ausgelegt wird
- eine stromgeführte Betriebsweise zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit erforderlich ist
- die Feuerung mit climatechnisch günstigen Brennstoffen (z.B. effiziente Vorkette zur Gewinnung) erfolgen kann
- zeitweise Versorgungssicherheit der Wärmeversorgung ohne KWK-Betrieb gewährleistet werden muss, z.B. zur Flexibilisierung des Strom-Mixes für die Integration von Strom aus erneuerbaren Energiequellen

# Masterthesis

Jan Geffken

**- Ambient Intelligence & Nutzerverhalten –**  
**Erhebung energetischer Verbrauchsdaten zur Einbindung der**  
**Nutzer\*innen in das energetische Gebäudemanagement**

Dozenten:

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang K. L. Ruck,

Dr. rer. nat. Oliver Opel

Institut für Nachhaltige Chemie und Umweltchemie

Abgabetermin:

12.11.2013

Matrikelnummer:

3008699



## Inhalt

<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>III</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>IV</b>
<b>1 ABSTRACT .....</b>	<b>- 6 -</b>
<b>2 EINLEITUNG .....</b>	<b>- 7 -</b>
2.1 BEGRIFF UND ZIEL DES NACHHALTIGEN ENERGIEMANAGEMENTS .....	- 8 -
2.2 FORSCHUNGSPROJEKT .....	- 9 -
2.3 ZIEL DER ARBEIT .....	- 11 -
<b>3 NACHHALTIGES ENERGIEMANAGEMENT AN DER LEUPHANA.....</b>	<b>- 12 -</b>
3.1 REALISIERUNGEN DER ANFORDERUNGEN AN EIN NACHHALTIGES ENERGIEMANAGEMENT .....	- 13 -
3.2 VERBRAUCH UND POTENTIAL DER BESTANDSGEBÄUDE .....	- 14 -
<b>4 NUTZUNGSVERHALTEN .....</b>	<b>- 15 -</b>
4.1 EINFLUSS DER NUTZER*INNEN AUF DEN ENERGIEVERBRAUCH.....	- 15 -
4.2 THEORIEN DES VERHALTENS.....	- 16 -
4.3 BAUSTEINE DER KAMPAGNEN .....	- 19 -
4.3.1 <i>Wirkung der Kampagnenarbeit</i> .....	- 19 -
4.3.2 <i>Makroebenen &amp; Mikroebenen in der Kampagnenarbeit</i> .....	- 20 -
4.3.3 <i>Handlungsaktivierende und handlungsunterstützende Maßnahmen</i> .....	- 20 -
4.3.4 <i>Wissen vs. Kompetenzen</i> .....	- 21 -
4.4 INTERVENTIONSMAßNAHMEN .....	- 21 -
4.4.1 <i>Vorgreifende Maßnahmen</i> .....	- 22 -
4.4.2 <i>Konsequenzbezogene Maßnahmen</i> .....	- 23 -
4.4.3 <i>Maßnahmenmix</i> .....	- 26 -
<b>5 AMBIENT-INTELLIGENCE.....</b>	<b>- 27 -</b>
5.1 WAS IST AMBIENT-INTELLIGENCE (AMI).....	- 27 -
5.2 AUFBAU EINES AMBIENT INTELLIGENCE SYSTEMS .....	- 28 -
5.3 EINZELRAUMREGELUNG.....	- 29 -
5.4 AUSSTATTUNG DER BESTANDSGEBÄUDE AN DER LEUPHANA UNIVERSITÄT .....	- 30 -
5.5 ANTIZIPIEREND OPTIMIERENDE HEIZUNGSREGELUNG .....	- 31 -
<b>6 SYNTHESE KAPITEL 3 &amp; 4 .....</b>	<b>- 32 -</b>
<b>7 ENERGETISCHE BEWERTUNG ANHAND DER DIN V 18599.....</b>	<b>- 33 -</b>
7.1 WAS IST DIE DIN V 18599? .....	- 33 -
7.2 FOKUS DER BETRACHTUNGEN DER DIN V 18599 .....	- 34 -
7.3 DIE DIN V 18599 – ALS GRUNDLAGE ZUR BERECHNUNG DER VIRTUELLEN SENSOREN.....	- 35 -
7.4 AUFLÖSUNG DER BERECHNUNGSZEITRÄUME .....	- 36 -
7.5 WÄRMEQUELLEN UND WÄRMESENKEN .....	- 37 -
7.6 BILANZ-INNENTEMPERATUR UND DIE EINFLUSSFAKTOREN .....	- 38 -
7.6.1 <i>Bilanz-Innentemperatur - Aufschlüsselung der Variablen</i> .....	- 39 -
7.6.2 <i>Notwendige Nutzungsdaten für die Berechnung der Bilanz-Innentemperatur</i> .....	- 43 -
7.7 ANPASSUNGEN DER DIN V 18599-10 –NUTZERVERHALTEN AN DIE NUTZUNG DER BÜROS LEUPHANA UNIVERSITÄT .....	- 43 -
7.7.1 <i>Nutzungszeiten</i> .....	- 44 -

7.7.2	Raumkonditionen.....	- 46 -
7.7.3	Mindestaußenluftvolumenstrom .....	- 46 -
7.7.4	Beleuchtung.....	- 50 -
7.7.5	Personenbelegung und interne Wärmequellen.....	- 51 -
<b>8</b>	<b>BEISPIELRECHNUNGEN MIT VARIABLEN NUTZUNGSVERHALTEN.....</b>	<b>- 54 -</b>
8.1	EINZELHEITEN ZUM GEBÄUDE/ MODELL.....	- 54 -
8.2	REFERENZBERECHNUNG.....	- 55 -
8.3	EINFLUSSFAKTOR NUTZUNGSZEIT - HALBE STELLE.....	- 57 -
8.4	LÜFTUNGSVERHALTEN.....	- 58 -
8.5	LÜFTUNGSVERHALTEN UND ANWESENHEIT .....	- 59 -
8.6	WÄRMEQUELLEN .....	- 60 -
8.7	TEMPERATURABSENKUNG.....	- 61 -
8.8	RAUM-SOLLTEMPERATUR .....	- 62 -
8.9	PROGRAMMSPEZIFISCHE HERAUSFORDERUNGEN.....	- 64 -
8.10	ZUSAMMENFASSUNG DER BERECHNUNGEN .....	- 66 -
<b>9</b>	<b>FAZIT.....</b>	<b>- 66 -</b>
<b>10</b>	<b>QUELLEN .....</b>	<b>- 69 -</b>
<b>11</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>- 78 -</b>
	<b>ANHANG A.....</b>	<b>- 78 -</b>
	<b>ANHANG B.....</b>	<b>- 79 -</b>
	<b>ANHANG C.....</b>	<b>- 80 -</b>
	<b>ANHANG D.....</b>	<b>- 81 -</b>
	<b>ERGEBNISSE SOFTWAREAUSWERTUNG .....</b>	<b>- 81 -</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Wärmeverbrauch Hauptcampus Leuphana Universität (Leuphana <sup>3</sup> 2011).....	- 19 -
Abbildung 2:	Erweiterte Darstellung handlungsaktivierender Maßnahmen (vgl. Opel et al. 2013:114) .....	- 22 -
Abbildung 3:	Aufbau eines Ambient-Intelligence-Systems (Meier 2012:6).....	- 28 -
Abbildung 4:	Schema Einzelraumsteuerung (Wolff 2013:2).....	- 29 -
Abbildung 5:	Vorgesehene Einzelraumsteuerung in den Bestandsgebäuden der Leuphana Universität (Effertz 2013:24).....	- 30 -
Abbildung 6:	Energiebedarfsvergleich Einzelbüro mit geringer Auslastung mit und ohne Assistenzsystem (vgl. Welge et al.2010:5f.) .....	- 31 -
Abbildung 7:	Komponenten der DIN V 18599 (DIN <sup>1</sup> 2011:8).....	- 34 -
Abbildung 8:	Nutzungszeiten Einzelbüro nach DIN <sup>10</sup> (2011:33) .....	- 44 -
Abbildung 9:	Raumkonditionen Einzelbüro nach DIN <sup>10</sup> (2011:33) .....	- 46 -

Abbildung 10: Mindestaußenluftvolumenstrom Einzelbüro nach DIN <sup>10</sup> (2011:33).....	- 46 -
Abbildung 11: CO <sub>2</sub> -Konzentration in Abhängigkeit von Zeit und Zuluftvolumenstrom (Beispielrechnung Fizner/Finke 2012:9) .....	- 47 -
Abbildung 12: Häufigkeitsverteilung der Fensteröffnungen & Häufigkeit der Außentemperatur [blau ] (Pfafferott /Voss 2002:43).....	- 48 -
Abbildung 13:Einflussfaktoren der Leistungsfähigkeit (Urlaub et al. 2010:377) .....	- 49 -
Abbildung 14: Beleuchtungswerte im Einzelbüro nach DIN <sup>10</sup> (2011:33) .....	- 50 -
Abbildung 15: Personenbelegung und interne Wärmequellen im Einzelbüro nach DIN <sup>10</sup> (2011:33) .....	- 52 -
Abbildung 16:Automationsgrad nach DIN <sup>10</sup> .....	- 53 -
Abbildung 17: Differenz Endenergiebedarf nach Raum-Solltemperatur .....	- 62 -
Abbildung 18: Veränderung des Endenergiebedarfs in Abhängigkeit der Raum-Solltemperatur .....	- 64 -
Abbildung 19: Unzufriedenheit mit dem Raumklima in Abhängigkeit von der CO <sub>2</sub> -Konzentration in der Luft (Fitzner/Finke 2012:8).....	- 79 -

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auswertung „Ist-Zustand“ Grundkonditionen- Profil: Einzelbüro .....	- 55 -
Tabelle 2: Profilvariante Einzelbüro der DIN <sup>10</sup> .....	- 56 -
Tabelle 3: Auswertung Profilvariante: Halbe Stelle (6h/212d) .....	- 57 -
Tabelle 4: Auswertung Profilvariante: Intermittierendes Lüften - Luftwechselrate: 0,3h <sup>-1</sup> .....	- 59 -
Tabelle 5: Auswertung Profilvariante: Kombination halbe Stelle & mittleres Lüftungsverhalten.....	- 60 -
Tabelle 6: Auswertung Profilvariante: Anstieg der Raumnutzer*innen (Wärmequellen).....	- 61 -
Tabelle 7: Auswertung Profilvariante : Raum-Solltemperatur (24°C).....	- 63 -
Tabelle 8: Berechnungen des Endenergiebedarfs (Software: Energieberater 3D Plus) .....	- 80 -

*„Bringing together psychological and technological expertise may not be an easy task. We believe, however, this effort to be most worthwhile on the route to society that makes sustainable use of its natural resources.”*

Midden / Kaiser/ McCalley (2007:171)

## 1 Abstract

Wie kann der Energiebedarf in einem Altbau um mehr als 5% gesenkt werden ohne die Infrastruktur des Gebäudes zu erneuern? Die vorliegende Arbeit schafft einen Ansatz dazu, mit den Nutzer\*innen eines Gebäudes in eine zeitlich nicht begrenzte Interaktion zu treten. Auf diese Weise kann die Zufriedenheit der Nutzer\*innen gewährleistet werden, während auf der anderen Seite erhebliche Mengen an Energie eingespart werden können. Dabei bevormundet der vorgestellte Ansatz die Nutzer\*innen nicht wie eine statische Gebäudeleittechnik, sondern bezieht sie aktiv ein. Insbesondere in öffentlichen Gebäuden kann so die Wahrnehmung von Energieverbräuchen gefördert, eine Bewusstseinsbildung dauerhaft angestoßen und der Energieverbrauch direkt verringert werden.

Der Schlüssel zu dieser Lösung ist der Austausch von Informationen. Informationen über die Präferenzen und das Verhalten der Nutzer\*innen, die das Energiemanagementsystem benötigt, um effizient gesteuert zu werden und Informationen, die die Nutzer\*innen benötigen, um einen bewussteren Umgang mit Energie zu erlernen. Die Aufnahme von Daten durch die Installation von Sensornetzen stellt eine Möglichkeit dar, diese entsprechenden Werte zu erhalten. In der vorliegenden Arbeit wird eine Lösung gesucht, die für beide Parteien fehlenden Informationen zu berechnen. Grundlage dafür ist die Kombination von verfügbaren Messwerten und Berechnungen entsprechend der DIN V 18599. In der Arbeit wird dargestellt, welche Variablen besonderen Einfluss auf den Endenergiebedarf eines Raumes haben. Weiter werden Lösungswege aufgezeigt, wie fehlende Daten generiert werden können.

Das Ergebnis besteht darin, dass entscheidende Einflüsse auf den Energieverbrauch identifiziert und quantifiziert werden. Die Veränderungen des Endenergiebedarfs reichen dabei von -15% bis +25% in Abhängigkeit vom Nutzungsverhalten. Die Ergebnisse liefern damit eine Grundlage zur Berücksichtigung von Messgrößen bei der Erstellung von Sensornetzen. Der Ansatz ist somit nicht nur kostengünstiger als die Installation eines hochauflösenden Sensornetzes, sondern er bietet auch eine Kommunikationsgrundlage zur nutzungsabhängigen und zielgerichteten Kampagnenarbeit.

## 2 Einleitung

Zum Einsparpotential zwischen zufriedenen Nutzer\*innen und einem nachhaltigen Energiemanagement - weil Energieverschwendung auch ein Mangel an Informationen ist.

Die Leuphana Universität in Lüneburg setzt die vier Bereiche Kultur, Bildung, Wirtschaft und Nachhaltigkeit als Schwerpunkte des Studiums und der Forschung ein (Leuphana<sup>1</sup>). Die Entwicklung nachhaltigen Handelns ist dabei ein übergreifendes Ziel der Universität, welches in vielen Bereichen die Forschung kontextualisiert. Ein Blick auf die etablierten Forschungsbereiche wie zum Beispiel *Nachhaltigkeitsökonomie*, *Bildung für eine nachhaltige Entwicklung*, *Stoffliche Ressourcen* und die *Umweltchemie* verdeutlicht das Bestreben, die Herausforderungen der Zivilgesellschaft des 21. Jahrhunderts zu erforschen und handlungsorientierte Lösungsansätze zu erarbeiten (vgl. ebd.).

*Nachhaltiges Handeln* ist dabei, in Anlehnung an die Definition der Brundtland-Kommission, ein Handeln, das „den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen und ihren Lebensstil zu wählen.“ (United Nations 1987: 53).

Der Klimawandel und die Verknappung der Ressourcen als Folgen des Energiekonsums spielen eine tragende Rolle, denn ohne eine Einschränkung der CO<sub>2</sub> Emissionen und bei gleichbleibendem und wachsendem Raubbau der Ressourcen in den empfindlichsten Ökosystemen der Erde, muss das Ziel einer nachhaltigen Entwicklung in Frage gestellt werden.

Belegt wird dieser Widerspruch jedoch nicht nur durch den Klimawandel als Folge des Energiekonsums, sondern auch durch die immer gefährlichere Gewinnung der Energie selbst. Wie riskant der jetzige Weg der Energiegewinnung ist und wie wenig wir diese Methode beherrschen, zeigen Katastrophen wie die Ölkatastrophe im Golf von Mexico oder das, nach wie vor die Weltmeere verseuchende, Atomkraftwerk in Fukushima.

Da wir es nicht schaffen, unseren Energiekonsum durch nachhaltig erzeugte Energien zu decken, wird mit der Arbeit ein Beitrag geleistet, um die Möglichkeiten einer Senkung des Energiebedarfs weiterzuentwickeln.

## **2.1 Begriff und Ziel des nachhaltigen Energiemanagements**

Einen Ansatz dazu stellt die Integration der individuellen Bedürfnisse von Nutzer\*innen in das Energiemanagement der Gebäude dar. Dass dieser Ansatz bisher weit unterschätzt wird, zeigt die Darstellung der Dena zu Einsparpotentialen im Wohngebäudebestand. Hier wird auf das Potential der Gebäudehülle, der Anlagentechnik und der Nutzung erneuerbarer Energien, nicht jedoch auf die Rolle der Nutz\*innen verwiesen (vgl. Seidl 2012:9). Eine Abstimmung der Gebäudesteuerung mit den Bedürfnissen der Nutzer\*innen kann, bei geringen Investitionskosten, große energetische Einsparungen bewirken. Wie groß der Anteil der Einsparungen sein kann und wie die Integration der Nutzer\*innen unterstützt werden kann, ist Thema dieser Arbeit.

Die Suche nach Wegen zur Einsparung von Energie scheint dabei krisenbedingt verstärkt zu werden. So gab es bereits in den siebziger Jahren, im Rahmen der Ölkrise, Untersuchungen zur Einsparung von Energie. Spätere Untersuchungen fanden primär im Kontext von Umweltproblemen wie dem Klimawandel oder Biodiversitätsproblemen statt (vgl. Abrahamse et al. 2005:273<sup>1</sup>). Mit dem Begriff der Nachhaltigkeit (vgl. S.- 7 -) wurden auch Untersuchungen zur Einsparung von Energie neu aufgegriffen und verstärkt gefördert.

Der Umgang mit Energie steht neben den, nach wie vor nicht gelösten, Herausforderungen der Umweltauswirkungen, wie dem Klimawandel und ökonomischen Faktoren, wie stetig steigenden Preisen auch sozialen Fragen, wie Zugangsgerechtigkeit in Bezug auf Energie und den Kostenverteilungen der Energiewende gegenüber.

Einhergehend mit der UNO-Konferenz über Umwelt und Entwicklung in Rio de Janeiro 1992 wurden verschiedene Strategien wie die der Effizienz, der Konsistenz und der Suffizienz in die Debatten zum Umgang mit Problemen der Nachhaltigkeit eingebracht (Huber 2000:3). Im Bereich des Energiemanagements von Institutionen sollten diese Ansätze berücksichtigt werden, um den Anforderungen einer nachhaltigen Entwicklung gerecht zu werden (Brischke/Spengler 2011:86).

Im Rahmen einer Strategie zum nachhaltigen Wärmekonsum formulieren KOCH UND ZECH daraus folgende Ansprüche (Koch/Zech 2011:2):

- *Inanspruchnahme geringerer Mengen verschiedener Endenergieträger für die gleiche Menge an Energiedienstleistungen (Effizienzstrategie),*
- *Konsum nachhaltiger Energieressourcen zur Befriedigung des Energiebedarfs (Konsistenzstrategie) und*
- *Reduzierung der Nachfrage nach Energiedienstleistungen (Suffizienzstrategie)*

Die exemplarische Darstellung zeigt, wie eine Berücksichtigung der Ansprüche auf institutioneller Ebene aussehen kann. Jede der Anforderungen ist dabei, wie das Konzept der Nachhaltigkeit selbst, normativ zu betrachten. Es existieren somit keine Grenzen für die Erfüllung einer dieser Forderungen. Vielmehr ist das eigene Handeln stetig auf die weitere Vertiefung von Effizienz, Konsistenz und Suffizienz zu überprüfen und nach Möglichkeit zu optimieren. Diese ganzheitliche Betrachtung beinhaltet auch neue Ansätze zur Einsparung von Energie.

## **2.2 Forschungsprojekt**

Die vorliegende Arbeit ist ein Beitrag zum Forschungsprojekt *Klimaneutraler Campus Scharnhorststraße Bockelsberg*. Dieses ist gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technik (BMWi) und den Programmen *Forschung für Energieoptimiertes Bauen (EnOB)* und *Forschung für die energieeffiziente Stadt (Eneff:Stadt)* zuzuordnen.

Die Erarbeitung von *Gebäuden der Zukunft* ist das Ziel des EnOB-Programms (vgl. FIZ<sub>1</sub>:2013). Hierbei geht es darum, durch einen Mix aus neuen Technologien und einer optimalen Konzeptionierung der Gebäude den Primärenergiebedarf zu senken und die Konzepte wissenschaftlich zu evaluieren. Für neue Gebäude, wie das gerade entstehende Audimax der Leuphana Universität, besteht das Ziel den Primärenergiebedarf gegenüber dem Stand der EnEV 2009, berechnet nach DIN 18599, um die Hälfte zu senken (vgl. FIZ<sub>2</sub> 2013). Für die Sanierung von Nichtwohnungsbauten ist eine Unterschreitung des Primärenergiebedarfs von mindestens 30% gegenüber der EnEV 2009/→DIN 18599 das Ziel (ebd.). Das Ziel der Leuphana Universität geht darüber hinaus. Geplant ist auch hier eine Reduzierung der Endenergie um 50% (vgl. Opel 2012:3). Der Primärenergiebedarf und der CO<sub>2</sub>-Ausstoß sollen auf *Netto-Null* gebracht werden.

Netto-Null bedeutet, dass durch Einsparmaßnahmen und den Umbau des Energiesystems der Bedarf an Wärme und Strom für das Campusgebiet und den Bockelsberg klimaneutral abgedeckt und Dienstreisen sowie die, auf 30 Jahre umgelegte, im Neubau enthaltene, graue Energie kompensiert werden sollen (Leuphana<sup>2</sup> 2013).

Das Bindeglied zwischen der Technik, der Konzipierung des Energiesystems und der Verwendung erneuerbarer Energieträger, stellt die Nutzung, also die Betriebspraxis, dar. Diese wichtige Komponente (Kapitel 4.1) fließt im Rahmen der energetischen Betriebsoptimierung (EnBop), durch Dokumentation, Langzeit-Monitoring, Auswertung und Analysen mit in das EnOB-Programm ein. Auf diesem Wege wird die Praxistauglichkeit der Projekte evaluiert und demonstriert (vgl. FIZ<sup>3</sup> 2013).

Mit einem „empfehlenden Charakter“ für öffentliche Hochbaumaßnahmen der Länder und Kommunen hat das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung den *Leitfaden für nachhaltiges Bauen* herausgegeben (vgl. BMVBS<sup>1</sup> 2013:14). Hier wird unter anderem empfohlen, auch Bestandsgebäude während der Nutzung in Bezug auf Differenzen zwischen Planung und Nutzung zu evaluieren. Der größtmögliche Anteil der Steuerung liegt bei den Nutzer\*innen (vgl. ebd.:69). Um auch ohne ein interagierendes Steuerungssystem eine möglichst nachhaltige Steuerung der Energieflüsse zu erreichen, sollen die Nutzer\*innen mindestens einmal jährlich mit nutzungsspezifischen Informationen über die Wirkungszusammenhänge zwischen Nutzung und Aspekten der Nachhaltigkeit informiert werden (ebd.). Ziel ist es, durch die Integration der Nutzer\*innen die Umweltauswirkungen, die Kosten und den Ressourcenverbrauch während der Nutzungsphase positiv beeinflussen (vgl. BMVBS<sup>1</sup> 2013:15).

Das Forschungsprojekt bezieht sich somit auch auf die Anforderungen entsprechend des Leitfadens für nachhaltiges Bauen. Der Weg zu einem nachhaltigen Umgang mit Energie ist sehr stark davon abhängig, dass die Nutzer\*innen mit spezifischen Informationen zu ihrem energetischen Verhalten versorgt werden. Eben darin besteht das übergeordnete Ziel der vorliegenden Arbeit. Welche Grundsteine notwendig sind, um diesen Ziel näherzukommen, wird in Kapitel 4 beschrieben.

### **2.3 Ziel der Arbeit**

Um den CO<sub>2</sub>-Ausstoß und die Primärenergie auf Netto-Null zu bringen, spielen nicht nur bauliche Maßnahmen und die Steuerung des Energiesystems eine Rolle, sondern auch solche, die das Verhalten der Nutzer\*innen positiv beeinflussen. Die Nutzungsform, als eine der Hauptkomponenten des Verbrauchs, ist Schwerpunkt der Betrachtungen in der Arbeit.

Eine große Herausforderung stellt dabei die fehlende Möglichkeit der Visualisierung von Energieverbräuchen (vgl. OECD 2012:218) dar. Um Verbräuche visualisieren zu können, bedarf es entweder eines Sensornetzes, das die Verbrauchsdaten zu Verfügung stellt oder einer Möglichkeit, die Verbräuche auf andere Weise zuzuordnen.

In der vorliegenden Arbeit wird die Berechnung des Heizwärmebedarfs entsprechend der DIN V 18599 auf ihre Nutzbarkeit, als Alternative für ein hochauflösendes Sensornetz, für ein solches Feedbacksystem überprüft. Grundlage sind dabei neben der DIN V 18599 die, mit der anstehenden Sanierung der Bestandsgebäude zur Verfügung stehenden, Messdaten (Kapitel 5.4) der Gebäudeleittechnik.

Überprüft wird, welche auf das Nutzungsverhalten bezogenen Daten für eine entsprechende Berechnung notwendig sind, welche in ihrem Einfluss auf die Berechnung entsprechend der DIN V 18599 von besonderem Interesse sind und wie mit nicht messbaren, aber relevanten Einflussfaktoren umgegangen werden kann. Im Weiteren wird dann überprüft, welche Daten für ein Feedback zur Veränderung des Nutzungsverhaltens notwendig sind und inwiefern ein entsprechendes Feedbacksystem gestaltet werden kann.

Deshalb geht es in einem ersten Schritt darum, anhand eines Beispielgebäudes (siehe Kapitel 8) verschiedene Varianten in Bezug auf das Nutzungsverhalten darzustellen. Es kann dann beurteilt werden, welches Verhalten bzw. welche Messgrößen besonderen Einfluss auf den Energieverbrauch haben. Entsprechend der Ergebnisse kann daraufhin bestimmt werden, welche Werte erfasst werden sollten, um ein verbrauchsbezogenes Feedback zu ermöglichen.

Ziel ist es, eine Möglichkeit zu entwickeln, den Grundbedarf von den nutzungsbedingten Einflussfaktoren zu trennen und so eine Zuordnung des individuellen Verbrauchs zu den Nutzer\*innen zu ermöglichen. Mit diesen Daten soll in im Rahmen der anschließenden Forschung innerhalb des Projektes ein möglichst verhaltensspezifisches Feedback und damit die Interaktion zwischen Nutzer\*innen und dem Energiesystem ermöglicht werden.

Die Entwicklung einer Möglichkeit, die Nutzer\*innen in den energetischen Gebäudebetrieb mit einzubinden, entspricht den in Kapitel 2.1 dargestellten Anforderungen an ein nachhaltiges Energiemanagement, entsprechend des Leitfadens für nachhaltiges Bauen des Bundesministeriums. Weiter kann die Einbindung eine Lösung darstellen, um hohe Installationskosten für ein sensibles Sensorsystem zu umgehen.

Nachdem in der Arbeit ein Bild des nachhaltigen Energiemanagements skizziert wird (Kapitel 2.3 & 3), wird dargestellt, warum die Einbindung der Gebäudenutzer\*innen in die energetische Gebäudesteuerung wichtig ist und welche Voraussetzungen erfüllt werden müssen, um ein entsprechendes Intelligentes-Gebäudemanagement-System (Kapitel 5) aufzubauen. Aus dieser Grundlage heraus werden dann die zwei Schwerpunkte der Arbeit fokussiert. Der erste analysiert entsprechend der DIN V 18599 von 2011 die nutzungsabhängigen Variablen und Berechnungen entsprechend der DIN-Norm zur Berechnung des Energiebedarfs für Nicht-Wohngebäude (Kapitel 7). Der Zweite ist die Berechnung und Auswertung verschiedener Varianten des Nutzungsverhaltens anhand eines Modellgebäudes (Kapitel 8). Aus den Betrachtungen heraus wird im Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt, welche Variablen im Rahmen eines Sensorsystems notwendig sind, um eine nutzungsabhängige Kommunikation zwischen dem Energiesystem und den Nutzer\*innen aufzubauen.

### **3 Nachhaltiges Energiemanagement an der Leuphana**

Die Leuphana Universität befindet sich im Umbau des Energiesystems. Im Rahmen des Neubaus werden Möglichkeiten eröffnet, den genannten Anforderungen an ein nachhaltiges Energiekonzept stärker zu entsprechen als bisher. Ziel der Universität ist es, ohne Ausgleichsmaßnahmen den CO<sub>2</sub>-Ausstoß und den Primärenergiebedarf auf Netto-Null zu bringen (vgl. Leuphana<sup>2</sup> 2013). Grundlage des Vorhabens ist die stetige Weiterentwicklung eines integralen Energiekonzeptes. Die Entwicklung steht unter dem normativen Konzept der Nachhaltigkeit und versucht somit auch alle Perspektiven dessen stetig weiter zu entwickeln und neue Lösungen zu generieren. Die laufenden Modernisierungsprozesse und der Neubau werden unter diesen Prämissen forschend begleitet. Die Forschung findet dabei in transdisziplinärer Arbeit gemeinsam mit den Praxispartnern statt.

Die Praxispartner dieses Projektes sind die *E.ON-Avacon* als Energielieferant und Betreiber der Blockheizkraftwerke zur Wärmeversorgung der Universität. Weitere Projektpartner sind die Firma *Geothermie Neubrandenburg* (GTN) und die *Energie- und Prozesstechnik Aachen GmbH* (EPA) im Rahmen der Entwicklung und Forschung zum Thema Aquiferspeicher, *Prof. Wolfrum* (Universität Karlsruhe) im Rahmen des Monitoring von Musterräumen, sowie die *Cofely AG*.

Die Cofely AG arbeitet im Rahmen eines Einsparcontractings mit der Leuphana Universität zusammen. Untersucht wird gemeinsam, wie durch ein integral konzipiertes Energiemanagement Energie eingespart werden kann. Entsprechend der Ergebnisse wird das Energiesystem sukzessiv optimiert und der Prozess forschend begleitet. Forschung findet einerseits in Form der Begleitforschung durch das *Institut für Nachhaltige Chemie und Umweltchemie*, als auch andererseits im Rahmen von Projektarbeiten, wie der NaCaVi-Gruppe (Nachhaltiges Campusviertel), statt.

### **3.1 Realisierungen der Anforderungen an ein nachhaltiges Energiemanagement**

Die von KOCH und ZECH (2011:2) gestellten Anforderungen an ein nachhaltiges Energiemanagement können, wie folgend exemplarisch dargestellt, in den Planungen und Handlungen der Leuphana Universität wiedergefunden werden.

Dem Anspruch der Effizienz wird z.B. durch die energetisch optimierte Gestaltung des Neubaus und eine, in diesem Rahmen geplante, kaskadierende Wärmenutzung über das gesamte Campusviertel entsprochen (vgl. Ohse et al. 2012:25). Die Nutzung von Biogas, die Ergänzung der Wärmeproduktion durch Kraft-Wärme-Kopplung und Solaranlagen und die geplante Installation eines Aquiferspeichers zur saisonalen Wärmespeicherung zeigen die Berücksichtigung des Konsistenzansatzes (vgl. Opel et al. 2013:52f.; Koch/Zech 2011:2).

Im Fokus steht die Frage, wie der Suffizienz-Ansatz, durch ein mit den Nutzer\*innen interagierendes System, unterstützt werden kann.

### 3.2 Verbrauch und Potential der Bestandsgebäude

Der Heizenergieverbrauch von Institutsgebäuden einer geisteswissenschaftlichen Universität in Deutschland liegt bei einem Mittelwert von 210 kWh/m<sup>2</sup>a, der von Hörsälen bei 226 kWh/m<sup>2</sup>a (Kluttig et al.2001:4). Der durchschnittliche Endenergiebedarf der Bestandsgebäude der Leuphana Universität, welche mit Ausnahmen des, mit mehreren Laboren ausgestatteten, Gebäude 13 und des Rechenzentrums (Gebäude 7) dem Nutzungsprofil einer geisteswissenschaftlichen Universität entsprechen, liegt bei 175 kWh/m<sup>2</sup>a (Kempa 2010:13).

Der Endenergiebedarf entspricht der Menge an Endenergie, die an der Gebäudehülle übergeben wird, um die normierte Rauminnentemperatur über das gesamte Jahr zu halten (vgl. ebd.:76). Der Begriff der Endenergie umfasst dabei die Anlagenverluste und die tatsächlich dem Zweck entsprechend genutzte Energiemenge (Nutzenergie) (ebd.). Der gesamte Wärmebedarf der Leuphana Universität lag 2010 bei 7803 MWh (Brüggen/ Schaltegger 2012:51). Folgend wird anhand einer Beispielrechnung dargestellt, wie wertvoll bereits die Einsparung von wenigen Prozent des Gesamtverbrauchs ist.

Zehn Prozent eingesparte Wärmeenergie würden hier bereits 780,3 MWh oder 780.300 kWh entsprechen. Wird der Endenergiebedarf entsprechend der DIN V 18599-1 Anhang A in Primärenergie umgerechnet, so ergibt sich im Zusammenhang mit dem Energiemix der Leuphana Universität 2013 folgende Rechnung:

$$780.300 \text{ kWh} * 0,92 * 0,7 + 780.300 * 0,08 * 0,7 =$$

$$780.300 \text{ kWh} * 0,7 \qquad \qquad \qquad = \mathbf{546.210 \text{ kWh Primärenergie 2010}}$$

\*780.300kWh =Wärmeendenergie 2010

\*0,92 = 92% der Energiebereitstellung 2013 aus Biogas

\*0,08 = 8% der Energiebereitstellung aus Erdgas

\*0,7 = entsprechende Primärenergiefaktoren: 0,7 = für bereitgestellte Wärme bei Kraftwärmekopplung und erneuerbaren Brennstoffen ebenso bei fossilen Brennstoffen.

Mit den eingesparten 546.219 kWh Primärenergie ließen sich, bei einem Primärenergiebedarf von 122,5 kWh/m<sup>2</sup>a (175 kWh/m<sup>2</sup>a \*0,7 nach Kempa 2010:13), entsprechend (546.210kWh / 122,5 kWh/m<sup>2</sup>a =>) **4458,86m<sup>2</sup>** der Bestandsgebäude mit Wärme versorgen.

Mit 122,5 kWh/m<sup>2</sup>a liegen die Bestandsgebäude, die primär mit Seminarräumen und Büros belegt sind, unter dem durchschnittlichen Primärheizenergieverbrauch von 140 kWh/m<sup>2</sup>a für Altbau-Büros (vgl. Knissel 1999:12). Die Analysen des Einspar-Contractors Cofely (siehe Kapitel 3.2) zeigen jedoch, dass die aktuellen Verbrauchswerte noch weiter unterschreitbar sind. Des Weiteren sind die hohen Energieeinträge durch Personen als Minderungsfaktor der Verbräuche zu bedenken (siehe dazu Kapitel 7.7.5). Für einen direkten Verbrauchsvergleich müssten, entsprechend der unterschiedlichen Belegung mit Personen und Arbeitsgeräten, Büros von den Seminarräumen in der Bewertung getrennt werden.

Nicht nur die eingesparte Wärmeenergie, sondern auch die CO<sub>2</sub>-Äquivalente von 1499t (2010) \*0,1 = 149,9t zeigen, welchen Effekt Maßnahmen zur Einsparung weniger Prozent der genutzten Endenergie mit sich ziehen und wie groß der Beitrag zu einem nachhaltigen Energiemanagement am Campus sein kann.

## **4 Nutzungsverhalten**

Das vorliegende Kapitel wird zeigen, welchen Einfluss die Nutzer\*innen auf den Energieverbrauch von Gebäuden haben und warum nachhaltiges Energiemanagement nur funktioniert, wenn die Nutzer\*innen als Personen mit einem großem Einfluss auf die Steuerung und mit individuellen Bedürfnissen und Verhaltensgrundlagen mit eingebunden werden. Welche Differenzen zwischen der geplanten Nutzung von Gebäuden und der tatsächlichen Nutzung liegen können, zeigt Kapitel 4.1. Welche Faktoren das Verhalten der Nutzer\*innen beeinflussen und welche Möglichkeiten es gibt, den besonderen Anforderungen zu begegnen, zeigen die Kapitel 4.2 & 4.3. In Kapitel 4.4 wird dann zusammengefasst, welche Anforderungen sich an ein nutzerspezifisches Feedbacksystem stellen.

### **4.1 Einfluss der Nutzer\*innen auf den Energieverbrauch**

Wie die Einbindung stattfinden kann und welche Formen der Einbindung es gibt, wird nachfolgend dargestellt. Relevant ist die Untersuchung des Nutzungsverhaltens, da die Investitionskosten im Verhältnis zu den potentiellen energetischen und monetären Einsparungen gering sind. Nach einer Analyse der Cofely Deutschland GmbH kann alleine durch eine Anpassung der Gebäudeleittechnik (GLT) an die Nutzung eine Einsparung von bis zu 20% erreicht werden (Opel et al. 2013:114).

Unter der GLT wird die oberste Managementebene auf Softwarebasis verstanden, die als visuelle Schnittstelle zwischen den Haustechniker\*innen und der Automationsebene (DDC) zu betrachten ist. Die letzte Ebene der Gebäudeautomation ist die Feldebene, auf der sich die Aktoren und Sensoren befinden (vgl. Abbildung 3).

Welche Ausmaße der Einfluss der Nutzer\*innen auf den Energieverbrauch von Gebäuden nehmen kann, zeigen die Analysen von FISCH/PLESSER, die im Rahmen der EVA-Studie Abweichungen von durchschnittlich 70% zwischen theoretischem und praktischem Energiebedarf an Gebäuden der TU-Braunschweig gemessen haben. Die Differenz ergab sich zu einem großen Teil durch Verhaltensabweichungen der Nutzer\*innen entgegen dem Energiekonzept der Gebäude. Konkret wurden die Abweichungen bei der Nutzung des Sonnenschutzes und bei der Lüftung als Hauptfaktoren identifiziert (vgl. Fisch/Plesser 2007:154). Potential und Gefahr des Nutzungsverhaltens werden somit direkt verständlich. Eine Angleichung der GLT kann somit einerseits zu Einsparungen führen, andererseits jedoch führt dies nicht zwangsläufig dazu, dass die Nutzer\*innen sich entsprechend der Planungen verhalten. VLEK und STEG fassen mit Bezug auf MIDDEN, KAISER und MCCALLEY zusammen:

Die umweltbezogene Effektivität von ökologischen Technologien hängt sehr vom Interaktionsverhalten der Nutzer\*innen ab (vgl. Vlek/Stek 2007:7). Im nächsten Kapitel wird deshalb dargestellt, welche Faktoren ausschlaggebend für das Verhalten sind.

#### **4.2 Theorien des Verhaltens**

Eine Übersicht über vorhandene Theorien bezüglich der Entscheidungen und des Verhaltens von Menschen gibt es viele. Im Kontext der Umweltverhaltensforschung kann eine Übersicht dazu in der Arbeit von HUNECKE (2008) gefunden werden. Speziell in Hinblick auf das Verhalten im Umgang mit Energie gibt die Arbeit von Martiskainen (2007) einen Überblick über die gängigen Ansätze zur Determination von Verhalten. In beiden Arbeiten werden weitgehend die gleichen Theorien dargestellt und aus keiner geht eine Theorie hervor, die alleine dazu im Stande ist das Verhalten zu determinieren. Vielmehr wird in den Mittelpunkt gestellt, wie das Verhalten von einer Summe von individuell gewichteten Variablen wie Einstellungen, Motivationen, Absichten, Wissen, Werten, Sozialisation, sozialem Umfeld und auch der Abwägung von Kosten (-Nutzen) begründet wird.

Diese Variablen lassen sich ergänzen mit den Ergebnissen von Abrahamse/Stek: sie haben neben den Einstellungen auch die erwartete Verhaltenskontrolle, eigene Normen, das Bewusstsein über die Verhaltenskonsequenzen und die Zuschreibung von Verantwortung als hilfreiche Determinanten erkannt (Abrahamse/Stek 2009:719). Letztlich müssen jedoch auch feste Verhaltensweisen (habits) als Handlungsfaktor erkannt werden (vgl. Martiskainen 2007:57), denn nicht jede Handlung ist eine bewusst gesteuerte. Deshalb muss nicht nachhaltiges Verhalten erst bewusst werden, bevor es zu einer Verhaltensänderung kommen kann. Habituelles Verhalten kann auch ein Grund dafür sein, dass die gelaufenen Kampagnen nur eine begrenzte Wirkdauer hatten. Denn je stärker habituelles Verhalten ausgeprägt ist, desto weniger wird dieses reflektiert (Martiskainen 2007:23).

Über allen Untersuchungen steht jedoch die Erkenntnis, dass die Determinanten stark kontextabhängig sind. So können zum Beispiel Energieeinsparungen besser mit psychologischen Variablen (wie der erwarteten Verhaltenskontrolle) und der grundsätzliche Energiekonsum besser mit soziodemographischen Variablen erklärt werden (Abrahamse/Stek 2009:720). Festhalten lässt sich somit, dass Interventionsmaßnahmen im Idealfall alle Einflussfaktoren des Nutzungsverhaltens berücksichtigen: Zum einen interne wie Einstellungen und Werte, zum anderen externe wie soziale Normen und Regulierungen, aber auch Routinen, also habituelle, nicht bewusste Verhaltensweisen (vgl. Martiskainen 2007:23).

Dass der Bezug auf eine Theorie für die Durchführung von Kampagnen keine notwendige Voraussetzung ist, erklärt die weitgehende Übereinstimmung innerhalb der betrachteten Interventionsstrategien verschiedener Erklärungsansätze (vgl. Hunecke 2008:104). Die Aussage hinter dieser Annahme ist nicht, dass keine Theorie notwendig ist, um eine Kampagne zu gestalten. Vielmehr soll sie zeigen, dass es bisher noch keine Theorie gibt, die es schafft, Verhalten komplett zu erklären. Vielmehr gibt es einen Pool anschlussfähiger Theorien in der Debatte um nachhaltiges Verhalten (Hunecke 2008:114), mit denen es bereits gelingt, große Teile des Verhaltens zu determinieren (vgl. Abrahamse/Stek 2009). Wichtig scheint es deshalb, aus den Untersuchungen zu den Theorien, die Erkenntnisse herauszuarbeiten, die helfen können, den Erfolg einer Kampagne zu steigern.

Beispielsweise ist es nicht möglich nur anhand vom Wissen über Einstellungen, Meinungen und Risikoerwägungen das Verhalten einer Gruppe komplett zu bestimmen. Das bestätigt sich in der Studie von SELIGMAN ET AL. von 1979, auf die in der Enzyklopädie Umweltpsychologie verwiesen wird (vgl. Seligmann et al. in Wortmann 2009:2): In der Studie wurden mit Hilfe von sechs Einstellungsfaktoren, insbesondere anhand vom persönlichen Komfort und der Gesundheitsrelevanz, 60% richtige Voraussagen zum Energieverbrauch einer Siedlung erreicht.

Weiterhin wurde in der Studie eine Korrelation zwischen den Energieeinsparungen und der Verantwortlichkeitsdistribution gemessen. Festgestellt wurde, dass die Zuschreibung externer Verantwortlichkeit positiv mit dem Heizenergiebedarf und die Zuschreibung der eigenen Verantwortung sowie auch die subjektive Wichtigkeit des Energiesparens negativ mit dem Stromverbrauch korrelieren (ebd.).

In diesem Zusammenhang sei drauf verwiesen, dass es zur Durchführung einer Kampagne und zur Evaluation dieser erst einmal eine Möglichkeit geben muss, die Effekte des Nutzungsverhaltens zu messen und sie den Nutzer\*innen zuzuordnen. Denn nur so kann einerseits eine klare Zuordnung der Verantwortung getroffen werden und andererseits der verbrauchten Energie ein Wert zugeschrieben werden. Weiter ist die Zuordnung der Verbräuche wichtig, da die Durchführung von Interventionsmaßnahmen aus wissenschaftlicher Perspektive nur dann einen Sinn ergibt, wenn sie auch evaluiert werden kann. Wird die Einsparung in den Vordergrund gestellt, besteht ebenfalls eine Abhängigkeit der durchführbaren Interventionsmaßnahmen von den geplanten technischen Installationen. Es lassen sich somit zwar Erfolge im Rahmen durchgeführter Interventionen erzielen, doch eine nachhaltige Veränderung des individuellen Verhaltens lässt sich nur erzielen, wenn wir die Gründe für das individuelle Verhalten auch verstehen (Hunecke 2008:110).

Es liegt somit ebenso im wissenschaftlichen Interesse wie auch im Interesse langfristiger Energieeinsparungen zukünftig nicht nur Interventionsmaßnahmen durchzuführen, sondern diese auch verstärkt auf ihre Wirkung zu evaluieren. Eine willkürliche Nutzung dieser Maßnahmen mit einer reinen Erhebung der Energieeinsparungen greift im Sinne eines interdisziplinären Forschungsansatzes nicht weit genug. Somit sollte eine zusätzliche Erhebung der Wirkungen der einzelnen Interventionen auf die Nutzer\*innen Bestandteil weiterer Forschung sein. Welche Maßnahmen und Kampagnenbausteine einsetzbar sind, wird folgend dargestellt.

### 4.3 Bausteine der Kampagnen

#### 4.3.1 Wirkung der Kampagnenarbeit

Wie kann es gelingen, an der Leuphana Universität eine Abstimmung zwischen Energiemanagement und den Nutzer\*innen zu erreichen?

Im Rahmen der Change-Kampagnen zum Nutzungsverhalten an 36 deutschen Hochschulen konnten Einsparungen von bis zu 20% der Heizenergie erreicht werden. Durchschnittlich wurden 6% Einsparungen elektrischer und thermischer Energien erreicht (vgl. Matthies 2008:16/18). Bereits an der Leuphana Universität gelaufene Kampagnen zur Verbesserung des Nutzungsverhaltens führten zu Einsparungen von 4,5% - 12% (Opel et al. 2013:119). Dass die Kampagnen zur Veränderung des Nutzungsverhaltens in ihrer Wirkdauer sehr beschränkt waren, ist den nicht sinkenden Verbrauchswerten von Wärme und Strom im Zeitraum 2007-2011 der Leuphana Universität zu entnehmen (Leuphana<sup>3</sup> 2011).

	WÄRMEABGABE UNI				
	WÄRME- MENGE	WÄRME- MENGE	WÄRME- MENGE	WÄRME- MENGE	WÄRME- MENGE
EINHEIT	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh
JAHR	2007	2008	2009	2010	2011
JANUAR	809,26	862,61	1111,31	1352,28	956,83
FEBRUAR	756,80	734,31	865,36	1009,27	993,31
MÄRZ	580,62	728,20	720,13	736,93	737,84
APRIL	295,76	468,82	230,46	407,50	270,44
MAI	182,11	161,61	197,51	345,31	173,86
JUNI	100,62	100,60	175,68	130,28	95,55
JULI	97,53	93,05	98,79	17,56	99,00
AUGUST	96,76	91,74	95,27	0,00	100,61
SEPTEMBER	194,34	190,40	141,02	128,97	
OKTOBER	440,18	424,85	523,86	452,83	
NOVEMBER	737,33	680,85	576,20	736,72	
DEZEMBER	801,13	820,24	935,57	1279,43	
<b>SUMME</b>	<b>5092,44</b>	<b>5357,28</b>	<b>5671,16</b>	<b>6597,08</b>	<b>3427,44</b>

Abbildung 1: Wärmeverbrauch Hauptcampus Leuphana Universität (Leuphana<sup>3</sup> 2011)

Eine anhaltende Entwicklung des Energieverbrauchs nach unten ist nicht festzustellen. So ist bei der Betrachtung der Verbrauchswerte für die Jahre 2008-2012 der geringste

Verbrauch im Jahr 2008 (5,36 GWh) und bei einem nahezu parallelen Verlauf zu den Gesamtverbräuchen (

	WÄRMEABGABE				
	UNI				
	WÄRME- MENGE	WÄRME- MENGE	WÄRME- MENGE	WÄRME- MENGE	WÄRME- MENGE
EINHEIT	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh
JAHR	2007	2008	2009	2010	2011
JANUAR	809,26	862,61	1111,31	1352,28	956,83
FEBRUAR	756,80	734,31	865,36	1009,27	993,31
MÄRZ	580,62	728,20	720,13	736,93	737,84
APRIL	295,76	468,82	230,46	407,50	270,44
MAI	182,11	161,61	197,51	345,31	173,86
JUNI	100,62	100,60	175,68	130,28	95,55
JULI	97,53	93,05	98,79	17,56	99,00
AUGUST	96,76	91,74	95,27	0,00	100,61
SEPTEMBER	194,34	190,40	141,02	128,97	
OKTOBER	440,18	424,85	523,86	452,83	
NOVEMBER	737,33	680,85	576,20	736,72	
DEZEMBER	801,13	820,24	935,57	1279,43	
<b>SUMME</b>	<b>5092,44</b>	<b>5357,28</b>	<b>5671,16</b>	<b>6597,08</b>	<b>3427,44</b>

Abbildung 1) liegt auch der letzte Verbrauchswert von 5,48 GWh im Jahr 2012 über dem kleinsten aus 2008 (vgl. Opel et al. 2013:52). Die Verbrauchskurven sind bezüglich der Wirkung der Kampagnenarbeit nur bedingt aussagekräftig. Denn die Vielzahl von möglichen Faktoren, die zu den jeweiligen Mehrverbräuchen geführt haben, ist kontinuierlich gestiegen. So wurden zum Beispiel stetig die Dachgeschosse der Bestandsgebäude ausgebaut und somit die Nutzfläche vergrößert. Gleichzeitig wurden sie jedoch gedämmt, wodurch es wiederum zu Senkungseffekten kommen kann.

Um eine Wirkungsanalyse bezüglich der Kampagnenarbeit durchführen zu können, bedarf es also der Möglichkeit das Nutzungsverhalten von den Gebäuden zu trennen (siehe Berechnungen im Kapitel 8).

Nachfolgend werden Interventionsmaßnahmen der Nutzungskampagnen dargestellt und mögliche Ursachen für die nicht anhaltenden Verhaltensveränderungen untersucht.

#### **4.3.2 Makroebenen & Mikroebenen in der Kampagnenarbeit**

Von welchen Faktoren hängt der Erfolg von Nutzerkampagnen ab? Nutzer\*innen werden nach ABRAHAMSE ET AL. auf zwei Ebenen beeinflusst. Unterschieden wird zwischen der *Makro- und der Mikroebene* (vgl. Abrahamse et al. 2005:274).

Die Makroebene beschreibt Einflüsse gesamtgesellschaftlicher Strukturen und technischer Umgebungsvariablen (vgl. ebd.:274). Technische Veränderungen, wie die der Bestandsgebäudesanierung, werden hier als rahmende Variable betrachtet. Durch ihre Veränderungen entstehen neue Möglichkeiten der Unterstützung bei der Arbeit auf der Mikro-Ebene. Die Mikro-Ebene beschreiben die intrapersonellen Einflüsse des Handelns (z.B. Einstellungen und Werte).

#### **4.3.3 Handlungsaktivierende und handlungsunterstützende Maßnahmen**

Weiter wird zwischen *handlungsaktivierenden Maßnahmen* und *Effizienzmaßnahmen* oder auch *handlungsunterstützenden Maßnahmen* unterschieden (Gardner & Stern 2002:261). Effizienzmaßnahmen haben einen geringeren Lerneffekt und zeichnen sich durch einmaliges Handeln aus (vgl. Abrahamse et al. 2005:274). Zu diesen zählen unter anderem Anschaffungen, die zu Energieeinsparungen führen.

Hier zeichnet sich bereits ab, warum diese Maßnahmen oft mit einem Reboundeffekt einhergehen. Das Auswechseln eines Leuchtmittels führt zum Beispiel nicht zwangsläufig dazu, dass die nutznießende Person auch den Zweck hinter dieser Maßnahme selbst als wichtig empfindet oder wahrnimmt. Ist dies nicht der Fall, ist leicht nachvollziehbar, dass das Wissen um den geringeren Verbrauch zu unachtsamerem statt zu bewussterem Umgang mit dem Licht führt. Ein solches Verhalten wird als substitutionsbezogener Reboundeffekt bezeichnet (vgl. Berkhout et al. 2000:431). Da das Ziel die Vermeidung entsprechender Effekte ist, wird der Fokus auf die handlungsaktivierenden Maßnahmen gelegt.

#### **4.3.4 Wissen vs. Kompetenzen**

Ziel der Arbeit mit handlungsaktivierenden Maßnahmen auf der Mikroebene ist die Einflussnahme auf Wahrnehmung, Einstellung und Handlungsmöglichkeiten der Nutzer\*innen (vgl. ebd.:274). Damit bewegt sich die Arbeit neben dem technischen Kontext auch im Kontext der Verhaltens- und der Umweltpsychologie. Und es zeigt sich, warum Lösungen zu solch komplexen Themen eines interdisziplinären Ansatzes bedürfen. Eben diese Ziele (Wahrnehmung, Einstellung, Handlungsoptionen) sind es auch, die in der übergreifenden Bildung für eine nachhaltige Entwicklung (BNE) eine Rolle spielen. Der Kompetenzansatz der BNE fördert das Individuum dabei Kompetenzen aufzubauen, um Herausforderungen *erkennen*, diese *bewerten* und entsprechend *handeln* zu können (vgl. Rost et al. 2003:10; Appelt et al. 2007:77). Die

Optimierung der Interaktionen zwischen Nutzer\*innen und Energiemanagementsystem sind somit als interdisziplinäre Herausforderung zu begreifen.

Nachhaltiges Handeln wird entsprechend besser durch die Ausbildung und Förderung von Kompetenzen als durch Erlernen oder Auferlegen eines erwünschten Verhaltens gefördert. Entsprechende Maßnahmen wirken sich nicht direkt auf das Handeln aus, sondern sie befähigen dazu, das eigene Handeln zu verstehen und aus dem Verstehen heraus das eigene Handeln zu verändern.

#### 4.4 Interventionsmaßnahmen

Eine weitere Aufteilung der Maßnahmen ist die zwischen *vorgreifenden* und den auf die *Konsequenzen* bezogenen Maßnahmen (vgl. Abrahamse et al. 2005:275). In Abbildung 2 werden die gängigen Interventionsmaßnahmen dargestellt. Es folgt eine kurze Darstellung ihrer Inhalte und der zur Durchführung und Evaluation notwendigen Mittel.

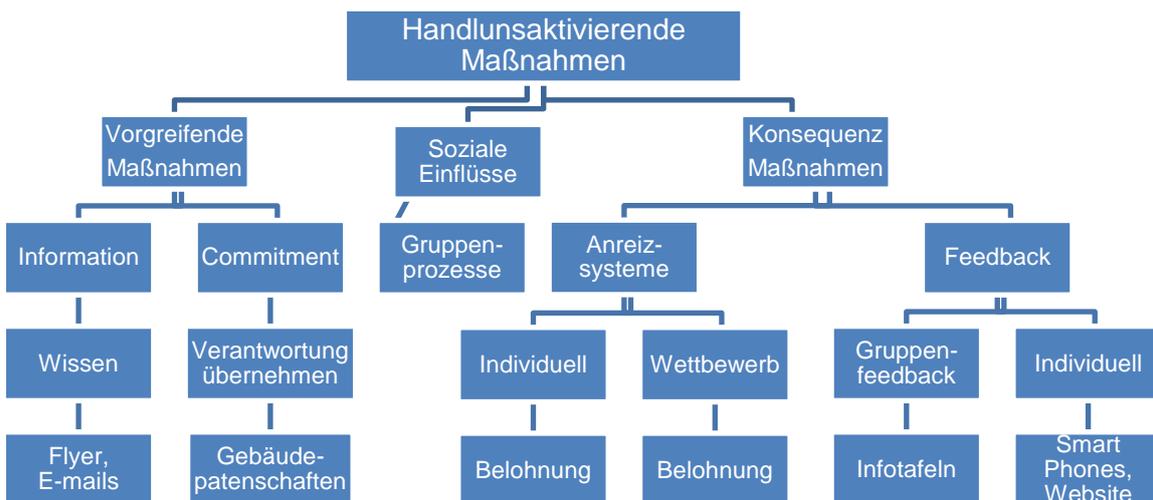


Abbildung 2: Erweiterte Darstellung handlungsaktivierender Maßnahmen (vgl. Opel et al. 2013:114)

##### 4.4.1 Vorgreifende Maßnahmen

Die Kommunikation von Informationen stellt eine Möglichkeit handlungsvorgreifender Maßnahmen. Es kann hier mit breit gestreuten Informationen wie Rundmails, aber auch mit spezifischen Informationen gearbeitet werden. Es hat sich gezeigt, dass spezifische Informationen zu besseren Effekten führen als breitgestreute. Reine Informationskampagnen können nicht nur in ihrer Wirkung von kurzer Dauer sein,

sondern auch kontraproduktiv, im Sinne einer ablehnenden Haltung gegenüber dem Thema, wirken (vgl. Owens 2008:4413f.).

Vorteilhaft ist nach Hunecke die größtmögliche Abstimmung von Informations- und Kommunikationsmaßnahmen auf die Sprache und die Kommunikationskanäle der Nutzer\*innen (Hunecke 2007:104). Je höher die Auflösung technisch gemessenen Verhaltens ist, desto individueller können Informationen bereitgestellt werden.

Commitment – also das Bekennen der Nutzer\*innen zu einem Einsparziel (beispielsweise 10 %) wurde bereits in der Nix-Verschwenden Kampagne genutzt. Öffentliches Commitment führt dabei zu größeren Erfolgen als nicht öffentliches (Abrahamse 2005:276). Hier greifen persönliche und soziale Normen, wobei die sozialen Normen, also die Erwartungen anderer, einen größeren Wirkfaktor zu haben scheinen als persönliche Normen.

Einen Ansatz zur Erklärung dieses Phänomens bietet SOLOMON ET AL. mit dem Konzept der *Bezugsgruppe* aus der Konsumtheorie.

Die als Bezugsgruppe bezeichnete Gemeinschaft kann das Verhalten der einzelnen Nutzer\*innen dabei auf drei verschiedenen Ebenen beeinflussen (vgl. Solomon et al. 2007:316):

- Utilitaristische Ebene: (erfüllen (gemeinsam) gesetzter Erwartungen und Ziele der Gruppe)
- Wertexpressive Ebene: Betonung der eigenen Werte, Außendarstellung
- Informatorische Ebene: Unterstützung mit zusätzlichen Informationen

Möglich ist hier nicht nur das Commitment einzelner Personen, sondern auch das von Nutzungsgruppen oder Institutionen. Der Zusammenschluss von Aktionsgruppen mit einem gemeinsamen Ziel erweist sich dabei als besonders wirksam (vgl. Raw/Ross 2011:127). Eine Kopplung von Feedback mit Prämien (Rewards) (vgl. Abrahamse et al. 2005:281), z.B. in Abhängigkeit von den Einsparungen, kann ebenfalls unterstützend wirken, ist jedoch nach ABRAHAMSE ET AL. von geringer Wirkdauer (ebd.).

Goal setting beschreibt die Vereinbarung von Einsparzielen. Oft wird es mit anderen Maßnahmen kombiniert, z.B. Commitment oder Feedback. MCCALLY und MIDDEN zeigten in ihrer Studie, dass eben diese Kombination sehr erfolgreich sein kann. Eine weitere Erkenntnis der Studie bestätigt den Zusammenhang zwischen Persönlichkeit der Nutzer\*innen und dem Design der Maßnahme. Denn prosoziale Nutzer\*innen erzielten höhere Einsparungen, wenn sie ihre Ziele selbst gesetzt haben, wohingegen eher

selbstbezogene Nutzer\*innen höhere Einsparungen bei vorgegebenen Zielen erreicht haben (vgl. McCally/ Midden 2002:599). Da im Schnitt die Einsparungen der Gruppe mit selbstgesetzten Zielen höher lag (ebd.) und in einer Kampagne Akzeptanzprobleme bei unterschiedlichen Vorgehen zu erwarten sind, sollte die Zielsetzung durch die Nutzer\*innen selbst geschehen.

#### **4.4.2 Konsequenzbezogene Maßnahmen**

Anreizsysteme (Rewards) können monetär oder auf der sozialen Ebene, zum Beispiel durch Anerkennung, gesetzt werden. Auch Anreize, die durch die Vermeidung von Kosten entstehen, sind als Interventionsmaßnahme nutzbar. Die Akzeptanz hierbei kann durch die Berücksichtigung von Gerechtigkeits- und Fairnessnormen gesteigert werden (vgl. Hunecke 2007:105). Anreize wirken am effektivsten in Kombination mit (komparativem) Feedback, da die eigene Performance so überprüfbar ist (Martiskainen 2007:43). Das Problem des Anreizsystems liegt darin, dass ihre Wirkung oft mit der Auszahlung endet (ebd.:44).

Weiter sind auch hier eine Zuschreibung der Energieverbräuche und eine gerechte Bewertung notwendig. So kann es leicht realisierbar sein, in einem Gebäude Energie einzusparen, das große Verbrauchswerte hat und in dem bisher ein sehr unbedachter Umgang mit den Verbrauchern geführt wurde, während es schwer umzusetzen sein kann, in einem Gebäude mit vorwiegend kleinen Verbrauchern und einem durchschnittlichen Umgang mit Energie die prozentual gleiche Menge Energie einzusparen.

Feedback stellt die zweite Möglichkeit der handlungsfolgenden Interventionen dar. Durch Feedback wird die Wirkung anderer Maßnahmen wie das Goalsetting stark in der Effektivität gesteigert (Abrahamse 2005:278). Auch Anreize werden erst auf diese Weise möglich. Welche Form des Feedbacks ist jedoch am effektivsten? Dazu soll die sondierende Studie von FISCHER einen Überblick geben. Es wurden dabei die erfolgreichsten Studien in Bezug auf ihre Einsparungen ausgewählt und die gemeinsamen Erfolgsfaktoren herausgearbeitet (Fischer 2008:97ff.):

- Frequenz: direktes Feedback scheint hier klar herauszustechen. Jedoch sind auch bei einem wöchentlichen bis monatlichen Feedback große Erfolge zu erwarten.
- Dauer: direkt am Anfang der Maßnahmen spielt die Dauer keine Rolle. Auf lange Sicht jedoch scheinen Langzeitmaßnahmen einen Einfluss auf das

habituelle Verhalten zu nehmen. Deshalb ist hier auch eine Veränderung über die Dauer der Maßnahme hinaus zu erwarten.

- Inhalt: Verbrauchs- und Kostenmeldungen werden nahezu immer gegeben. Empfohlen wird hier ein Feedback, das auf die Motive und die vorherrschenden Normen der Gruppe zugeschnitten ist.
- Vergleiche: Obwohl alle betrachteten Studien ein vergleichendes Feedback nutzen, ist bei keiner ein Effekt messbar. Es wird angenommen, dass sich die Effekte von motivierten Nutzer\*innen, die hohe Verbräuche haben, mit denen, die niedrige haben und deshalb keine Änderungen vornehmen, aufheben.
- Auflösung: Zur spezifischen Auflösung des Verhaltens gibt es wenige Studien, jedoch erreichten zwei von drei Studien, mit höher Auflösung, mit die höchsten Einsparungen bei den Auswertungen von FISCHER.
- Medium und Form des Feedbacks: Digitale Medien haben die größten Erfolge. Die Aufbereitung des Feedbacks sollte dabei möglichst interaktiv gestaltet sein und aus einer Kombination von Texten, Diagrammen und Tabellen bestehen. Auch hier ist die Datenlage sehr dünn und weitere Forschung notwendig. An dieser Stelle sei auf die Arbeit von Andrea Triebel an der Leuphana Universität verwiesen.
- Sie setzt sich eben mit dieser Frage auseinander, wie ein digitales Feedback aufbereitet sein muss und wie die Interaktion zwischen Nutzer\*innen und System gestaltet werden kann.
- In welchen Kombinationen es unterstützend wirkt, ist bereits in den vorherigen Maßnahmen dargestellt.

Dieser Überblick zeigt bereits, wie ein Feedbacksystem beschaffen sein sollte. Wichtig für den Inhalt sind nach FISCHER, dass die Rückmeldungen einfach zu verstehen sind und dass sie in (mindestens) täglichen Abständen kommen (vgl. Fischer 2008:101). Weiter sollte das System interaktiv und über einen langen Zeitraum laufen und Vergleiche zwischen anderen Nutzer\*innen und den eigenen Verbräuchen klar visualisieren (ebd.). Die betrachteten Studien erreichten mit den dargestellten Inhalten Unterschiede von bis zu über 14% gegenüber den Kontrollgruppen (ebd:98).

Ein sehr großes Problem des Feedbacksystems besteht in den hohen Investitionskosten für ein hochauflösendes Feedbacksystem. So ist es vorteilhaft ein Messsystem bereits bei der Gebäudeplanung zu berücksichtigen. Ein entsprechendes Sensorsystem ist für den Neubau der Leuphana Universität geplant (vgl. Kapitel 5.2). Für die Bestandsgebäude der Leuphana Universität ist im Rahmen der anstehenden Sanierungen die Installation weiterer Sensoren geplant (siehe 5.3). Auf diese Weise kann die

Auflösung eines Feedbacksystems erhöht werden und es wird möglich, mehr als nur den Wärmebedarf des Gesamtgebäudes zurückzumelden.

Dass die Investition in ein dauerhaftes Feedbacksystem sinnvoll und auch erwünscht ist, geht aus den Erhebungen von van Houwelingen und Raaij hervor. Hier gingen, selbst nach dem Gebrauch eines Feedbacksystems über den Zeitraum eines Jahres, die Verbrauchswerte im folgenden Jahr ohne Feedbacksystem wieder hoch. Es kann somit zumindest in diesem Zeitraum noch keine Veränderung des habituellen Verhaltens festgestellt werden. Dies bestätigte auch die hohe Anzahl der Nutzer\*innen (2/3), die ein solches System permanent installiert haben wollten (vgl. Houwelingen/Raaij 1989:103). Dass FISCHER bereits habituelle Verhaltensänderungen durch Feedbacksysteme verzeichnen konnte, kann bedeuten, dass der Grad der Informationen ausschlaggebend für die Auswirkungen auf habituelles Verhalten ist. Da die Personen, die an der Universität tätig sind, häufig wechseln, erscheint es sinnvoll, hier ein dauerhaftes Feedbacksystem zu installieren. Denn auf diese Weise können die positiven Effekte auch über längere Zeiträume erhalten bleiben.

#### ***4.4.3 Maßnahmenmix***

Die Darstellung der einzelnen Interventionsmaßnahmen zeigte einerseits welche Anforderungen für einen Einsatz dieser erfüllt werden müssen, besonders jedoch auch, dass sich die Erkenntnisse auf der theoretischen Ebene mit den gemessenen Einsparungen im Rahmen vorangegangener Kampagnen an der Leuphana Universität decken. Auch zeigt sich, wie sinnvoll es ist die Maßnahmen nicht einzeln, sondern in einem Maßnahmenmix einzusetzen (Abrahamse et al. 2005:274). Beispielsweise wurde im Rahmen der erfolgreichen (12% Einsparungen gegenüber dem Vorjahr) Nix-Verschwenden-Kampagne (Informationen, Goal setting und Feedback) ein entsprechender Mix der Maßnahmen genutzt (Beyer et al. 2008:30).

Die Ansprache der verschiedenen Determinanten nach Owens ist entsprechend Kapitel 4.2 deshalb notwendig, weil Verhalten und Einstellungen außer von dem Informationsstand einzelner Personen auch von physischen, sozialen, kulturellen und institutionellen Faktoren beeinflusst werden (vgl. Owens 2008:4414). Die besondere Effektivität der Kombination der verschiedenen Interventionsmaßnahmen (Schan 2007:143) bestätigt ebenfalls die Annahme. Für eine erfolgreiche Kampagne bezüglich langfristiger Energieeinsparungen ist ein Maßnahmenmix somit unumgänglich. Für die Evaluation von Kampagnen in Hinblick auf die Weiterentwicklung der

Verhaltenstheorie bedeuten die großen Überschneidungen bezüglich der angesprochenen Determinanten folgendes: Maßnahmen können nicht nur selektiv, sondern sie müssen auch in Bezug auf ihr gemeinsames Wirken zur Stärkung der einzelnen Determinanten, bewertet werden. Ähnlich wie es auch SCHAHN bezüglich der Effektivitätsbewertung der Maßnahmen fordert, muss auch hier eine summative statt einer vergleichenden Evaluation der einzelnen Maßnahmen vorgenommen werden (Schan:2007 143).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Interventionsmaßnahmen am effektivsten im Zusammenhang mit einem Feedbacksystem funktionieren und angewandt werden sollten. Dieses Feedbacksystem sollte im Idealfall permanent installiert sein und im täglichen Intervall klar aufbereitete Informationen in einer interaktiven Umgebung zur Verfügung stellen.

Da sich die Erfolge der, an der Leuphana durchgeführten, Maßnahmen mit bis zu 12,5% Einsparungen mit den Einsparungen in den Studien decken, ist davon auszugehen, dass der Grund für die nicht anhaltenden Einsparungen nicht an der Auswahl der Maßnahmen, sondern vielmehr in der verhältnismäßig kurzen Dauer der Kampagne liegt. Zur nachhaltigen Einbindung der Nutzer\*innen ist es daher notwendig ein dauerhaftes Interaktionssystem zwischen den Nutzer\*innen und der Gebäudeleittechnik zu installieren.

## **5 Ambient-Intelligence**

### **5.1 Was ist Ambient-Intelligence (AmI)**

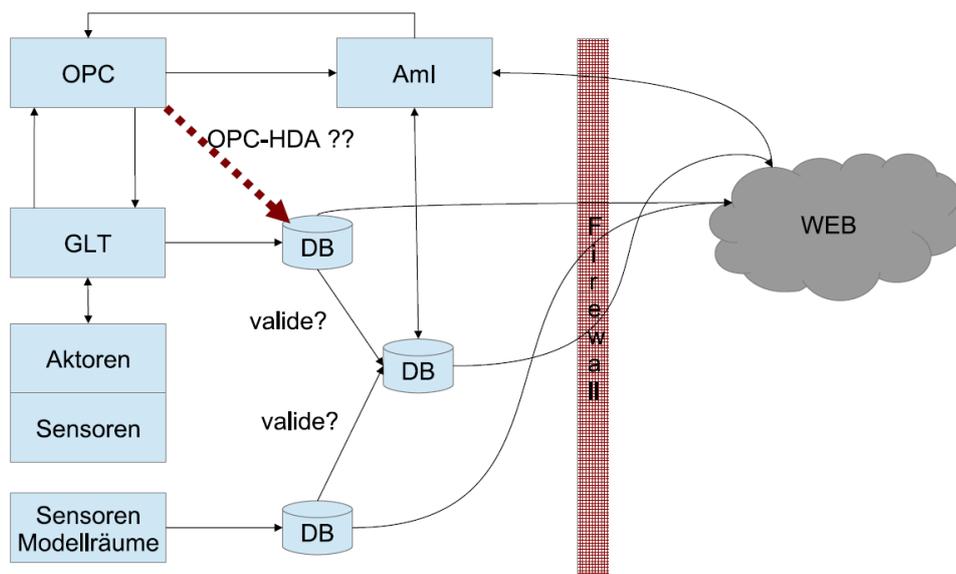
AmI ist definiert als eine „allgegenwärtige elektronische Assistenz“ (Elberspächer/ von Reden 2006:V). Das Besondere dabei ist die, den Nutzer\*innen gebotene, digitale Umgebung, die es ihnen ermöglicht ihre Bedürfnisse (z. B. Raumklima, Lichtverhältnisse) anhand von Zielvorgaben zu formulieren (siehe auch Empfehlungen des BMVBS in Kapitel 2.2). Welche Komponenten dann, in welcher Form gesteuert werden können, wird anhand der Zielvorgaben und Programmierungen innerhalb der Rahmenkonzeptionen vom System selbst berechnet. Ziel ist eine selbstorganisierte Funktionalität des Systems (vgl. Encarnação 2006:12) und eine digitale Umgebung, die

fähig ist sich auf die Nutzer\*innen einzustellen, mit ihnen zu interagieren und dabei nahezu unsichtbar im Hintergrund zu arbeiten (vgl. Elberspächer/ von Reden 2006:V).

Das Feedback über das eigene Verhalten der Nutzer\*innen ist eine Eigenschaft moderner Gebäude. Was jedoch sind die Eigenschaften moderner Gebäude? Moderne Gebäude zeichnen sich für BINTERNAGEL (2003:6) „durch sehr ressourcenschonende, wirtschaftlich arbeitende Heizungs- und Brauchwasserbereitungssysteme aus“ (Binternagel 2003:6). Dieses Ziel der ressourcenschonenden und wirtschaftlich arbeitenden Gebäude ist um die Steuerung von Strom und Kälte- und Lüftungsbedarf von Gebäuden zu erweitern. Zusätzlich sollte eine solche Steuerung auch den Kontext der Umgebungsvariablen wie z.B.: Wetterveränderungen oder die unterschiedlichen Bedürfnisse der Nutzer\*innen berücksichtigen. Um diesem Anspruch gerecht zu werden, wurden intelligente Gebäudesteuerungen oder auch *Ambient Intelligence*- (AmI) -Systeme entwickelt.

## 5.2 Aufbau eines Ambient Intelligence Systems

Die Abbildung 3 zeigt einen möglichen Aufbau für das AmI-System, wie es am Audimax installiert werden könnte. Diese Darstellung dient dem Verständnis, wohingegen weitere Entwicklungen zum Aufbau des Systems, insbesondere zur Einbindung der Datenbanken, werden im Rahmen der laufenden Forschung im Projekt spezifiziert werden.



**Abbildung 3: Aufbau eines Ambient-Intelligence-Systems (Meier 2012:6)**

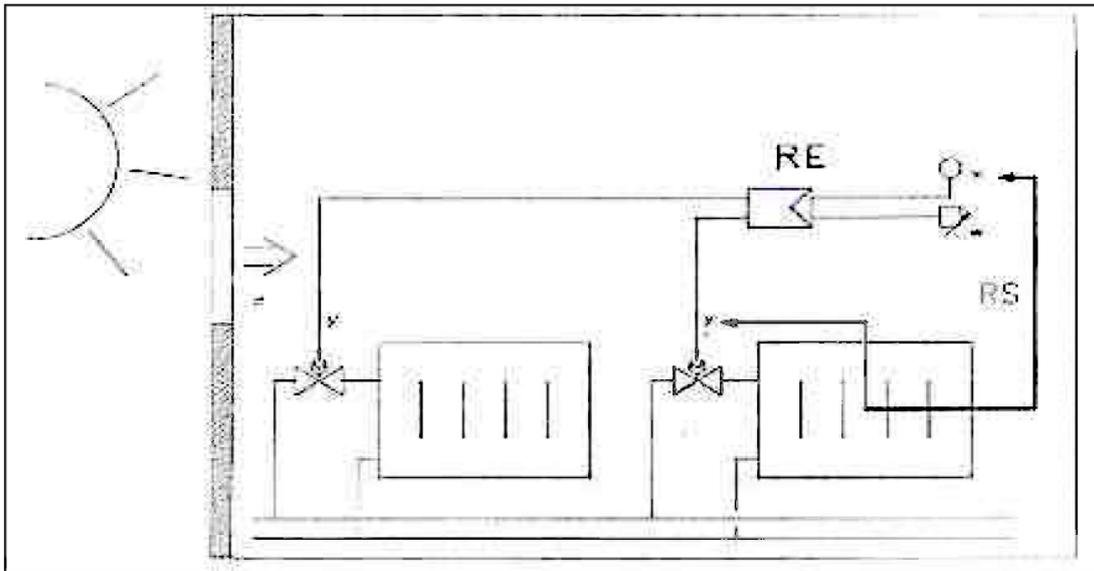
Das Grundprinzip dessen ist, dass die Räume mit Sensoren, wie zum Beispiel zur Messung von Raumtemperatur, dem CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft, der Anwesenheit oder der Fensterstellung ausgestattet sind. Diese Sensoren melden in kurzen, zeitlichen Abständen ihre Messwerte an die GLT und von dort aus werden die Signale an die Datenbank weitergeleitet. Die Anforderungen und Bedürfnisse der Nutzer\*innen und die Rahmenvorgaben der Gebäudemanager\*innen sind im AmI-System hinterlegt. Dieses holt sich die Daten aus der Datenbank und verarbeitet die Informationen zusammen mit weiteren Rahmenbedingungen, wie beispielsweise Wetterprognosen. Berechnet wird dann das optimale Verhalten der Aktoren im Kontext der Bedarfsanforderungen der Nutzer\*innen, des Gesamtenergiesystems und der prognostizierten Rahmenbedingungen. Nun wird ein entsprechendes Steuersignal an die Aktoren gesendet und der Kreislauf beginnt von vorne. Das ganze System agiert dabei dynamisch, passt sich also immer wieder den variablen Gegebenheiten an.

Zusätzlich zur Steuerung gibt es die Möglichkeit ein Feedbacksystem in dieses System zu integrieren. Genau darin unterscheidet sich das AmI-System von dem einer bloßen Gebäudesteuerung, wodurch es somit befähigt ist, sich auf Verhaltensweisen und Präferenzen einzustellen und mit seinen Nutzer\*innen in Interaktion zu treten (siehe Kapitel 4.4.3). Während das Audimax bezüglich des Energiesystems und auch in Bezug auf die Ausstattung mit den Sensoren und Aktoren als richtungsweisendes Projekt alle Grundlagen für eine intelligente Gebäudesteuerung erfüllt, gestaltet sich die Ausstattung der Bestandsgebäude als eine deutlich größere Herausforderung. Grund ist die deutlich geringere Ausstattung mit Mess- und Steuerungsmodulen. Nach dem jetzigen Stand der Entwicklung zeichnet sich die Installation einer Einzelraumsteuerung für die Räume der Bestandsgebäude ab.

### **5.3 Einzelraumregelung**

Eben genau der Schritt der Interaktion, der des gegenseitigen Lernens, fehlt der reinen Einzelraumsteuerung. Wenn auch, je nach Ausstattung der Aktoren und Sensoren, eine intelligente Raumsteuerung denkbar ist, so muss für ein Feedbacksystem auch eine Grundlage an Messdaten zur Verfügung stehen und entsprechend der Forderungen aus

Kapitel 4.4.3 aufbereitet und zurückgemeldet werden.



**Abbildung 4: Schema Einzelraumsteuerung (Wolff 2013:2)**

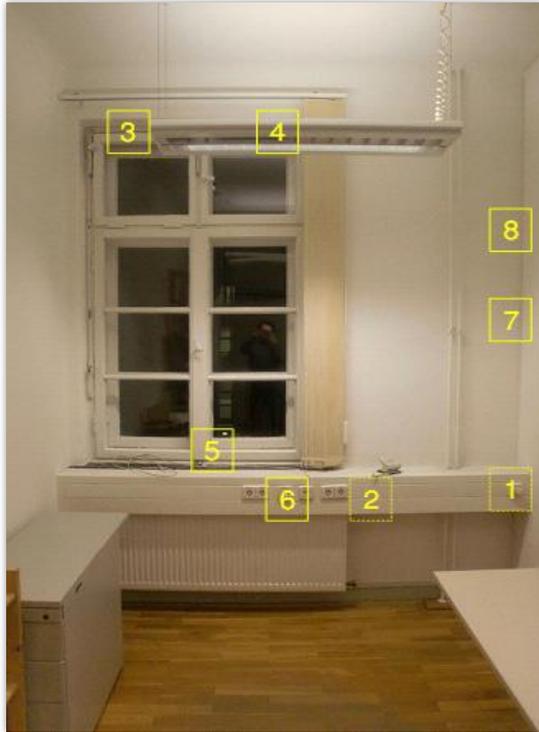
Das Schema einer *Einzelraumregelung* ist in Abbildung 4 dargestellt. Ziel der Einzelraumregelung ist es, die Differenz zwischen der von den Nutzer\*innen gewünschten Solltemperatur und der, von Druck, Vorlauftemperatur und der Witterung abhängigen Ist-Temperatur möglichst gering zu halten.

Die Messgenauigkeit der Sensoren liegt dabei zwischen 0,8-1 Kelvin (vgl. Wolff 2013:8). Gesteuert wird deshalb innerhalb des Raumes über die Regelungseinheit (RE) (vgl. ebd.:2). Die Anbindung der Einheit an das GLT-System ermöglicht nicht nur die Erfassung von relevanten Nutzungsdaten, sondern auch die zentrale Auswertung des Regelungsverhaltens.

Ein weiterer Vorteil der Einzelraumsteuerung ist die direkte Reaktion der Steuerungseinheit auf Veränderungen im Mikroklima des Raumes. So kann durch den Abgleich zwischen der Raum-Ist-Temperatur und der Raum-Soll-Temperatur direkt auf raumspezifische Veränderungen reagiert werden. Wie sensibel das System ist, hängt dabei wiederum von den Spezifikationen der Sensoren und Steuerungseinheiten ab.

#### **5.4 Ausstattung der Bestandsgebäude an der Leuphana Universität**

Mit welchen Sensoren die entsprechenden Werte zukünftig in den Bestandsgebäuden gemessen werden sollen, ist der Abbildung 5 zu entnehmen. Zu sehen ist ein Einzelbüro der Bestandsgebäude mit den vorgeschlagenen Orten für die Installation der Einzelraumsteuerung.



1. Raumcontroller
2. Elektrisches Stellventil 0-10V
3. Fensterkontakt Oberlicht links
4. Fensterkontakt Oberlicht rechts
5. Fensterkontakt Hauptfenster
6. Internetanschluss
7. Raumtemperaturfühler
8. Präsenzmelder

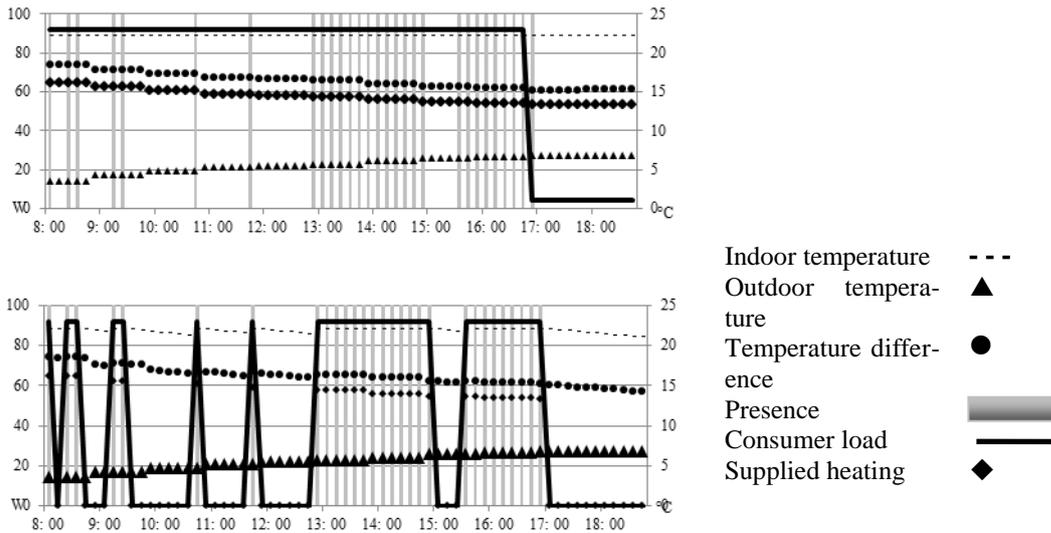
**Abbildung 5: Vorgesehene Einzelraumsteuerung  
in den Bestandsgebäuden der Leuphana Universität  
(Effertz 2013:24)**

Anhand einer solchen Installation ist es nicht nur möglich, Präsenzzeiten zu erfassen, sondern auch anhand der Fensterkontakte auf Erhöhungen der manuellen Luftwechsel zurückzuschließen.

Der direkte energetische Vorteil der Einzelraumsteuerung ergeht aus den Analysen des Einsparcontractors Cofely. So sind bereits durch die Anpassung der GLT an die Raumsteuerung bis zu 20% Einsparungen (siehe Kapitel 4.1) erreichbar.

### **5.5 Antizipierend optimierende Heizungsregelung**

Die Einsparungen im Rahmen einer Präsenzerfassung wurden in der Arbeit von WELGE/ KUJATH/ OPEL untersucht. Ein Blick auf die energetischen Anforderungen mit und ohne Präsenzerfassung für ein Büro mit geringer Anwesenheit, (beispielsweise einer halben Stelle) verdeutlicht die möglichen Einsparungen sofort (siehe Abbildung 6). Errechnet wurden für diesen einen Tag Einsparungen von 24% Wärmeenergie und 50% elektrische Energie (vgl. Welge et al.2010:6). Nur durch die An- und Abschaltung der elektronischen Komponenten und der Heizung in Abhängigkeit von der Präsenz könnten so 28% kombinierte Einsparungen ermöglicht werden (ebd.:6).



**Abbildung 6: Energiebedarfsvergleich Einzelbüro mit geringer Auslastung mit und ohne Assistenzsystem (vgl. Welge et al.2010:5f.)**

Werden entsprechend der Präsenzerfassung und der Raumbedingungen (wie Wärmeeinträge und Wärmesenken) Daten erfasst, kann unter der Nutzung eines Modells zum thermischen Verhalten des Gebäudes (beispielsweise Wärmespeicherfähigkeit) auch die Steuerung des Heizsystems optimiert werden.

Unter ähnlichen Prämissen wurde das Konzept des *modellprädikativen Heizungsreglers* entwickelt. Ziel ist es, innerhalb von Systemgrenzen (u.a. maximale Vorlauftemperatur, minimale Raumtemperatur), unter der Zunahme von Vorhersagewerten über den Wärmebedarf (Nutzung, Wetter), die Heizungsregelung mathematisch, entsprechend eines minimalen Energieverbrauchs, zu optimieren (vgl. Gruber et al. 2002:7f.). Genutzt werden dabei „lineare Gleichungen und Ungleichungen unter Minimierung einer linearen Zielfunktion“ (ebd.:9). Für eine direkte Übertragung wäre hier ein dynamisches Gebäudemodell notwendig. GRUBER ET AL. weisen bereits darauf hin, dass eine optimierte Heizungsteuerung, mit entsprechenden Systemgrenzen, ebenfalls sehr effizient sein kann. Die Erfassung von Verhaltensmustern und den Temperaturen kann entsprechend dabei helfen, Optimierungen für das Gebäudesystem abzuleiten.

Nicht nur eine Anpassung der GLT kann auf diese Weise stattfinden. Hinzu kommen weitere Einsparungsmöglichkeiten im Rahmen eines Feedbacksystems. Durch die erfassten Präsenzzeiten, die Erfassung der Fensteröffnungen und Rückmeldungen des Raumtemperaturfühlers, der einstellbaren Raumsolltemperatur (Raumcontroller) und der Stellung des elektrischen Stellventils können Verhaltensweisen erfasst werden. In

Kombination mit den Berechnungen entsprechend der DIN V 18599 können dann weitere Rückschlüsse auf Einsparpotentiale durch die Nutzer\*innen identifiziert werden. Damit diese Rückschlüsse ein dem Verhalten entsprechendes Feedback ermöglichen, bedarf es jedoch auch einer entsprechenden Auflösung bezüglich der Messgenauigkeit und der zeitlichen Auflösung der Messabstände. Weiter muss eine Möglichkeit gefunden werden, den Mehrbedarf durch das Verhalten vom Grundbedarf, der in Abhängigkeit zum Gebäude steht, zu trennen.

## 6 Synthese Kapitel 3 & 4

Die für den Einsatz von Interventionsmaßnahmen wichtigste Eigenschaft eines solchen Systems ist die Möglichkeit der Interaktion. Die Nutzer\*innen können in einem intelligenten System nicht nur ihre Bedürfnisse formulieren, sie können auch ein Feedback zu ihrem Verhalten bekommen. Als Schnittstelle wird hier entsprechend Kapitel 4.3 ein den Nutzer\*innen zugeordnetes digitales Medium empfohlen (Laptop, PC, Smartphone).

In der Abbildung 3 mit *Web* als Ziel der Datenextraktion bezeichnet, stehen somit einzelne Nutzer\*innen, die über das Web einen Zugang zu ihren aufbereiteten Verbrauchsdaten bekommen. Welchen Einfluss die Nutzer\*innen auf den Energiebedarf eines solchen Systems haben können, ist bereits in Kapitel 4.1 beschrieben.

Um den Nutzer\*innen ein Feedback, entsprechend der in Kapitel 4.3 dargestellten Interventionsmaßnahmen, geben zu können, gibt es zwei Möglichkeiten zur Feststellung des Verhaltens. Die eine entspricht der Nutzung ausgefeilter Sensornetze, wie es für das Audimax geplant ist. Die andere besteht darin, anhand der Auswertungen weniger Sensoren in Kombination mit raumspezifischen Zuordnungen von Grundverbräuchen auf das Verhalten der Einzelnen rückschließen zu können.

Der Vorteil der ersten Variante liegt darin, eine sehr detailgetreue, zeitlich hochaufgelöste Darstellung über das Verhalten innerhalb einzelner Räume geben zu können. Damit einher geht jedoch die notwendige Verfügbarkeit vieler Sensoren.

Die zweite Variante ist gegenüber der Ersten deutlich preisgünstiger. Sie benötigt weniger Sensoren, führt damit jedoch auch zu einer Reduktion der verhaltensabhängigen Daten.

## **7 Energetische Bewertung anhand der DIN V 18599**

Im Folgenden wird dargestellt, wie aus den für die Bestandsgebäude zur Verfügung stehenden Messdaten Aussagen über das Nutzungsverhalten getroffen werden können. Genutzt wird dafür die Berechnung entsprechend der DIN V18599 für den Energiebedarf von Gebäuden. Ziel ist es verbrauchsbezogene Daten zu extrahieren und auf diese Weise Sensoren zu ersetzen und ein Feedback zu ermöglichen.

### **7.1 Was ist die DIN V 18599?**

Eine Energiebilanz entsprechend der DIN V 18599 beruht auf genormten Annahmen über verschiedene Variablen. Ziel ist die Beurteilung der gesamten Energieeffizienz und des Energiebedarfs eines betrachteten Gebäudes (vgl. DIN<sup>1</sup> 2011:5). Die DIN V 18599 stellt ein anerkanntes Verfahren dar, um den Energiebedarf von Gebäuden entsprechend der Energieeinsparverordnung von 2009 (EnEV 2009) zu berechnen. Sie dient damit dem energetischen Bedarfsvergleich von Wohn- und Nichtwohngebäuden. Diese können dann entsprechend ihres Energiebedarfs pro Quadratmeter und Jahr beurteilt und verglichen werden.

Verglichen werden sie untereinander oder aber auch mit Referenzgebäuden entsprechend der aktuellen Vorgaben seitens des Gesetzes. Die gesamte Beurteilung der DIN V18599 setzt sich zusammen aus 11 Komponenten, die in Abbildung 7 grafisch dargestellt werden.

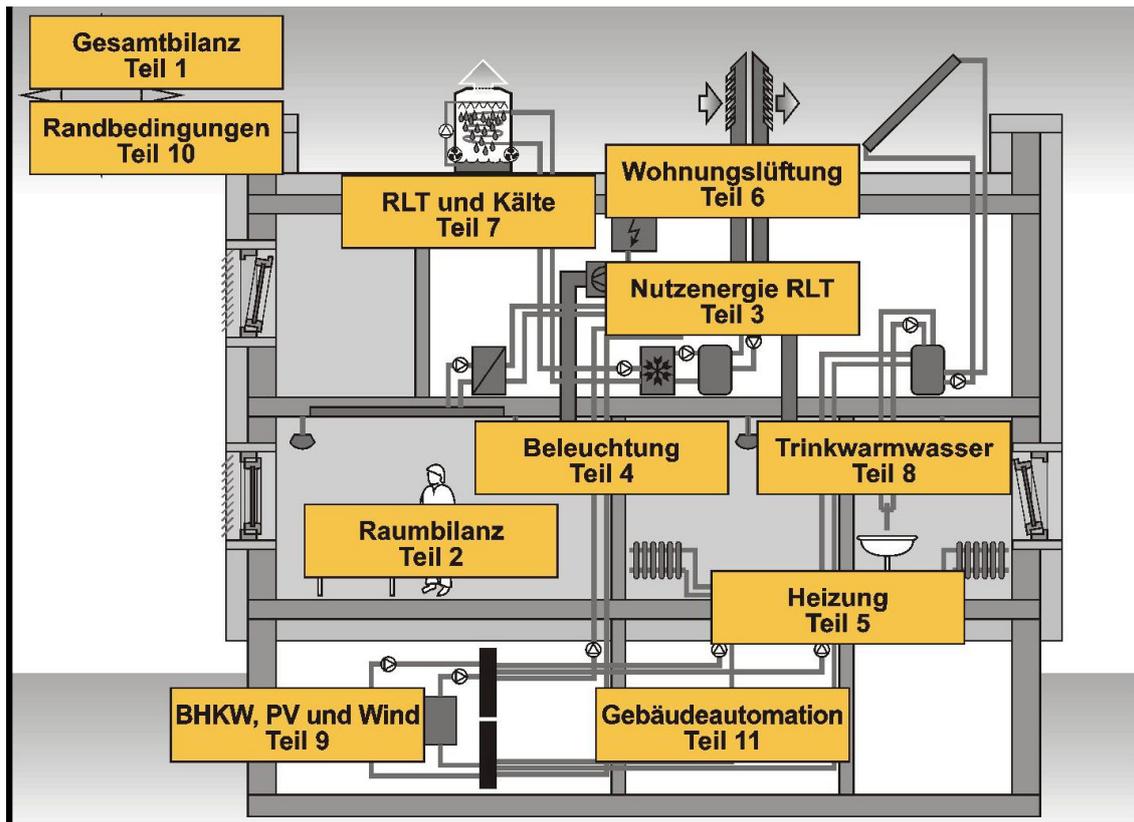


Abbildung 7: Komponenten der DIN V 18599 (DIN<sup>1</sup> 2011:8)

Berücksichtigt werden die Wechselwirkungen von Baukörper, der Nutzung des Gebäudes und der Anlagentechnik in einem integralen Ansatz (vgl. ebd:8). Die berücksichtigten Komponenten der Bilanzierung sind Energieaufwendungen für Heizung, Lüftung, Klimatisierung, Trinkwarmwasserversorgung, Beleuchtung sowie die Aufwendung von Hilfsenergien. Die Rahmenbedingungen sind dabei entsprechend der Nutzungsformen, Wohn- bzw. Nichtwohngebäude, unterschiedlich (vgl. DIN<sup>1</sup> 2011:9).

## 7.2 Fokus der Betrachtungen der DIN V 18599

Welche Rolle spielt das Nutzungsverhalten im Rahmen der DIN V 18599? Bei der Betrachtung der Abbildung 7 wird schnell klar, dass es viele Teilberechnungen gibt, in die der Nutzungsbedarf im Rahmen der Energiebedarfsberechnung mit einfließt (siehe Kapitel 7.6).

Dass diese, bezüglich ihrer Planungssicherheit jedoch unterschiedlich zu gewichten sind, zeigen die Kapitel 3.2 & 4.1. Wie die Berechnung trotz der Unsicherheiten genutzt werden kann, wird in Kapitel 7.3 aufgezeigt. Der Fokus der Arbeit liegt auf der Erfassung und der Extraktion des Nutzungsverhaltens und seinem Einfluss auf die

gesamte energetische Bilanzierung entsprechend der DIN V 18599-10.

Da die Verhaltenswerte sehr häufig in die Bilanzierung mit einfließen, kann auf diese Interdependenzen nur anhand von Beispielen verwiesen werden. Berücksichtigt werden sie jedoch trotzdem in der Simulation der verwendeten Software. Eine schriftliche Darstellung aller Nutzungsvariablen aus der kompletten DIN V 18599 wäre nicht dem Rahmen der Arbeit entsprechend und auch nicht zielführend. Da die Arbeit sich der Aufgabe der Relevanz bezogenen Variablen-Extraktion annimmt, also das Ziel verfolgt, die relevanten Variablen zu identifizieren, müssen die Variablen kritisch betrachtet und entsprechend auf ihren Einfluss bezüglich der Berechnung überprüft werden. Da der Rechenumfang und die Komplexität der gegenseitigen Verweise über die einzelnen Teile der DIN V 18599 hinweg unverhältnismäßig zunimmt, wird für die Berechnungen ein Softwareprogramm genutzt. Eine Möglichkeit den Einfluss des Nutzungsverhaltens aus den Verbrauchswerten zu extrahieren, stellt die Nutzung des Softwarepaketes der Firma Hottgenroth dar (Kapitel 8).

### **7.3 Die DIN V 18599 – als Grundlage zur Berechnung der virtuellen Sensoren**

Bisher ist die Wärmeverteilung den einzelnen Gebäuden, nicht jedoch einzelnen Instituten, Fluren oder gar einzelnen Nutzer\*innen zuzuordnen. Im Rahmen der energetischen Sanierung ist jedoch eine Einzelraumsteuerung für die Temperatur vorgesehen (siehe Abbildung 5). Dementsprechend stehen zukünftig für die Bestandsgebäude der Leuphana Universität die Gesamtmenge der abgenommenen Wärmeenergie (je Gebäude), die jeweiligen Raumtemperaturen und die Aktorenstellungen (Thermostatstellungen) zur Verfügung. Was dennoch für ein Feedbacksystem fehlt, sind die abgenommenen Wärmemengen der einzelnen Räume. Eine Erhöhung der Auflösung kann deshalb nur durch einen Mix von realen und virtuellen Sensoren erfolgen.

Unter virtuellen Sensoren ist in diesem Zusammenhang zu verstehen, dass die Werte, die nicht vorhanden sind, aus Berechnungen entnommen werden müssen.

Da die Wärmeanforderungen eines Raumes jedoch zur Verfügung stehen, kann bei bekanntem Grundverbrauch und dem Wissen über entsprechende Verbräuche bei unterschiedlichem Nutzungsverhalten ein Rückschluss auf die Wärmeabnahme für dazwischen liegende Verhalten getroffen werden. Um solche Rückschlüsse treffen zu können, muss jedoch der Einfluss unterschiedlicher Nutzungsverhalten berechnet

werden. Eine Berechnung zur Feststellung des theoretischen Energieverbrauchs und der nutzungsabhängigen Verbräuche stellt die Berechnung entsprechend der DIN V 18599 dar. Sie ermöglicht es, die Grundlast eines Gebäudes theoretisch zu ermitteln und die Verbräuche weiter aufzuschlüsseln.

Unterschiedliche Einstellungen zum Verhalten der Nutzer\*innen (Beschreibung der Zonen siehe Kapitel 7.5) helfen dabei, die Auswirkungen des nutzungsspezifischen Verhaltens auf den Verbrauch eines einzelnen Raumes aufzuzeigen (vgl. Kapitel 8). Berücksichtigt werden dabei die nach DIN V 18599 zu erfassenden Gebäudedaten sowie modifizierte, also von der Norm abweichende, Daten zum nutzungsspezifischen Verhalten.

#### 7.4 Auflösung der Berechnungszeiträume

Bevor jedoch die Nutzungsdaten der Berechnungen betrachtet werden, wird skizziert dargestellt, warum bereits durch die Standardberechnung Ungenauigkeiten auftreten und wie diese im Rahmen eines differenzierteren Feedbacks aufgelöst werden können. Die Bilanzierung des Jahresheizwärmebedarfs nach der DIN V 18599-2 erfolgt aus der Summe  $Q_{mth}$ , also den Monatsbilanzen (vgl. DIN<sup>1</sup> 2011:26). Siehe dazu folgende Berechnungsformel (ebd.):

$$Q_{h,b,a} = \sum_{j=1}^{12} Q_{mth}$$

Bei der Bedarfsberechnung für den Monat wird der Heizwärmebedarf ( $Q_{h,b}$ ) entsprechend der Tage zusammengefasst, an denen die Nutzung übereinstimmt. Ziel dieser Differenzierung ist die Berücksichtigung von Wochenenden oder anderen Zeiten mit abgesenktem Temperaturniveau (vgl. DIN<sup>2</sup> 2011:25ff.). Dementsprechend wird die Anzahl der Tage eines Monats mit gleichem Nutzungsniveau multipliziert mit dem zugehörigen Wärmebedarf ( $Q_{h,b,nutz}$  oder  $Q_{h,b,we}$ ). Addiert ergibt sich entsprechend der monatliche Wärmebedarf (vgl. DIN<sup>2</sup> 2011:26).

$$Q_{h,b,mth} = d_{nutz} Q_{h,b,nutz} + d_{we} Q_{h,b,we}$$

Genau an dieser Stelle gilt es von der Norm abzuweichen, denn das Ziel der Arbeit ist nicht die Projektion des Jahresbedarfs, sondern die möglichst genaue Ermittlung des täglichen oder monatlichen Verbrauchs im Detail.

Abweichungen an den einzelnen Tagen können hier, außer durch die Nutzung, auch durch Unterschiede der äußeren Temperaturdifferenzen auftreten (siehe Kapitel 7.6.1). Auch diese weitere Vereinfachung der Norm führt zu Ungenauigkeiten bezüglich des täglichen Verbrauchs. Vorgeschlagen wird deshalb folgende Modifikation der Berechnung des monatlichen Heizenergiebedarfs:

$$Q_{h,b,mth} = \sum_{\text{day}}^{mth} Q_{h,b,\text{day}}$$

Anstatt also ähnliche Tage, wie zwischen Werktagen und Wochenenden zu unterscheiden, mit Durchschnitts zu rechnen und diese auf den Monat hoch zu multiplizieren, muss hier mit der Summe aus den täglich errechneten Einzelverbräuchen gearbeitet werden. Nur so kann ein wirklich verbrauchsbezogenes Tages- oder Monatsfeedback erstellt werden.

## 7.5 Wärmequellen und Wärmesenken

Eine *Zone* beschreibt einen Gebäudeteil, der sich durch gleiche Nutzung (z.B.: Einzelbüro, Flur) sowie durch gleiche Konditionierungen auszeichnet und mehrere Räume beinhalten kann. Da die Zonen die kleinsten, auf das Nutzungsverhalten bezogenen, Berechnungseinheiten der DIN V 18599 darstellen, muss für ein raumspezifisches Feedback eine Nutzungszone für jeden einzelnen Raum angelegt werden.

Gleiche *Konditionierungen* bedeuten, bezogen auf den Heizwärmebedarf einer Zone, dass die gegenüberzustellenden Wärmequellen und Wärmesenken jeweils gleich sind (vgl. ebd:25). Der *Heizwärmebedarf* eines Tages ( $Q_{h,b,\text{day}}$ ) setzt sich zusammen aus den Summen der Wärmesenken ( $Q_{\text{sink}}$ ; Kälteeinträge, Wärmeverluste) abzüglich der Wärmequellen ( $Q_{\text{source}}$ ; Wärmeeinträge, Wärmegewinne) multipliziert mit dem Ausnutzungsgrad der Wärmequellen ( $\eta$ ) und der aus den Bauteilen entspeicherten Wärme ( $\Delta Q_{c,b}$ ) nach DIN 18599-2:2011-12:

$$Q_{h,b} = Q_{\text{sink}} - \eta * Q_{\text{source}} - \Delta Q_{c,b}$$

Die nachfolgend aufgeführten Wärmequellen und Wärmesenken werden nach DIN<sup>2</sup> mit in die Energiebilanz einbezogen (DIN<sup>2</sup> 2011:22):

- Transmissionswärmesenken oder –wärmequellen

- Lüftungsbezogene Wärmesenken oder –quellen: Besonders nutzungsabhängig, da neben der Infiltration (Luftaustausch durch Undichtigkeiten und Öffnungen) insbesondere die manuelle Fensterlüftung im Rahmen der Bestandsgebäude eine große Rolle spielt (vgl. Kapitel 8.4)
- Lüftungswärmesenke und –wärmequellen durch Lüftungsanlagen (insbesondere Gebäude 13 ist hier durch die Abluftanlagen betroffen)
- Solare Wärmeeinträge durch transparente Bauteile
- Wärmeabstrahlung und Wärmeabsorption nicht transparenter Bauteile
- Interne Wärme- oder Kältequellen durch den Betrieb von Geräten, künstliche Beleuchtung, Körperwärme, den Ein- oder Austrag von Materialien, die Durchleitung von Wärme- oder Kältemitteln durch Verteilleitungen oder Luftkanäle
- Wärmeeinspeicherung und Wärmeabgabe durch die Raumumschließungsflächen in Abhängigkeit von der Innentemperatur

Besonders hervorzuheben sind an dieser Stelle die Abhängigkeiten von der manuellen Fensterlüftung sowie die Wärmeeinträge in Abhängigkeit von betriebenen Geräten, der künstlichen Beleuchtung und den Personen. Wichtig sind diese Faktoren, da sie erstens nutzungsabhängig sind und zweitens, da sie schnell einen großen Einfluss auf die Innentemperatur nehmen können.

## 7.6 Bilanz-Innentemperatur und die Einflussfaktoren

Bei einer vorhandenen Einzelraumregelung ist bei allen Berechnungen die jeweilige *Bilanz-Innentemperatur* ( $\theta_i$ ) anzupassen. Sie „ist die für die Bilanzierung maßgebliche Temperatur“ (DIN<sup>2</sup> 2011:37). „Sie ist jeweils für jeden Monat als Mittelwert zu setzen“ (ebd.). Die Bilanz-Innentemperatur ist für die Berechnung entsprechend der EnEV 2009 in der DIN V 18599-10 hinterlegt (siehe zum Beispiel Einzelbüro = 21°C in DIN<sup>10</sup> (2011:33). Warum es so wichtig ist, diese Temperatur als Messwert in die Bedarfsberechnung mit einfließen zu lassen, zeigt sich bei der Auflösung der Berechnungsformeln. Die Berechnung ist dabei immer wieder abhängig von fixen und von verhaltensabhängigen Variablen. Fallabhängige Standardwerte wie Nachtabenkung oder Ferienzeiten werden in der DIN<sup>10</sup> ebenfalls berücksichtigt, auch diese Werte sollten als variable Werte eingebunden werden.

Da die Bilanz-Innentemperatur so zentral für die Berechnungen ist, werden die ihr zugrunde zulegenden Berechnungen folgend aufgelöst und die relevanten Messwerte für ein Feedbacksystem herausgearbeitet. Die Formeln entsprechen dabei den Vorlagen der DIN<sup>2</sup> (2011:39ff.):

$$\Theta_{i,h} = \max \left[ \Theta_{i,h,soll} + \Theta_{EMS} - f_{NA} (\Theta_{i,h,soll} - \Theta_e), \Theta_{i,h,soll} - \Delta\Theta_{i,NA} \frac{t_{NA}}{24h} \right]$$

1.  $f_{NA}$  = Korrekturfaktor für eingeschränkten Heizbetrieb (während der Nacht)
2.  $\Theta_{i,h,soll}$  = Die mittlere Soll-Innentemperatur
3.  $\Theta_e$  = Der Monatsmittelwert der Außentemperatur
4.  $\Delta\Theta_{i,NA}$  = Die zulässige Absenkung der Innentemperatur (DIN V 18599-10) für den reduzierten Betrieb
5.  $t_{NA}$  = Tägliche Dauer im reduzierten Heizbetrieb ( $t_{NA} = 24h - t_{h,op,d}$  ;  $t_{h,op,d}$  = tgl. Betriebsdauer der Heizung nach DIN V 18599-10 incl. Aufheizbetrieb).
6.  $\Delta\Theta_{EMS} = -0,5$  = Summand zur Berücksichtigung der Gebäudeautomation nach DIN V 18599-10

### 7.6.1 Bilanz-Innentemperatur - Aufschlüsselung der Variablen

zu 1. Der Korrekturfaktor für eingeschränkten Heizbetrieb im Falle der Bestandsgebäude ist, entsprechend Formel (28) der DIN 18599-2, für den abgesenkten Betrieb zu berechnen (DIN<sup>2</sup> 2011:39):

$$f_{NA} = 0,13 \frac{t_{NA}}{24h} \exp\left(-\frac{\tau}{250h}\right) * f_{adapt}$$

$f_{adapt} = 1,35$  = Faktor für adaptiven Betrieb (Gebäudeautomation) nach DIN V 18599-10 (DIN<sup>10</sup> 2011:33). Da aus der Norm nicht hervorgeht, wie dieser Faktor entsteht, muss er an dieser Stelle so übernommen werden. Im Rahmen einer Nutzung dieses Verfahrens muss er jedoch weiter überprüft und unter Umständen angepasst werden.

$\tau$  [h] = Zeitkonstante der Gebäudezone nach 6.7.2 DIN2. Beschrieben wird damit „der Zeitverlauf, in dem ein Gebäude auskühlt oder sich aufheizen lässt“ (Grote 2013). In Abhängigkeit dieser Konstante lässt sich berechnen, welche Dauer und welche Absenkttemperatur energetisch sinnvoll sind

(siehe weiterführend „zu 3.“ und HOK 2012). Mit dieser Konstante lässt sich auch erklären, warum in der Untersuchung von Welge et al. bei der kompletten Abschaltung der Heizunterstützung für mehrere Stunden, die Raumtemperatur in den Räumen nicht unter 21°C gefallen ist (siehe Welge et al. 2010:6).

$$\tau = \frac{C_{\text{wirk}}}{H} = \frac{C_{\text{wirk}}}{\sum_j H_{T,j} * F_x + \sum_j H_{V,k} + H_{V,\text{mech},\vartheta}}$$

$C_{\text{wirk}}$  = wirksame Speicherfähigkeit

$H$  = Wärmetransportkoeffizient der Zone (=Wärmetransferkoeffizienten Transmission + Lüftung)

$\sum_j H_{T,j}$  = Summe der Transmissionswärmekoeffizienten nach 6.2. DIN2

$F_x$  = = 1 für Transmission über Außenbauteile/ Erdreich  
= 0,5 für alle anderen Bauteile

$H_{V,\text{mech},\vartheta}$  Wird ohne eine raumluftechnische Anlage nicht berücksichtigt (DIN<sup>2</sup> 2011:58f.)

$\sum_k H_{V,k}$  = Summe Lüftungswärmetransferkoeffizienten der mit der Außentemperatur eingehenden Luftströme (DIN<sup>2</sup>:2011:84)

➤ **Infiltration:**  $H_{V,\text{inf}} = n_{\text{inf}} * V * c_{p,a} * \rho_a$   
(siehe: ebd:51)

- $V$  = Nettoraumvolumen;
- $c_{p,a}$ : spez. Wärmekapazität Luft;
- $\rho_a$  = Dichte Luft;
- $c_{p,a} * \rho_a = 0,34 \text{ Wh/m}^3 * \text{K}$
- $n_{\text{inf}}$  = Tagesmittelwert Infiltrationsluftwechsel ohne mechanische Lüftung

$$n_{\text{inf}} = n_{50} * e * f_{\text{ATD}} = 4 \text{h}^{-1} * 0,07 * 1 = 0,28 \text{h}^{-1}$$

-  $n_{50} = 4 \text{h}^{-1}$  = Luftwechsel pro Stunde bei 50Pa Luftdifferenz (Tabelle6/ Kategorie:2 ebd.:53). Dieser Wert lässt sich durch Abdrücken des Gebäudes feststellen.

-  $e = 0,07$  Volumenstromkoeffizient-Standardwert nach DIN EN ISO 13789: gemäßigte Abschirmung von mehr als einer dem Wind ausgesetzte Fassade (ebd.:53) – Auch die Herleitung dieses Wertes ist nicht transparent und muss überprüft werden.

-  $f_{\text{ATD}} = 1$  = Faktor bei nicht vorhandenen Außenluftdurchlässen (ebd.)

➤ **Fensterlüftung** (vgl. DIN<sup>2</sup> 2011:54ff.):

$$H_{V,\text{win}} = n_{\text{win}} * V * c_{p,a} * \rho_a$$

$$* = 0,385 \text{h}^{-1} * 59,12 \text{m}^3 * 0,34 \text{Wh/m}^3 \text{K}$$

$$* H_{V,\text{win}} = 7,74 \text{WK}^{-1}$$

\* Diese Werte sind teilweise entsprechend den Werten der DIN V 18599-10 zusammen mit denen für ein Einzelbüro des Bestandsgebäudes 12.226. Sie dienen ausschließlich der besseren Nachvollziehbarkeit und müssten für eine Berechnung, entsprechend der Vermerke, angepasst und übertragen werden.

- $V * c_{p,a} * \rho_a = \text{s.o.}$

- $n_{win}$  = mittlere tägliche Fensterluftwechsel  
 $= n_{win,min} + \Delta n_{win} \frac{t_{nutz}}{24h}$
  - $= 0h^{-1} + 0,84h^{-1} * \frac{11h}{24h}$
  - $n_{win} = 0,385 h^{-1}$
  - $n_{win,min} = 0$  = Fensterluftwechsel in Abhängigkeit vom Außenluftdurchlass – da keiner vorhanden ist = 0 (DIN2 2011:55)
  - $t_{nutz} = 11h$  tgl. Nutzungsdauer nach DIN V 18599-10- muss ebenfalls an Realzeiten angepasst werden. Eine, im wissenschaftlichen Betrieb nicht unübliche, ½ Stelle würde nur die Hälfte der Zeit präsent sein. Weiter können auch nicht bürobezogene Aufgaben der Mitarbeiter\*innen im universitären Betrieb zu Abwesenheiten führen: zum Beispiel Lehre, Laborarbeit oder Termine außerhalb des Büros. Deshalb ist es für ein nutzungsspezifisches Feedback notwendig, diesen Standardwert mit dem Realwert abzugleichen. Ermöglicht wird dies im Bestandsgebäude durch die Installation von Präsenzmeldern (Effertz 2013:1).
  - $\Delta n_{win}$  in Abhängigkeit von  $n_{nutz} = \frac{\dot{V}_A * A_B}{V}$  [ $\geq / < 1,2h^{-1}$ ]
  - $n_{nutz}$  = Nutzerbedingter Fensterluftwechsel  
 $= 1,22 h^{-1}$  bei angegebenen Werten  $\geq 1,2h^{-1}$
  - $\dot{V}_A$  = flächenbezogener Mindestaußenvolumenstrom  
in  $m^3/(hm^2)$  – nutzungsabhängig  
alternativ: vorgegeben in der DIN<sup>1</sup> (2011:33)  
 $= 4 m^3/(hm^2)$ :
    - Da ein ausreichender Luftwechsel mit einem Temperaturabfall außerhalb des angenehmen Bereiches verbunden ist (Fitzner/Finke 2012:66), ist anzunehmen, dass diese Luftwechselrate zu hoch ist (vgl. Fitzner/Finke 2012:10; Kapitel 7.7.2) oder dem Temperaturabfall durch weiteres Heizen während des Lüftens entgegengewirkt wird.
    - $A_B$  = Bezugsfläche der Gebäudezone in  $m^2$  (18,08 $m^2$  (Geb.12.226) (vgl. Strietzel 2011:1)
    - $V$  = Nettovolumen in  $m^3$  (18,08 $m^2$ \*3,27m = 59,12 $m^3$  (Geb.12.226) (vgl. ebd.)
- $$\Delta n_{win} = \max[0; n_{nutz} - n_{inf} - 0,1h^{-1}]$$
- $$= \max[0; 1,22h^{-1} - 0,28h^{-1} - 0,1h^{-1}]$$
- $$= \max[0; 0,84h^{-1}]$$
- $$\Delta n_{win} = 0,84 h^{-1}$$

zu 2. Die mittlere Soll-Innentemperatur nach DIN V 18599-10 im normalen Heizbetrieb beträgt 21°C. Da es sich auch hier um einen für den Monat gemittelten

Wert handelt und um eine bedarfsabhängige Variable handelt, muss auch diese immer wieder neu gesetzt werden.

zu 3. Da die Schwankung innerhalb eines Monats ziemlich groß sein kann und die energetische Anforderung mit einer steigenden Differenz zwischen der Rauminnentemperatur und der Außentemperatur zunimmt, ist der Monatsmittelwert ebenso auf den möglichst kleinen Berechnungszeitraum zu reduzieren. NIESCHHKAUER zeigte wie der nutzungsabhängige Energiebedarf mit jedem Grad der mittleren Tagestemperatur im Winterhalbjahr zunimmt (vgl. Nieschkauer 2005:33).

zu 4. Sofern eine Temperaturabsenkung genutzt wird, ist sie zur Erlangung einer möglichst genauen Auflösung zu berechnen. Eine kritische Betrachtung über den Sinn, die Dauer und den Zeitraum von geplanten Temperaturabsenkungen ist bei u.a. Hok zu finden. Nach Hok muss die, durch die Absenkung eingesparte Energie, morgens beim Wiederaufheizen der ausgekühlten Bauteile im Quadrat neu zugeführt werden (weiterführend Hok 2012). Dem schließt sich auch FISCHER mit Einsparungen von 10% und mehr bei einem gleichbleibenden Temperaturbetrieb an. Er begründet die Energieeinsparungen weiterführend damit, dass die Wände durch die konsequente Wärmezufuhr trockener und damit auch weniger wärmeleitend sind. Er beruft sich dabei auf eine Zusammenstellung verschiedener Praxisberichte (vgl. Fischer 2013).

zu 5. Da auch hier die Dauer der Absenkung von den Anforderungen der Nutzer\*innen abhängt, muss dieser Wert ebenfalls anhand von Messungen festgestellt und angepasst werden.

zu 6.  $\Delta\Theta_{EMS}$  als Summand zur Berücksichtigung der Gebäudeautomation, bezieht sich auf die Klassifizierung nach Ausbaustufen der Gebäudeautomation (GA) bzw. des technischen Gebäudemanagements (TGM).

Unterschieden werden nach RIS, die Klassen A-D, wobei D für Gebäude ohne Gebäudeautomation und A für Gebäude mit einer hocheffizienten GA (Abstimmen des Gesamtsystems auf Anforderungen) und TGM (Feedbacksystem) steht.

Während die Klassifizierung C für ein Standard-GA-System steht, fällt der nach der Modernisierung vorhandene Standard an der Leuphana Universität unter die Klasse B. B beinhaltet außer dem weiterentwickelten GA-System auch TGM-Funktionen. So müssen Raumregleinrichtungen in der Lage sein, mit dem GA-System zu kommunizieren (vgl. Ris 2009:52ff.).

### **7.6.2 Notwendige Nutzungsdaten für die Berechnung der Bilanz-Innentemperatur**

Um die Bilanz-Innentemperatur berechnen zu können, sollten somit entsprechend Kapitel 7.6 mindestens die folgenden Daten der GLT entnommen werden können:

- $n_{\text{win}}$  = mittlerer täglicher Fensterluftwechsel (indirekt abhängig siehe oben)  
Die Feststellung der Fensterluftwechsel kann nur über die Fensterkontakte erfolgen. Obwohl für jedes Element, das zu öffnen ist, ein einzelner Kontaktsensor geplant ist, wird die Messung der Luftwechsel eher eine Annäherung als ein messbarer Wert.
- $t_{\text{nutz}}$  = die Dauer der täglichen Nutzung
- $t_{\text{NA}}$  = die tägliche Dauer im reduzierten Heizbetrieb
- $\Theta_{\text{i,soll}}$  = die mittlere Soll-Innentemperatur
- $\Theta_{\text{e}}$  = der (Monats-)mittelwert der Außentemperatur

Um eine nicht gemittelte Rückmeldung über einen Tag geben zu können, müssen gemittelte Werte auf eben diese Realwerte geändert werden. Welche weiteren Werte standardisiert sind und welche von denen nutzungsbezogen und der GLT zu entnehmen sind, beschreibt das nächste Kapitel.

### **7.7 Anpassungen der DIN V 18599-10 –Nutzerverhalten an die Nutzung der Büros Leuphana Universität**

Eine Gesamtübersicht über die Raumkonditionen für ein Einzelraumbüro entsprechend der DIN<sup>10</sup> (2011:33) ist unter Anhang A komplett hinterlegt. In der DIN V 18599-2 wird jedoch eine Anpassung der Berechnungen bezüglich der Transmissions- und Lüftungswärmequellen und –senken, den berücksichtigten inneren und äußeren Temperaturen und dem Einfluss durch die Nutzer\*innen zu Zwecken einer Energieberatung empfohlen (DIN<sup>2</sup> 2011:23).

Eben diese Anpassungen sind es auch, die für ein Feedback notwendig sind.

Da für ein spezifisches Feedback auch spezifische Daten vorhanden sein müssen, soll in diesem Teil aufgezeigt werden, welche Daten notwendig und welche durch die Sanierung der Bestandsgebäude verfügbar sind bzw. verfügbar werden.

Inwieweit die Raumregelung dabei seitens der Nutzer\*in oder der Raumsteuerung passiert, ist für die Berechnung des Verbrauchs nicht relevant. Für ein individuelles Feedback sollte jedoch zwischen beiden Optionen differenziert werden, damit Einsparpotentiale aufgezeigt werden können. Ist die Schließung der Heizung bei

Fensteröffnung automatisiert, ist diese Einsparung nicht den Nutzer\*innen zuzuschreiben. Die Taktung der Fensteröffnungen wiederum sollte in einem Verhältnis zur empfohlenen Luftwechselrate stehen und den Nutzer\*innen zugeschrieben werden können.

### 7.7.1 Nutzungszeiten

Einer der größten Einsparfaktoren ist die Anpassung der Raumsteuerung an die tatsächlichen Nutzungszeiten (siehe Kapitel 5.4). Hierbei zeigt sich bereits, wie stark die Realwerte bereits von den Differenzen zwischen realem Verbrauch und Nutzungsverhalten abweichen. Die Messungen des Büros mit geringer Auslastung von Welge et al. erreichten gerade mal um die 5h täglicher Nutzung (siehe Abbildung 6).

Nutzungszeiten		von	bis
tägliche Nutzungszeit	Uhr	7:00	18:00
jährliche Nutzungstage $d_{\text{nutz,a}}$	d/a	250	
jährliche Nutzungsstunden zur Tagzeit $t_{\text{Tag}}$	h/a	2543	
jährliche Nutzungsstunden zur Nachtzeit $t_{\text{Nacht}}$	h/a	207	
tägliche Betriebszeit RLT und Kühlung	Uhr	5:00	18:00
jährliche Betriebstage für jeweils RLT, Kühlung und Heizung $d_{\text{op,a}}$	d/a	250	
tägliche Betriebszeit Heizung	Uhr	5:00	18:00

**Abbildung 8: Nutzungszeiten Einzelbüro nach DIN<sup>10</sup> (2011:33)**

Gleiches gilt für die Arbeitstage pro Jahr. Auch hier zeigt sich die Auslegung der Berechnung auf ein Standard-Büro in einem Unternehmen mit Fünftagewoche. Die Berechnung der jährlichen Arbeitstage inklusive der Berücksichtigung der Feiertage ergibt 249,7 im Durchschnitt pro Jahr (Statistisches Bundesamt 2013). Die Arbeitstage nach Kalender für Niedersachsen in den Jahren 2013 und 2014 betragen 252 Tage (Schulz 2013). Das bedeutet eine Berücksichtigung von nur zwei Tagen Abwesenheit pro Jahr. In dieser Rechnung nicht berücksichtigt sind Abwesenheiten durch Urlaub, krankheitsbedingte Abwesenheiten von 8-13 Tagen pro Jahr (Zeitraum 1991-2011 Statistisches Bundesamt 2012).

Im Jahr 2011-2012 sind die krankheitsbedingten Fehltage noch einmal auf 12,5 Tage bei Männern und 13,5 Tage bei Frauen gestiegen (Frenner et al. 2013). Hinzu kommen weiter Abwesenheiten im Rahmen von externen Veranstaltungen (Kongresse usw.), Lehrveranstaltungen, Forschung außerhalb des Büros (Feld, Labor) oder Heimarbeit (insbesondere in den Semesterferien). Werden zumindest 4 Wochen bzw. 28 Tage Jahresurlaub und 10 Tage krankheitsbedingte Abwesenheit berücksichtigt, müssen von

den 250 Tagen weitere 38 Tage abgezogen werden und es verbleiben noch 212, die als Berechnungsgrundlage in Kapitel 8 als Grundwert angenommen werden. Es sei darauf verwiesen, dass auch hier durch die Präsenzerfassung ein genauer Wert bestimmt werden müsste.

Unter Berücksichtigung all dieser Minderungsfaktoren und der Betrachtung eines Einzelbüros mit einer Person mit 8 Stunden Arbeitszeit, scheint auch eine tägliche Betriebszeit der Heizung von 5 Uhr-18 Uhr weit über den realen Bedarf hinauszugehen.

Die Möglichkeit den Heizungsverlauf aufgrund von Rückkopplung mit der Datenbank (mystudy) zu antizipieren, beinhaltet noch weiteres Einsparpotential.

Je früher die Absicht einer Raumnutzung erkennbar ist, desto langsamer kann diesem die Wärme zugeführt werden (siehe auch Frage der Nachtabsenkung unter dem Stichpunkt „zu 4.“ Kapitel 6.6.1). Die langsamere Wärmezuführung bedeutet, dass die Vorlauftemperatur ebenfalls geringer sein kann. Dementsprechend ist es möglich, auf große Wärmeanforderungen, wie morgens zwischen 8:00 Uhr und 10 Uhr, frühzeitig zu reagieren. Es kann dann mit einer längeren, aber geringeren Anhebung der Vorlauftemperatur die gleiche Raumtemperatur erreicht werden. Eine Absenkung der Vorlauftemperatur und die, mit einer besseren Ausnutzung der Wärme einhergehende, Senkung der Rücklauftemperatur führen wiederum zu erheblichen Senkungen des Primärenergiebedarfs (vgl. Knierim 2007:56ff.). Auch deshalb sollen die Raumthermostate nicht die Raumtemperatur regeln, sondern diese nur nach oben begrenzen, um externe Wärmequellen zu berücksichtigen. Um die Wärmeausbeutung zu maximieren, sollen die weiteren Einstellungen dabei über die Heizkurve, also die Vorlauftemperatur, geregelt werden (vgl. Auric/Elmar 2002).

Wichtig für die Erfassung der Nutzungsdaten sind somit die Länge des Nutzungsfensters und die Zeitpunkte der Nutzung. Denn mit der Anpassung an die reale Nutzungszeit kann, gegenüber einer pauschalen Vollast- und Absenkzeit, direkt Energie eingespart werden.

Um die daraus resultierenden Einsparungen messen zu können, ist somit die Präsenzerfassung notwendig. Im Zusammenhang mit der Nutzungszeit kann dann auch auf die solaren Wärmeeinträge rückgeschlossen werden. Die bedarfsorientierte Steuerung kann dann, entsprechend der Ausführungen, genutzt werden, um die Heizkurve langsam antizipierend zu steuern und somit weniger Energie für die Wärmegewinnung nutzen zu müssen (siehe weiterführend Kapitel 0).

### 7.7.2 Raumkonditionen

Raumkonditionen (sofern Konditionierung vorgesehen)		
Raum-Solltemperatur Heizung $\theta_{i,h,soll}$	°C	21
Raum-Solltemperatur Kühlung $\theta_{i,c,soll}$	°C	24
Minimaltemperatur Auslegung Heizung $\theta_{i,h,min}$	°C	20
Maximaltemperatur Auslegung Kühlung $\theta_{i,c,max}$	°C	26
Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb $\Delta\theta_{i,NA}$	K	4
Feuchteanforderung	–	mit Toleranz

Abbildung 9: Raumkonditionen Einzelbüro nach DIN<sup>10</sup> (2011:33)

Da die Raumtemperaturen den Messungen der Arbeit von WELGE ET AL. entsprechen (siehe Welge et al. 2010:6), ist nur die Raumtemperatur entsprechend den Messwerten der Raumsteuerung zu entnehmen. Die Aufnahme der Temperatur ist jedoch wichtig, da der Schwankungsbereich zwischen 19°C und 24°C liegt (vgl. Fizner 2012:11). Da die Absenkung der Temperatur um 1°C bereits eine energetische Einsparung von bis zu 6% mit sich bringt (vgl. Deutscher Statterat 2002:1; Kappert et al. 2007:10), ist die Relevanz für eine spezifische Berechnung als gegeben anzusehen (höhere Ergebnisse in den eigenen Berechnungen (Kapitel 8.8)). Raumtemperatur und Raumsolltemperatur werden durch die GLT erfasst. Alle Werte für die Kühlung entfallen.

### 7.7.3 Mindestauenluftvolumenstrom

Mindestauenluftvolumenstrom $\dot{V}_A$		
personenbezogen	m <sup>3</sup> je Stunde und Person	40
flächenbezogen	m <sup>3</sup> /(h · m <sup>2</sup> )	4
Mindestauenluftvolumenstrom für Gebäude $\dot{V}_{A\text{ Geb}}$	m <sup>3</sup> /(h · m <sup>2</sup> )	2,5
Relative Abwesenheit RLT $c_{RLT}$	–	0,3
Teilbetriebsfaktor der Gebäudebetriebszeit $F_{RLT}$	–	0,7
<b>mech. Auenluftvolumenstrom bzw. Luftwechsel (Praxis)</b>		
Luftwechsel (allgemein)	h <sup>-1</sup>	von 2 bis 3
Luftwechsel (volle Kühlfunktion über Zuluft)	h <sup>-1</sup>	von 4 bis 8

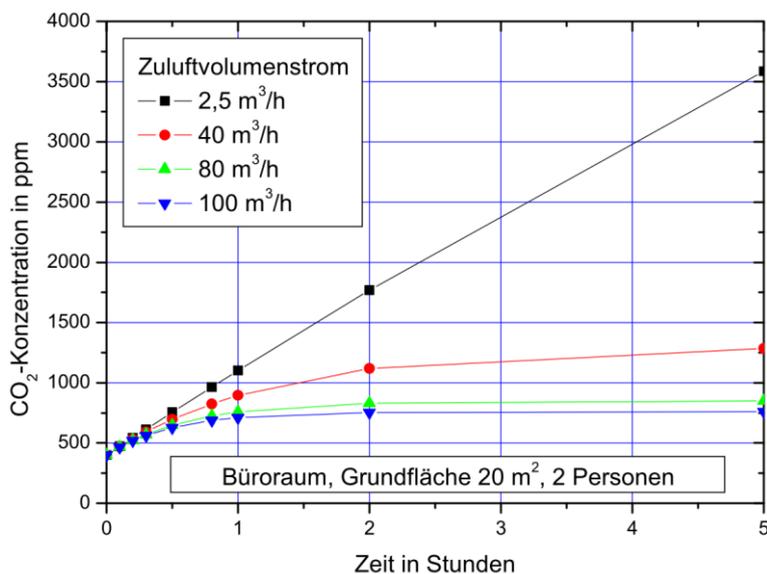
Abbildung 10: Mindestauenluftvolumenstrom Einzelbüro nach DIN<sup>10</sup> (2011:33)

Der Mindestauenluftvolumenstrom beschreibt die, aus hygienischen Gründen empfohlene, Menge an ausgetauschter Luft pro Stunde. Der Grenzwert bezieht sich auf den, von *Max von Pettkenkoffer* (Stand 1807) ermittelten, Wert von 0,1 Vol.-Prozent (1000 ppm) CO<sub>2</sub>. Bei dieser Konzentration liegt nach von Pettkenkoffer der Grenzwert für die für Menschen *gute Luftqualität*. Wobei diese mit dem Konzentrationsverlauf anderer menschlicher Ausdünstungen und Bioeffluenzen korreliert (vgl. Schramek/Recknagel 2009:142f.) und auch deshalb als Indikator für fehlende Lüftung

oder Übernutzung von Räumen genutzt wird (Hutter et al. 2002:7). Der Grenzwert von Pettkenkoffer entspricht dabei einer durchschnittlichen Unzufriedenheit der Personen von über 25%, wobei festzustellen ist, dass selbst bei einer Konzentration von 2500 ppm CO<sub>2</sub> nicht einmal 50% der Personen unzufrieden mit der Luftqualität sind (vgl. Studie von Fizner/Finke 2012:8). Ein weiterer Faktor, der die Relevanz des Raumklimas und des regelmäßigen Luftwechsels hervorhebt, ist die Leistungsfähigkeit (Abbildung 13). Wie schnell ein Luftwechsel erforderlich werden kann, zeigen FIZNER/FINKE anhand des folgenden Beispiels:

Rahmenbedingungen (siehe: Fitzner/Finke 2012:9):

- Unter Berücksichtigung eines Zuluftstroms von 40m<sup>3</sup>/h (rote Linie entsprechend der Werte für ein Einzelbüro (Abbildung 10)
- CO<sub>2</sub>-Außenluftkonzentration von 400 ppm
- Raummaße: 20m<sup>2</sup>\*2,5m Höhe
- Belegung: 2 Personen (36 l CO<sub>2</sub>/h)

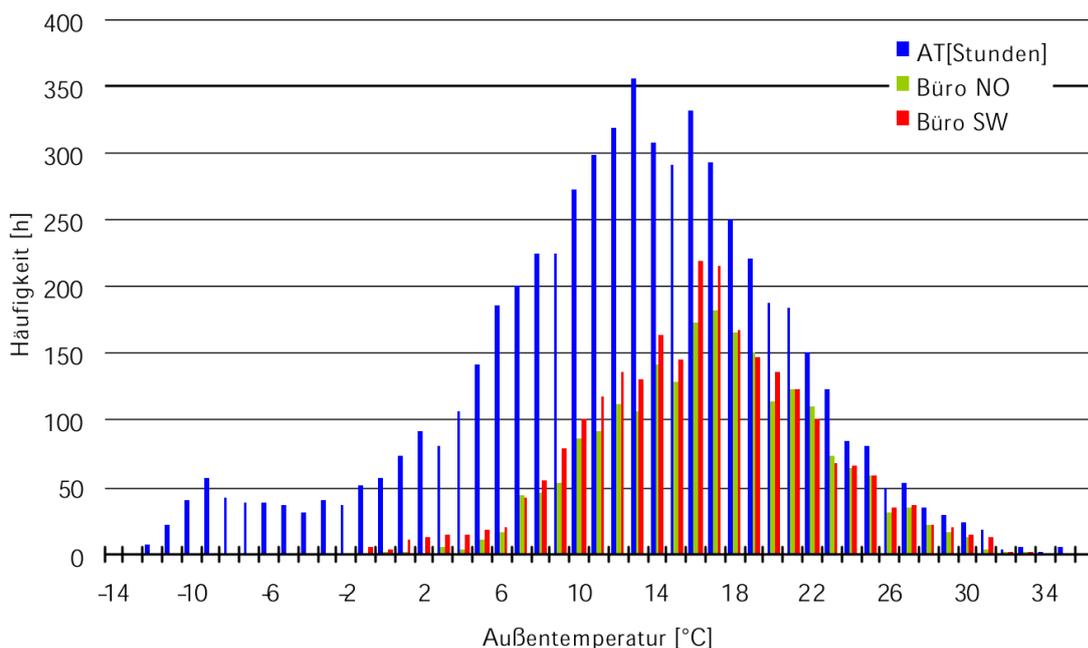


**Abbildung 11: CO<sub>2</sub>-Konzentration in Abhängigkeit von Zeit und Zuluftvolumenstrom (Beispielrechnung Fitzner/Finke 2012:9)**

Bereits nach zwei Stunden ist der Grenzwert von 1000ppm CO<sub>2</sub> erreicht und es müsste gelüftet werden. Wie selten eine Lüftung entsprechend der Grenzwerte bzw. unter der Berücksichtigung des Wohlbefindens (25%) bei manueller Fensterlüftung stattfindet, zeigen FIZNER/FINKE anhand ihrer Ergebnisse von 1996. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration manuell belüfteter Räume liegt oftmals über der maschinell belüfteter. In Schulen wurden Extremwerte von 5000ppm gemessen (vgl. Fitzner/Finke 2012:10). Da die

Nutzung von Schulen ähnlich der von Seminarräumen ist, ist eine Übertragung hier naheliegend.

Da viele Büros an der Leuphana Universität mit mehr als einer Person/ 10m<sup>2</sup> belegt sind, kann die zulässige maximal Konzentration schneller als erwartet erreicht werden. Daraus lässt sich jedoch nicht ableiten, dass sich die Luftwechsel entsprechend erhöhen. Vielmehr liegt die reale Luftwechselrate in der kalten Jahreszeit unter diesen Empfehlungen (s.o.). Bei der Betrachtung der Untersuchungen zur Häufigkeit der Fensteröffnungen in Abhängigkeit von der Außentemperatur von PFAFFEROTT/VOSS zeigt sich, dass die Temperaturen unter 16°C zwar häufiger vorkommen als die Temperaturen über 16°C, die Häufigkeit der Fensteröffnungen ist unter 16°C jedoch deutlich niedriger als bei Temperaturen über 16°C (vgl. Pfafferott/Voss 2002:43f.). Dass eine Unterlüftung der Räume im niedrigen Temperaturbereich häufiger vorkommt, zeigt sich dadurch, dass 80% der Fensteröffnungen im Temperaturbereich zwischen 18°C und 25°C liegen, obwohl die Emittenten konstant bleiben (ebd.).



**Abbildung 12: Häufigkeitsverteilung der Fensteröffnungen & Häufigkeit der Außentemperatur [blau ] (Pfafferott /Voss 2002:43)**

Dieser energetische Vorteil zieht jedoch eine Minderung der *Luftqualität* mit sich. Luftqualität sollte, im Zusammenhang einer interdisziplinären Betrachtung, über der rein energetischen Betrachtung stehen. Denn die Erhaltung der Luftqualität bestimmt das Wohlbefinden der Nutzer\*innen (Hutter et al.2002:4) und damit auch die Akzeptanz des Energiemanagementsystems und im Weiteren auch die Leistungsfähigkeit (siehe

Grafik. Wenn auch nicht belegt werden konnte, wie groß der Einfluss vom Raumklima auf die Leistungsfähigkeit ist, so ist ein Bestehen des Zusammenhanges nicht strittig. Da unter den Versuchsaufbauten mit gleichen Modellen (Temperaturgradzahlen über alle Probanden) gemessen wurde, lässt sich vermuten, dass eben in dieser Form der Modellierung auch die Ursache für sich widersprechende Ergebnisse zu finden ist. Denn, wie bereits mehrfach dargestellt, sind raumklimatische Ansprüche subjektiv und sollten deshalb auch individuell gemessen werden. Entsprechend sollte nicht gemessen werden, wie leistungsfähig eine Gruppe bei einer bestimmten Gradzahl ist. Sinnvoller erscheint es zu messen, wie sich die Leistungsfähigkeit verändert, wenn die Gradzahl bzw. das Raumklima, das von einer Person individuell als „gut“ bezeichnet wird, um einen Wert X verändert wird.



**Abbildung 13: Einflussfaktoren der Leistungsfähigkeit (Urlaub et al. 2010:377)**

Die Berechnung einer durch die Nutzer\*innen bestimmten CO<sub>2</sub>-maximal-Konzentration in Abhängigkeit von der Zeit kann hier entsprechend genutzt werden, um den optimalen Zeitpunkt zur Lüftung mitzuteilen. Bei Erfassung der Emittenten und der Außenluft CO<sub>2</sub>-Konzentration durch die Präsenzmelder kann so auf dem rechnerischen Weg der optimale Lüftungszeitpunkt bestimmt werden. Eine zusätzliche Installation eines CO<sub>2</sub>-Sensors ist durch einen virtuellen Sensor nicht mehr notwendig.

Die größte Herausforderung an dieser Stelle ist die Erfassung der tatsächlich vollzogenen Luftwechsel. So gibt es zwar Arbeiten zu den Luftwechseln in Abhängigkeit von dem Grad der Fensteröffnung (z.B.: Maas 1995; Münzenberg et al.2003), jedoch ist hier weder die Windrichtung, der Lüftungszustand (Querlüftung, offene Tür etc.) noch der Grad der Fensteröffnung erfassbar. Eine Lösung könnte diesbezüglich dadurch erreicht werden, dass Lüftungsprofile angelegt werden. Notwendige Parameter wären unter anderem:

- Nutzungstyp: Forschung durch Befragung:
  - Häufigkeit der Türkontakte
  - Gewöhnlicher Öffnungsgrad der Fenster
  - Der Raumgeometrie entsprechende durchschnittliche Luftaustauschraten
- Mit diesem Profil könnten dann, in einem weiteren Schritt, aus den gemessenen Fensterkontakteschaltungen Rückschlüsse auf anzunehmende Luftwechsel gezogen werden. Diese müssen aufgrund der vielen unbekanntenen und nicht konstanten Variablen eher als Näherung anstelle eines Messwertes betrachtet werden.

Somit wäre eine Annäherung denkbar, die jedoch vorab auf ihre Nutzbarkeit untersucht werden muss. In diesem Punkt ist somit mit mittleren bis großen Unsicherheiten zu rechnen, da die Form der Lüftung den Energieverbrauch erheblich beeinflussen kann (siehe Auswertungen Lüftungsverhalten Kapitel 8.4).

#### 7.7.4 Beleuchtung

In Hinblick auf den elektrischen Energiebedarf, aber auch in Hinblick auf die interne Wärmegegewinnung (je nach Leuchtmittel) spielt die Nutzung der Beleuchtung ebenfalls eine Rolle.

Beleuchtung		
Wartungswert der Beleuchtungsstärke $\bar{E}_m$	lx	500
Höhe der Nutzebene $h_{Ne}$	m	0,8
Minderungsfaktor $k_A$	–	0,84
relative Abwesenheit $C_A$	–	0,3
Raumindex $k$	–	0,9
Minderungsfaktor Gebäudebetriebszeit $F_t$	–	0,7

Abbildung 14: Beleuchtungswerte im Einzelbüro nach DIN<sup>10</sup> (2011:33)

Eine Senkung des Wärmeeintrags im Rahmen der Beleuchtung wäre durch die angedachte Umstellung auf LED-Lichtkonzepte, wie sie bereits für das Audimax geplant sind, zu erreichen. In diesem Rahmen kann auch eine zielgerichtete

Beleuchtung, statt einer nutzungsunabhängigen Beleuchtung, zu weiteren Einsparungen führen. Der *Wartungswert der Beleuchtungsstärke* hängt von den für den Aufgabenbereich geforderten Werten ab und wird in Lux angegeben (DIN10 2011:19). Bei einer nutzungsabhängigen Steuerung der Beleuchtung (Deckenfluter, indirekte Beleuchtung plus direkte Beleuchtung des Arbeitsplatzes) muss hier eine Einzelberechnung in Abhängigkeit der Nutzung für jede Lichtquelle erstellt werden.

Die *Höhe der Nutzebene* beschreibt die Höhe über dem Boden, in der der Wartungswert der Beleuchtungsstärke nachgewiesen werden muss. Der *Minderungsfaktor* bezieht die Fläche und die Beleuchtungsstärke der Umgebung mit ein. Der Wert kann durch eine fachgeplante und fixe Beleuchtung deutlich gemindert werden (vgl. DIN<sup>10</sup> 2011:20). Der Raumindex beschreibt den Einfluss der Raumgeometrie auf den Raumwirkungsgrad. Berücksichtigt werden hierbei jedoch primär die Raummaße (vgl. Ganslandt/Hofmann 1992:156). Die letzte an die Gegebenheiten des Raumes anpassbare Größe ist der Verschmutzungsfaktor.

Die ohne die Splittung des Wartungswertes der Beleuchtungsstärke einzige nutzungsabhängige Variable ist die Berücksichtigung des Teilbetriebsfaktors der Teilbetriebe im Bilanzzeitraum in Abhängigkeit von Urlaub, Ferien und Krankheit (vgl. DIN<sup>10</sup> 2011:20). Im Rahmen einer Präsenzerfassung und eines Betrachtungszeitraumes von 24 h ist dieser Faktor zu vernachlässigen. Denn hier sind Nutzungszeit des Raumes und Lichtsteuerung aneinander gekoppelt.

### 7.7.5 Personenbelegung und interne Wärmequellen

Eine der nutzungsabhängigsten und gleichzeitig mit starken Auswirkungen auf den Energiebedarf zusammenhängenden Variablen ist die *maximale spezifische Leistung* [ $W/m^2$ ]. Erfasst werden dafür die Wärmeinträge durch Arbeitsgeräte und durch Personen.

<b>Personenbelegung</b>				
maximale Belegungsdichte $m^2$ je Person	gering	mittel	hoch	
	18	14	10	
<b>Interne Wärmequellen</b>				
	Vollnutzungs- stunden (h/d)	max. spezifische Leistung ( $W/m^2$ )		
		tief	mittel	hoch
Personen (70 W je Person)	6	4	5	7
Arbeitshilfen <sup>a</sup>	6	3	7	15
Wärmezufuhr je Tag ( $q_{l,p} + q_{l,fa}$ )	Wh/( $m^2 \cdot d$ )	42	72	132

**Abbildung 15: Personenbelegung und interne Wärmequellen im Einzelbüro nach DIN<sup>10</sup> (2011:33)**

<sup>a</sup> = tief: 50 W; mittel: 100W; hoch:150Watt je Person für Arbeitshilfen

Die Arbeitsgeräte sind durch die Werte <sup>a</sup> festgesetzt. Zu beachten ist hier wieder die statische Annahme, die eine weitere Ungenauigkeit der Erfassung darstellt. *Arbeitshilfen* sind zum Beispiel Geräte wie Drucker, Laptops und Monitore. Insbesondere der starke Wärmeabfall der Geräte kann hier zu großen Differenzen führen. Real sind Elektrogeräte zu ca. 90% thermisch wirksam (vgl. Pfafferott/Voss 2002:46). Das bedeutet eine Annäherung kann über die Leistungsangaben der Geräte mit dem Faktor 0,9 berechnet werden. Jedoch geht es nicht nur darum, die realen Werte der Geräte zu kennen, sondern auch Um Kenntnisse bezüglich der konkreten Nutzungsdauer von Geräten. Dafür ist eine Zuordnung der Geräte zu den Nutzer\*innen hilfreich.

Ansätze zur Präsenzerfassung können hier beispielsweise die NFC (Near-Field-Communication) oder Kurzstrecken-Wlan darstellen (siehe Welge et al. 2010:3f.). Es erscheint für eine vollwertige Erfassung der Nutzungsdaten sinnvoll, hier ein nutzungsbezogenes passives System einzusetzen, da bei zu hohem Aufwand, wie z.B. durch Anmeldung via Webseite oder während kurzer Abwesenheiten zu erwarten ist, dass komplette Login- oder Logoutvorgänge vergessen werden oder die Nutzungsbereitschaft durch eine weitere zusätzliche Aufgabe von vornerein verweigert wird.

Doch in der Erfassung unter Berücksichtigung des Datenschutzes liegt auch die Herausforderung. Einerseits ist die Anzahl und die Zuordnung von Arbeitshilfen auch eine Identifizierung der in einem Raum befindlichen Personen und für die Bewertung der Energieverbräuche notwendig, andererseits ist es aus der Perspektive des Datenschutzes schwer, eine direkte Zuordnung von Daten und Personen zu gestalten. Eine Idee zur Entkopplung wäre hier die Einrichtung von namensunabhängigen Nutzungskonten die durch die freie Wahl von Login-Daten anonymisiert werden..

Eine andere Lösung zur Berücksichtigung des Datenschutzes stellt die bewegungs- oder wärmeabhängige Präsenzerfassung. Auf diese Weise ist bei wechselnder Raumbellegung kein individuelles, sondern nur ein raumbezogenes Feedback möglich. Hierzu müsste eine Personenidentifikation stattfinden. Ein weiteres Problem der Erfassung über Bewegungs- und Wärmesensoren besteht darin, dass es nicht möglich ist, die Anzahl der Personen im Raum zu erfassen.

Somit ist es auch nicht möglich, den erheblichen Eintrag von 70W pro Person (vgl. DIN<sup>10</sup>:33) bei mehr als einer Person zu berücksichtigen.

Nochmal verstärkt sich das Problem der unbekanntenen Anzahl von Nutzer\*innen, da der reale Wärmeeintrag pro Person höher ist als in der DIN<sup>10</sup> mit 70 W angenommen. Der Grundumsatz einer 60 kg schweren Person beträgt bereits 70 W. Mit steigendem Körpergewicht ( $\sim W = \text{kg} \cdot 1,2$ ) erhöht sich dieser schnell auf 96W (80kg  $\cdot$  1,2) (Pompe 2012:31). Dazu kommen weitere 30W Arbeitsumsatz entsprechend einer leichten Tätigkeit (ebd.). Zu gleichen Ergebnissen kam auch Koralewski der einen Ruheumsatz einzelner Personen von 70W-100W gemessen hat (Koralewski 2006:17). Da aus der DIN<sup>10</sup> nicht hervorgeht, wie der Wert von 70W generiert wurde, muss vorerst von einer Unterdeckung von 30W bis 60W pro Person ausgegangen werden. Für die Berechnungen werden dementsprechend 100 Watt angenommen. Die Vollnutzstunden werden für die Berechnung der Wärmezufuhr pro Tag, jeweils mit den personenbezogenen und den gerätebezogenen Wärmeeinträgen multipliziert und dann addiert. Ihre Erfassung ist damit ebenso entscheidend für die Berechnung des täglichen Wärmeeintrages und stark durch die Nutzer\*innen beeinflussbar (z.B. durch die Nutzung von Energiesparmodi bei einer Inaktivität von mehr als 15min. In der Stromstoß-Kampagne an der Leuphana Universität konnten durch Veränderungen der Mediennutzung 4,5% Strom eingespart werden (vgl. Opel et al. 2013: 164).

Automationsgrad		D	C	B	A
Summand Automation $\Delta\theta_{EMS}$	K	0	0	-0,5	-1
Faktor adaptives Anheizen $f_{adapt}$	-	1	1	1,35	1,35

**Abbildung 16: Automationsgrad nach DIN<sup>10</sup>**

Der Automationsgrad, beziehungsweise die Variablen, sind bereits in Kapitel 7.6.1 ausführlich beschrieben und reflektiert.

Im Kapitel sechs konnte dargestellt werden, wie stark durch die Standardisierung der Nutzungswerte Abweichungen von den realen Verbräuchen stattfinden. Da die Software *Energieberater 18599 3D Plus* dazu konzipiert wurde, Gebäude miteinander vergleichen zu können, ist eine derartige Standardisierung notwendig.

Die alternativ möglichen, dynamischen Modellrechnungen benötigen jedoch auch eine dynamische Datengrundlage, wie sie auch zukünftig nur bedingt vorhanden sein wird. Es konnte insbesondere in Kapitel 7.7 dargestellt werden, welche Änderungen vorgenommen werden müssen, um ein individuelles Feedback in Form von Momentaufnahmen zu ermöglichen.

Die relevanten Variablen, die dafür nach der Sanierung der Bestandsgebäude mit spezifischen Nutzungsdaten belegt werden können und müssen, wurden somit

herausgearbeitet. Welchen Einfluss die einzelnen Faktoren auf den Energieverbrauch haben und welche in diesem Zusammenhang besonders relevant sind, zeigt der folgende Teil..

## **8 Beispielrechnungen mit variablen Nutzungsverhalten**

Für die folgenden Simulationen wurde ein Softwarepaket der Firma Hottgenroth Software GmbH & Co. KG genutzt, der an dieser Stelle für die freundliche Unterstützung und der Bereitstellung des Softwarepaketes gedankt sei.

Genutzt wurde im Wesentlichen das *CAD-Programm*, als Teil des *Energieberaters 18599 3D Plus* zur Erstellung der Gebäudehülle. Der *Energieberater 18599 3D Plus* wurde dann zur Berechnung der Auswirkungen des Nutzungsverhaltens genutzt (Hottgenroth 2013).

In diesem Teil geht es darum, die unterschiedlichen Einflüsse des Nutzungsverhaltens durch angelegte Nutzungsprofile anhand eines Beispielgebäudes zu berechnen und die Relevanz der einzelnen Faktoren zu bewerten. Es wird dargestellt, wie groß die energetischen Auswirkungen unterschiedlichen Nutzungsverhaltens sind. Weiter wird innerhalb jeder Simulation der Beitrag der unterschiedlichen Bilanzgrößen aufgelöst und somit die Erfassungsrelevanz herausgearbeitet.

### **8.1 Einzelheiten zum Gebäude/ Modell**

Das in der Beispielrechnung dargestellte Ein-Raum-Haus entspricht einer Nutzungszone. Durch die Reduzierung auf einen Raum sollen Interdependenzen mit anderen Räumen, welche sich wiederum selbst variabel verhalten, ausgeschlossen und die in den verschiedenen Varianten angelegten Nutzungsprofile unter gleichen Bedingungen miteinander verglichen werden. Somit werden die Rahmenbedingungen fixiert und die Werte beziehen sich ausschließlich auf die Unterschiede im Nutzungsverhalten. Ein weiterer Vorteil des Ein-Raum-Hauses ist die Vergrößerung der Effekte. Auch kleine Abweichungen können somit extrahiert werden. Die Grundlage für die Spezifikationen, wie zum Beispiel den U-Werten, dem Aufbau der Wände, der Kategorisierung Luftdichtheit (Kategorie 3;  $n_{50} = 6h^{-1}$ ) wurden Werte und Angaben entsprechend der Bestandsgebäude an der Leuphana Universität zugeordnet.

Das Gebäude besteht aus zwei Zonen, wobei die eine der Dachraum ist (19m<sup>2</sup>; 21,66 m<sup>3</sup>) und die andere das, in mehreren Varianten betrachtete, Büro (EG-R1: 19,25 m<sup>2</sup>;

57,75 m<sup>3</sup>; bei 3m Deckenhöhe) Das Gebäude besteht somit aus 19,25 m<sup>2</sup> Fläche und insgesamt 79m<sup>3</sup>, wovon 57,8 m<sup>3</sup> beheizt sind.

## 8.2 Referenzberechnung

Bevor die einzelnen Varianten erstellt werden, wird hier vorerst eine Standardberechnung (Ist-Zustand) vorgenommen. Das Profil basiert auf den Vorgaben nach der EnEV 2009 und wurde entsprechend der *Grundkonditionen* aufgebaut. Die Berechnung des Ist-Zustandes dient damit als exemplarischer Bezugswert.

Die Berechnung steht deshalb auch stellvertretend für eine Erstberechnung, wodurch alle Differenzen der folgenden Varianten dem Einfluss des Nutzungsverhaltens entsprechen. Die Ergebnisse des Variantenvergleichs sind in diesem Sinne dann auch die Grundlage für ein Feedback bezüglich der Verhaltensveränderungen.

**Tabelle 1: Auswertung „Ist-Zustand“ Grundkonditionen- Profil: Einzelbüro**

Endenergie (bezogen auf den Brennwert)	8157 kWh	423,74 kWh/m <sup>2</sup>
Nutzenergiebedarf	6243 kWh	324,30 kWh/m <sup>2</sup>
Primärenergie	1332 kWh	69,17 kWh/m <sup>2</sup>
CO <sub>2</sub> -Emmisionen	-2192 kg	-113,87 kg/m <sup>2</sup>
Transmissionsverluste	6434 kWh	-
Lüftungsverluste	1333 kWh	-
Heizungsverluste (inkl. Warmwasser)	1914 kWh	-
Energiekosten (inkl. Betriebskosten)	738 € / a	639 € Wärme / 98 € Strom

Damit der Einfluss durch die Anpassung an die Nutzung oder ein verändertes Nutzungsverhalten dargestellt werden kann, werden in der Referenztabelle die absoluten Werte eingetragen (Tabelle 1). Die Tabellen der Varianten zeigen dann die Abweichungen in der entsprechenden Einheit und in Prozent zur Referenzberechnung an. Die der Berechnung zugrunde liegenden Daten wurden entsprechend der aufgeführten *Grundkonditionen* teilweise angepasst. So wurde zum Beispiel die Anzahl der jährlichen Nutzungstage auf 212 Tage pro Jahr reduziert.

Berücksichtigt wurden Abweichungen, die entsprechend der Ausführungen im Kapitel 7.7 verändert wurden:

- $D_{\text{nutz,a}}$  = 212 jährliche Nutzungstage
- $D_{\text{op,a}}$  = 212 jährliche Betriebstage Heizung
- $q_{I,p}$  = tägl. Wärmeabgabe durch Personen: 100 W / Person
- $\Delta\dot{v}_{I,NA}$  = 4 °C Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb
- $\dot{v}_{I,h,\text{min}}$  = 20°C Minimaltemperatur Auslegung der Heizung  
(Untergrenze an kalten Tagen)
- $V_A$  = 4,00 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> Außenluftvolumenstrom pro Fläche
- $n_A$  = 1,33 h<sup>-1</sup> Luftwechselrate
- Luftdichtheit = Kategorie 3 –Gebäudebestand Luftwechsel bei 50 Pa: 6<sup>-1</sup>
- $q_{i,p}$  = Die tägliche Wärmeabgabe pro Personen beträgt:  
= (100 W<sub>Person</sub> \* 10h/d) / 19,25m<sup>2</sup> = 51,95 Wh/m<sup>2</sup>d –Vollzeitstelle  
= 100 W<sub>Person</sub> \* 6 h/d) / 19,25m<sup>2</sup> = 31,17 Wh/m<sup>2</sup>d – halbe Stelle
- $t_{\text{nutz,d,voll}}$  = Nutzungszeit von 10 Stunden pro Tag bei einer Vollzeitstelle
- $t_{\text{nutz,d,halb}}$  = Nutzungszeit von 6 Stunden pro Tag bei einer halben Stelle

Alle anderen Faktoren, die nicht in den folgenden Varianten verändert wurden, entsprechen den Vorgaben der DIN V 18599-10 aus dem Profil *Einzelbüro* (siehe Kapitel 7.7).

Die Abweichungen vom Profil Einzelbüro entsprechend der DIN<sup>10</sup> werden in Tabelle 2 dargestellt. Vereint betrachtet werden hier die, durch die Veränderung der Grundkonditionen gegebenen, Abweichungen der Ausgangsberechnung gegenüber der Berechnung entsprechend der Vorgaben der DIN<sup>10</sup> für ein Einzelbüro.

**Tabelle 2: Profilvariante Einzelbüro der DIN<sup>10</sup>**

Endenergie (bezogen auf den Brennwert)	- 400 kWh	- 5%
Nutzenergiebedarf	- 246 kWh	- 4%
Primärenergie	- 4 kWh	- 0,3%
CO <sub>2</sub> -Emmissionen	-130 kg	- 6%
Transmissionsverluste	- 124 kWh	- 2%
Lüftungsverluste	- 134 kWh	- 10%
Heizungsverluste (inkl. Warmwasser)	- 153 kWh	- 8%
Energiekosten (inkl. Betriebskosten)	- 25 € / a	- 3%

Bereits eine Reduktion der täglichen Stundenzahl um eine Stunde auf eine tägliche Nutzungszeit von 10h pro Tag (8-18 Uhr) und eine Reduzierung der Betriebsstunden der Heizung auf 12 Stunden pro Tag führen, bei einer Raum-Solltemperatur von 21°C, zu einer Einsparung von bis 5% Endenergie. Weiter fällt auf, dass durch die Reduktion der Nutzungstage 10% der nutzungsabhängigen Lüftungsverluste vermieden werden. Da durch die Anpassung der GLT an die Anwesenheitszeiten oder durch ein

Präsenzmeldesystem kein Komfortverzicht für die Nutzer\*innen entsteht, ist hier mit einer hohen Akzeptanz der Maßnahme zu rechnen.

Eine aktive Rolle kommt den Nutzer\*innen dann zu, wenn die Raumtemperatur bei Nicht-Nutzung abgesenkt wird (Temperaturabsenkbetrieb) und eine Nutzung außerhalb planbarer Nutzungszeiten stattfindet, So zum Beispiel in Konferenzräumen oder bei Überstunden. In diesem Fall ist die notwendige Zeit zum Erwärmen des Raumes mit einzuplanen und der Bedarf entsprechend im Voraus von den Nutzer\*innen anzumelden. Eine große Herausforderung besteht darin, unterschiedliche Präsenzzeiten zu erfassen und den Raum, entsprechend der Präferenzen der jeweiligen Nutzer\*innen, vorzubereiten. Es muss erfasst werden, wer wann einen Raum betritt oder betreten möchte. Diese Erfassung sollte dabei für die Nutzer\*innen soweit wie möglich passiv geschehen (siehe Kapitel 7.7.5) oder als außerplanmäßige Nutzung über einen Abgleich zwischen der Gebäudesteuerung und einem digitalen Kalender gesteuert werden.

### 8.3 Einflussfaktor Nutzungszeit - Halbe Stelle

Eine weitere Variante bildet die Variante „halbe Stelle“. Die Nutzungsstunden werden auf 6h täglich von 8:00 Uhr – bis 14 Uhr reduziert. Die Nutzungszeit entspricht 6h pro Tag (8-14 Uhr). Die täglichen Betriebsstunden der Heizung betragen 8 h/d bei einer Raum-Solltemperatur von 21°C. Die tägliche Wärmeabgabe durch Personen beträgt:  $(100 \text{ W/Person} * 6 \text{ h}) / 19,25 \text{ m}^2 \text{ d} = \underline{31,17 \text{ Wh/m}^2 \text{ d}}$ .

**Tabelle 3: Auswertung Profilvariante: Halbe Stelle (6h/212d)**

Endenergie (bezogen auf den Brennwert)	- 678 kWh	- 8%
Nutzenergiebedarf	- 392 kWh	- 6%
Primärenergie	- 16 kWh	- 1,2%
CO <sub>2</sub> -Emmissionen	-218kg	- 10%
Transmissionsverluste	- 125 kWh	- 2%
Lüftungsverluste	- 392 kWh	- 29%
Heizungsverluste (inkl. Warmwasser)	- 286 kWh	- 15%
Energiekosten (inkl. Betriebskosten)	- 45 € / a	- 6%

Die stärksten prozentualen Auswirkungen hat die Anpassung der Nutzungszeiten auf die Verluste durch Lüftung (29%). Dabei ist zu beachten, dass die Werte sich auf ein einziges Büro beziehen. Die Einsparungen steigen um je 670kWh Endenergie auf die

Gesamtmenge der nur halbtags besetzten Büros. Im Gebäude C.12 zum Beispiel sind 44 Büros (ohne die oberste ausgebaut Ebene). Unter Berücksichtigung dieses Faktors wird deutlich, dass die Präsenzerfassung und eine Adaption der GLT an die realen Anwesenheitszeiten von hoher Relevanz sind.

#### 8.4 Lüftungsverhalten

Die Anpassungen GLT an die Zeiten der Anwesenheit haben bereits gezeigt, dass auf diesem Weg 29% der Lüftungsverluste eingespart werden können (Kapitel 8.3). Welchen Einfluss eine Veränderung der Luftwechselrate, also des Lüftungsverhaltens, in der Anwesenheitszeit hat, wird folgend dargestellt. Die Luftwechselrate entsprechend der DIN<sup>10</sup> liegt für Einzelbüros bei 1,33 (vgl. Hottgenroth 2012). Die Angaben in der Literatur zur Einhaltung einer hygienischen Luftwechselrate schwanken von 0,3h<sup>-1</sup> bis 1,3h<sup>-1</sup> (vgl. Münzenberg et al. 2003: 8). Die Grundkonditionen und damit die Referenzberechnung wurden mit einer Luftwechselrate von 1,33h<sup>-1</sup> berechnet. Um die Spanne aufzuzeigen, wird nachfolgend eine Berechnung mit der deutlich geringeren Luftwechselrate von 0,3h<sup>-1</sup> durchgeführt. Die Werte entsprechen einer intermittierenden Lüftung eines 60 m<sup>3</sup> Raumes, bei 10cm Kippstellung der Fenster mit einer intermittierenden Lüftung von 7-9 Uhr; 11-14 Uhr und 17-20 Uhr und einer Heizgrenztemperatur von 12°C (Maas 1995:80). Alle anderen Werte entsprechen den *Grundkonditionen*. Da es sich bei einer Luftwechselrate von 1,33h<sup>-1</sup> um die Obergrenze der Empfehlungen vor dem hygienischen Hintergrund handelt (vgl. Münzenberg et al. 2003: 8), ist in der Realität eine Unterlüftung zu erwarten (siehe auch Kapitel 7.7.3). Es sind wieder 10h Nutztunden und 12 Betriebsstunden der Heizung, sowie 51,95 Wh/m<sup>2</sup>d als weitere Annahmen veranschlagt.

**Tabelle 4: Auswertung Profilvariante: Intermittierendes Lüften - Luftwechselrate:  $0,3h^{-1}$** 

Endenergie (bezogen auf den Brennwert)	- 328 kWh	- 4%
Nutzenergiebedarf	- 297 kWh	- 5%
Primärenergie	- 11 kWh	- 0,3%
CO <sub>2</sub> -Emmissionen	-93 kg	- 4%
Transmissionsverluste	- 1 kWh	- 0,02%
Lüftungsverluste	- 308 kWh	- 23%
Heizungsverluste (inkl. Warmwasser)	- 23 kWh	- 1,6%
Energiekosten (inkl. Betriebskosten)	- 22 € / a	- 2,9%

Es zeigt sich, dass eine Änderung der Luftwechselrate auf rund ein Viertel der Standwerte ( $1,33h^{-1}$ ) nahezu ein Viertel der Lüftungsenergie ausmacht. Da die Lüftungsverluste direkt der Luftwechselrate entsprechen, ist auch hier eine Messung oder eine Annäherung an die Realwerte vorzunehmen. Lösungsvorschläge zur Erfassung von diesem, aufgrund der vielen Abhängigkeiten schwer zu erfassenden, Wert sind in Kapitel 7.7.3 zu finden. Im Kontext der Leistungsfähigkeit und des Wohlbefindens der Nutzer\*innen ist eher eine Erhöhung der Luftwechselrate und damit auch des Energiebedarfs notwendig (siehe Kapitel 7.7.3). Eine Überwachung der Luftqualität kann und sollte in entsprechenden Fällen zu einer Erhöhung der Luftwechselrate und damit auch zu einem Anstieg der Energieverbräuche führen. Ein Fokus sollte deshalb in einer Nutzungsunterstützung zum „richtigen“ Lüften liegen.

### 8.5 Lüftungsverhalten und Anwesenheit

In der folgenden Variante wird berechnet, wie sich eine Kopplung der vorangegangenen Profilvarianten auf den Energiebedarf auswirkt. Wird für ein Büro, welches mit einer Person täglich über 6 Stunden besetzt ist ( $q_{l,p}=31,17 \text{ Wh/m}^2\text{d}$ ) und eine Luftwechselrate von  $0,8h^{-1}$  angenommen, so ergeben sich folgende Einsparungen:

**Tabelle 5: Auswertung Profilvariante: Kombination halbe Stelle & mittleres Lüftungsverhalten**

Endenergie (bezogen auf den Brennwert)	- 685 kWh	- 8,4%
Nutzenergiebedarf	- 472 kWh	- 7,6%
Primärenergie	- 16 kWh	- 1,2%
CO <sub>2</sub> -Emmisionen	- 219 kg	- 10%
Transmissionsverluste	- 82 kWh	- 1,3%
Lüftungsverluste	- 500 kWh	- 37,5%
Heizungsverluste (inkl. Warmwasser)	- 213 kWh	- 11,1%
Energiekosten (inkl. Betriebskosten)	- 32€ / a	- 4,3%

Es zeigt sich, wie sehr die Berechnung durch die Kopplung verschiedener Faktoren beeinflusst werden kann. Die Berechnung zeigt, dass Einsparungen von über 8% der Endenergie möglich sind und dass diese Einsparung, bei einer mittleren Raumbelüftung und einer Steuerung entsprechend der Präsenzzeiten, nicht zwangsläufig mit einem Komfortverlust für die Nutzer\*innen einhergehen muss. Die Einsparungen der beiden Variationen haben sich jedoch nicht aufsummiert, sondern sind gegenüber der reinen Berechnung der halben Stelle um nur 0,4% gestiegen, obwohl die Lüftungsverluste in der gemischten Form um über 100kWh gesunken sind. Weiter zeigt sich, wie sich durch die Verkettung von Veränderungen auch die Einsparungen erhöhen und damit verbunden, wie wichtig die Erfassung der entsprechenden Daten für ein nutzungsspezifisches Feedback ist.

## 8.6 Wärmequellen

Bei der Betrachtung der Wärmequellen geht es primär um die Darstellung des Falls einer erhöhten Anzahl von Personen im Büro. Im Rahmen von Besprechungen oder aus Platzmangel kann es zu einer Überbelegung eines Büroraumes kommen. Für diesen Fall wird im folgenden Beispiel mit 3 Personen auf gleicher Fläche gerechnet. Hinzu kommen insgesamt 10 Nutzungsstunden und 12 Betriebsstunden pro Tag, da bei einer höheren Besetzung eine Erhöhung der Anwesenheitstage ebenso wahrscheinlich ist wie eine Verteilung der Anwesenheit über den Tag. Im Bestandsgebäude (C.13.206) arbeiten 3 Personen auf einer Fläche von 16,37m<sup>2</sup> (vgl. Strietzel<sup>2</sup> 2011:1). Entsprechend Kapitel 7.7.5 werden 100W pro Person an Wärmeeintrag angenommen. Das entspricht bei 6 Vollnutzstunden pro Person und Tag 1800W/d personenbezogene Wärmeeinträge. Für die Arbeitshilfen werden die 80W pro Person angenommen, mit einem Wärmewirkungsgrad von 0,9 \* 6h Arbeitszeit multipliziert und verdreifacht:

$$\frac{\text{Wärmezufuhr}}{\text{Tag}} (\text{Personen } [q_{l,p}]) = \frac{100W * 3 (\text{Personen}) * 6h}{19,25m^2 * d}$$

$$= 187,01 \text{ Wh/m}^2d$$

$$\frac{\text{Wärmezufuhr}}{\text{Tag}} (\text{Arbeitshilfen } [q(l, \text{fac})]) = \frac{80W * 0,9 * 3 (\text{Personen}) * 6}{19,25m^2 * d}$$

$$= 67,33 \text{ Wh/m}^2d$$

Alle anderen Nutzungsdaten wurden in ihren Standardeinstellungen, entsprechend der *Grundkonditionen*, gelassen. Da es sich nur um eine Beispielrechnung handelt, können Faktoren wie zum Beispiel nicht gleichzeitige Wärmeeinträge in diesem Fall keine Berücksichtigung finden.

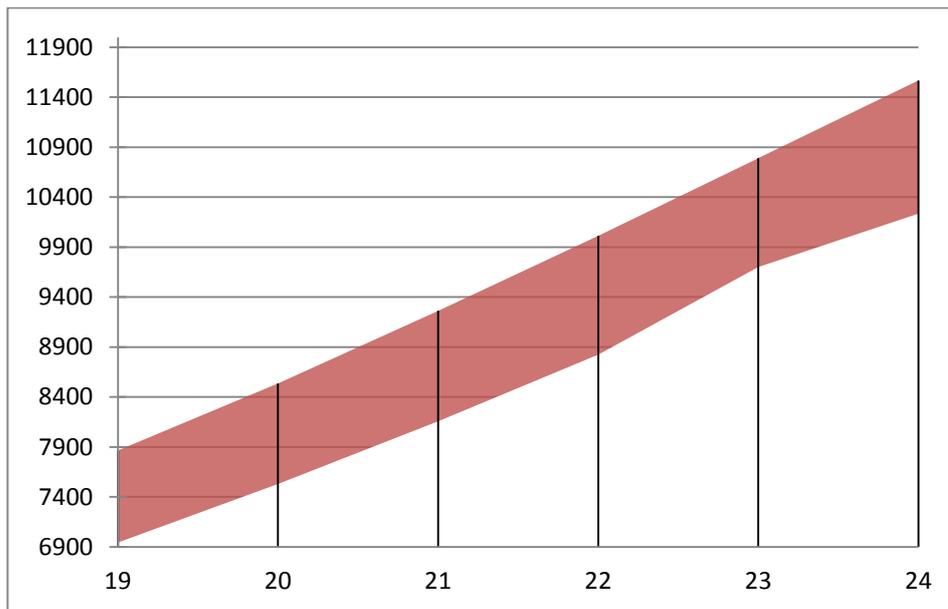
**Tabelle 6: Auswertung Profilvariante: Anstieg der Raumnutzer\*innen (Wärmequellen)**

Endenergie (bezogen auf den Brennwert)	- 485 kWh	- 6%
Nutzenergiebedarf	- 415 kWh	- 6,6%
Primärenergie	- 9 kWh	- 0,7%
CO <sub>2</sub> -Emmissionen	- 156 kg	- 7,1%
Transmissionsverluste	- 0 kWh	- 0%
Lüftungsverluste	- 0kWh	- 0%
Heizungsverluste (inkl. Warmwasser)	- 70 kWh	- 3,6%
Energiekosten (inkl. Betriebskosten)	- 32 € /a	- 4,3%

Auch hier zeichnen sich klare Einsparungen von bis zu 6% der Endenergie ab. Dieses Ergebnis sollte jedoch nicht dazu verleiten, mehr Personen in die einzelnen Büros zu verlagern. Denn für die Berechnung wurde die Luftwechselrate konstant gelassen und um für ein gesundes Raumklima zu sorgen, müsste die Luftwechselrate entsprechend der Emittenten erhöht werden. Vielmehr wird deutlich, wie wichtig die Berücksichtigung der Gegebenheiten ist. Denn ein, aufgrund falscher Annahmen, gegebenes Feedback kann unter Umständen energetisch unvorteilhaftes Verhalten fördern.

## 8.7 Temperaturabsenkung

Zusätzlich zu den Berechnungen jeder einzelnen Raum-Solltemperatur, wurde auch jeweils eine Variante ohne Temperaturabsenkbetrieb erstellt. Die Verbrauchslinien verlaufen dabei nahezu parallel.

**Abbildung 17: Differenz Endenergiebedarf nach Raum-Solltemperatur**

In der Berechnung zeigte sich jedoch, dass die Verbräuche ohne Temperaturabsenkbetrieb um durchschnittlich 12,98% oder ca. eine Kilowattstunde parallel nach oben verschoben waren (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**; Abbildung 17). Der Verlauf zeigt, dass der Energieberater nicht geeignet ist, um das Verhalten dynamischer Verläufe darzustellen. Der Grund liegt in der Berechnung anhand von über den Zeitraum gemittelten Werten. Es fließt nicht mit in die Berechnung ein, in welchem Zeitraum die Anhebung der Raumtemperatur nach dem Temperaturabsenkbetrieb zu erreichen ist. Es fließt nur ein, an wie vielen Stunden innerhalb des Betrachtungsraumes eine entsprechende Temperatur zu halten ist (siehe Kapitel 7.6). Entsprechend wird nicht berücksichtigt, dass morgens innerhalb eines kleinen Zeitraumes die Wärmeabnahme stark ansteigt, wenn die Temperatur im ganzen Gebäude über die Nacht abgesenkt wurde (siehe „zu 4.“ Kapitel 6.6.1). Deshalb wird zur Überprüfung der Rentabilität des Temperaturabsenkbetriebes auf die Nutzung eines dynamischen Berechnungsverfahrens oder auf die Untersuchung anhand realer Messwerte verwiesen.

## 8.8 Raum-Solltemperatur

Wie relevant die Raumtemperatur ist, wurde bereits im Kapitel 7.6.1 zu den Bilanzinnentemperaturen dargestellt. Da diese nach FIZNER zwischen 19°C und 24°C schwanken (Fizner 2012:11), wurden alle ganzen Werte [13°C; 20°C; 21°C; 22°C;

23°C; 24°C] einzeln durchgerechnet und verglichen (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

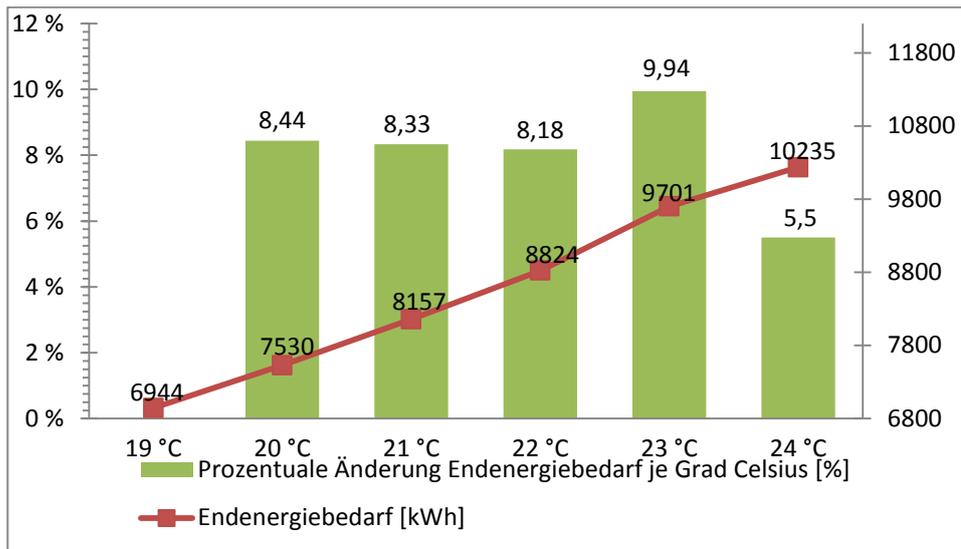
Wie bereits in Kapitel 7.6.1 dargestellt, wird die Relevanz der Raumtemperatur für den Energiebedarf durch die Berechnungen bestätigt. Der Endenergiebedarf schwank dabei von -15% (19°C Raum-Solltemperatur) bis zu +25% bei 24°C Raum-Solltemperatur. Während die CO<sub>2</sub>-Emissionen unter 21°C konstant bei 2192kg/Jahr bleiben, steigen sie bei 24°C fast um ein Drittel auf 2856kg/a. Die Energiekosten reichen dabei von einer Senkung von fast 11% bis zu 18% Mehrkosten bei 24°C Raum-Solltemperatur. Neben den sehr starken Heizungsverlusten (18%) sind es vor allem Transmissions- und Lüftungsverluste, mit 25% bei 24°C, die diesen Anstieg gegenüber dem Referenzwert von 21°C verursachen.

**Tabelle 7: Auswertung Profilvariante : Raum-Solltemperatur (24°C)**

Endenergie (bezogen auf den Brennwert)	- 2078 kWh	- 25%
Nutzenergiebedarf	- 297 kWh	- 4,8%
Primärenergie	- 11 kWh	- 0,83%
CO <sub>2</sub> -Emmisionen	- 664 kg	- 30%
Transmissionsverluste	- 1632 kWh	- 25%
Lüftungsverluste	- 337kWh	- 25%
Heizungsverluste (inkl. Warmwasser)	- 338kWh	- 18%
Energiekosten (inkl. Betriebskosten)	- 135 € /a	- 18%

Auffällig, jedoch noch nicht geklärt ist, dass bei 23°C ein Anstieg der Lüftungsverluste auf 46% und bei 24°C ein Anstieg von 25% stattfindet. Die Ursachen für diesen Sprung müssen in der Berechnung liegen, konnten jedoch nicht identifiziert werden. Das finanzielle Einsparpotential liegt in der Spanne zwischen 19°C und 24°C bei 215 €/a und Raum.

Sehr wichtig ist, dass die Veränderung der Raum-Solltemperatur um je ein Grad Celsius den größten Einfluss auf den Primärenergiebedarf gegenüber allen anderen Maßnahmen hat.



**Abbildung 18: Veränderung des Endenergiebedarfs in Abhängigkeit der Raum-Solltemperatur**

Ebenso wie der Primärenergiebedarf steigt auch der Endenergiebedarf mit jedem Grad Celsius der Raumsolltemperatur und zeigt, wie wichtig es ist, die Raum-Solltemperatur exakt zu messen, zu steuern, zu kommunizieren und abzustimmen. Denn mit jedem Grad, durch das die Raum-Solltemperatur erhöht wird, steigt der Endenergiebedarf im Durchschnitt um 8 % (vgl. Abbildung 18: Veränderung des Endenergiebedarfs in Abhängigkeit der Raum-Solltemperatur Abbildung 18).

## 8.9 Programmspezifische Herausforderungen

In der Literatur sind erhebliche Differenzen zwischen berechnetem Verbrauch, entsprechend der DIN V 18599, und den realen Verbräuchen zu finden. Mehr als 100 % Abweichung bei der Berechnung vom Heizbedarf, entsprechend der DIN V 18599, gab es bei der Bewertung von mehreren Schulen (Bienhüls 2009:6). Zusätzlich, zu den Berechnungen nach der DIN V 18599, wurde bei BIENHÜLS eine dynamische Berechnung mit der Simulationssoftware DK-Integral durchgeführt. Die dynamische Simulation erreichte dabei die realen Verbrauchswerte. Angepasst wurden nur die Werte bezüglich des Nutzungsverhaltens. Als Fehlerquellen in diesem Vergleich wurden somit Festlegungen bezüglich der Nutzung und zusätzlich rechnerische Fehler innerhalb des Rechenkerns identifiziert (vgl. Bienhüls 2009:6).

Weiter lagen Abweichungen in den Berechnungen mittels unterschiedlicher EDV-Programme bei Berechnungen bis 2011 häufiger vor. So wurde mit dem Rundschreiben Nr. 29 der KfW-Bankengruppe für die Zeit von Oktober 2010 bis Juni 2011 die Anerkennung der Energiebedarfsberechnung entsprechend der DIN V 18599 ausgesetzt

(vgl. Fraunhofer IBP 2013; vgl. 18599 Gütegemeinschaft<sup>1</sup>:2013).

Die Behebung dieser Differenzen zwischen den jeweiligen Berechnungen der führenden Softwarehersteller führte zu einem Zusammenschluss der Hersteller zu einer Gütegemeinschaft. Ihr Ziel war es, die Differenzen der EDV-Berechnungen zu beheben, indem einheitliche Lösungen für nicht klar definierte Berechnungsschritte erarbeitet wurden. Das Ergebnis dieser Vereinigung ist eine Streuung bei der Berechnung vom Energiebedarf eines Referenzgebäudes von unter 0,1% (18599 Gütegemeinschaft<sup>2</sup>:2013).

Die weitere Standardisierung wurde mit der KfW-Bankengruppe und mit dem Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung abgestimmt und veröffentlicht (siehe weiter: BMVBS 2013). Abweichungen zwischen den verschiedenen EDV-Programmen können jedoch weiterhin auftreten, da die Programme unterschiedlich mit der Setzung von Standardwerten verfahren (vgl. 18599 Gütegemeinschaft<sup>2</sup>:2013). Diese programmübergreifende Herausforderung ist für die vorliegenden Berechnungen nicht relevant und muss nur berücksichtigt werden, wenn mit anderen Programmen Vergleichsrechnungen angestellt werden.

Grundsätzlich ist eine Übersteigerung der realen Verbrauchswerte durch die Berechnungen zu erwarten. Dass andere Berechnungsverfahren die realen Energiebezüge besser abbilden, zeigt sich daran, dass auch nach den Optimierungen bei der Berechnung von Wohngebäuden, anhand der zugelassenen DIN 4108-6 in Verbindung mit der DIN 4701-10, bessere Annäherungen an die Realwerte erreicht wurden (vgl. Himburg 2011:3). Die Gründe für die Differenzen zwischen den Verfahren liegen nach HIMBURG einerseits in der Annahme ungünstigerer Werte für Raumtemperatur und interne Gewinne, andererseits jedoch auch an der unvoreilhafteren Bewertung der Anlagentechnik bei der Verwendung von Standardwerten in der DIN V 18599 (vgl. Himburg 2011:3).

Grundsätzlich ist die DIN V 18599 angelegt, um Gebäude untereinander zu vergleichen und um sie anhand von gegebenen Werten eines Referenzgebäudes auf ihre Normkonformität mit der EnEV 2009 zu überprüfen.

Differenzen zwischen Berechnung und realen Verbräuchen sind nicht zuletzt aufgrund der Beschaffenheit der DIN V 18599 und ihrem Zweck zu erwarten. Denn die Berechnungen der DIN entsprechen Verbrauchsprognosen, die als notwendige Grundlage für Verbrauchsvergleiche standardisierte Annahmen über Nutzungseigenschaften der einzelnen Zonen beinhalten.

Ein Beleg dafür, dass der Nutzungsanteil an Abweichungen zwischen Planung und Betrieb (bis zu 70%) sehr nutzungsabhängig sein kann, zeigen unter anderem FISCH/PLESSER (vgl. 2007:5; Kapitel:4.1). Da die Standardwerte der Berechnungen für das Nutzungsverhalten auf statistischen Werten beruhen, ist eine Anpassung der Verhaltenswerte entsprechend realer Messungen notwendig und führt zu einer Erhöhung der Datenqualität mit jeder zusätzlichen Information.

### **8.10 Zusammenfassung der Berechnungen**

Es konnte mit den Berechnungen der einzelnen Varianten gezeigt werden, wie sich der Endenergiebedarf unter der Modifikation der einzelnen Variablen verändert. Dabei schwankten die Abweichungen bei den Änderungen der Raum-Solltemperatur gegenüber dem berechneten Grundprofil von -14% bis +25%. Zwischen 4% und 8% eingesparter Energie wurden durch Anpassungen an die Anwesenheitszeiten, durch unterschiedliche Variationen der Lüftung und durch eine Veränderung der im Raum anwesenden Personen erreicht. Bei der Betrachtung der für die Einsparungen notwendigen Daten zeigt sich, dass ein Großteil der Einsparungen bereits durch Wissen über die Bedürfnisse und das Wissen über die Anwesenheitszeiten der Nutzer\*innen erzielt werden kann. Somit ist es möglich durch eine Anpassung der GLT an das Nutzungsverhalten und die Präferenzen der einzelnen Nutzer\*innen den Energiebedarf zu senken, ohne dabei einen Komfortverlust für die Nutzer\*innen zu erwirken.

## **9 FAZIT**

Eine Betriebsoptimierung ist im Idealfall mit detaillierten Daten der Gebäudeleittechnik, einem effektiven Energiemesskonzept und einem konkreten Überblick über das reale Nutzungsverhalten durchzuführen. Da eine nachträgliche Installation eines hochauflösenden Messnetzes nur schwer und mit hohen Kosten einhergehend vollziehbar ist, empfiehlt sich eine Berücksichtigung dieser Anforderungen bei der Planung von neuen Gebäuden (vgl. Fisch/Plessler 2007:155). Für die Optimierung von Bestandsgebäuden bleibt einerseits die Analyse von anlagen- und bautechnischen Defiziten, andererseits die Identifikation vom nutzungsabhängigen Einsparpotential durch ergänzende Beobachtung und Befragungen der Nutzer\*innen. Da ein verbrauchsbezogenes Feedback bezüglich des Verhaltens Einzelner nicht möglich ist, muss auf ein gruppenbezogenes Feedback, entsprechend der Messauflösung, zurückgegriffen werden (also zum Beispiel raumspezifisch für Gruppenbüros).

Für die Abbildung vom Energiebedarf in Abhängigkeit vom, durch Befragungen aufgenommenen, Nutzungsverhalten, kann auf die Berechnung auf Grundlage der DIN V 18599 zurückgegriffen werden. Auch kann daran eine Veränderung des Nutzungsverhaltens für eine Berechnung des damit einhergehenden Einsparpotentials abgebildet werden. Wird der Referenzzeitraum entsprechend klein gewählt, ist eine Abbildung der prozentual möglichen Einsparungen zu erwarten, die den realen Werten nahe kommt. Diese Werte wiederum können dann zur Planung von energetischen Einsparzielen und bei der Durchführung daran anknüpfender Kampagnen zur Einsparung genutzt werden.

Die reine Abstimmung der GLT an die Anwesenheit und die Raum-Solltemperatur ist jedoch eine Aufgabe der Gebäudesteuerung. Intelligent wird das System erst durch die Interaktion mit den Nutzer\*innen. Interaktion kann dann stattfinden, wenn es eine Kommunikationsschnittstelle zwischen den einzelnen Nutzer\*innen und der Gebäudesteuerung gibt. Die Interaktion sollte dabei einen bidirektionalen Austausch von Informationen erlauben. Das bedeutet, dass die Nutzer\*innen einen festgelegten Bereich der Steuerung an ihre Bedürfnisse anpassen können und dass sie über ihr Verhalten eine Rückmeldung durch das System erhalten.

Diese Rückmeldung sollte entsprechend aufbereitet sein und Anreize setzen, das Optimum zwischen den eigenen Bedürfnissen der Nutzer\*innen und dem optimalen Einstellungen aus energetischer Perspektive zu erreichen.

Um dem Anspruch der Interaktion gerecht zu werden und die Informationen attraktiv für die Nutzer\*innen aufzubereiten, arbeitet die Leuphana Universität mit der *Technischen Universität Braunschweig* zusammen. Diese hat die Software *Energie Navigator* entwickelt. Mit dem Energienavigator ist es nicht nur möglich die Gebäudesteuerung zu überwachen, es können auch über einen Webzugang grafisch aufbereitete Daten für die Endnutzer\*innen zur Verfügung gestellt werden. Die Daten sind im Vorfeld modifizierbar, können also durch hinterlegte Rechnungen oder virtuelle Sensoren ergänzt werden (Fisch/Plessner 2013:16f.). Die Daten können auf Messungen der Sensoren, aber auch auf virtuellen Sensoren, wie zum Beispiel der Berechnung der Luftwechselrate (Kapitel 7.7.3), beruhen. Die Daten und Grafiken werden dabei stets durch Zugriff auf die Datenbank der GLT aktualisiert. Die Formulierung und Berücksichtigung individueller Bedürfnisse durch die Nutzer\*innen ist Bestandteil weiterer Forschung des Instituts für Umweltchemie und seiner Kooperationspartner.

## FAZIT

Durch die Extraktion der verhaltensrelevanten Daten aus statischen Berechnungen kann bereits nach der Ausstattung der Bestandsgebäude mit den geplanten Sensorsystemen ein Feedbacksystem und damit auch eine neue Form der Kampagnenarbeit mit anhaltenden Einsparungen aufgenommen werden.

Ziel der Arbeit war die Trennung des Nutzungsverhaltens anhand der Berechnungen vom energetischen Grundbedarf des Gebäudes, um auf diese Weise den Austausch von Informationen zwischen Nutzer\*innen und der Gebäudesteuerung zu ermöglichen (siehe Kapitel 2.3).

Durch die modellhafte Berechnung konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, diese Trennung zu vollziehen. Weiter konnten die verschiedenen Variablen in Abhängigkeit von ihrem Einfluss bewertet und somit relevante Variablen zur Bestimmung des Energiebedarfs identifiziert werden. Die Arbeit kann deshalb als Grundlage zur Bestimmung der Anforderungen an ein Messsystem zur Bestimmung der Eingangsgrößen genutzt werden und führt somit einen Schritt weiter zum intelligenten Gebäudemanagement.

## 10 Quellen

- 18599 Gütegemeinschaft 1. 2013. "18599 Gütegemeinschaft - Qualitätssicherung Für DIN V 18599-Software - Über Uns - 18599siegel.de." Accessed September 14. <http://www.18599siegel.de/ueber-uns/>.
- Abrahamse, W., L. Steg, C. Vlek, and T. Rothengatter. 2005. "A Review of Intervention Studies Aimed at Household Energy Conservation." *Journal of Environmental Psychology* 25 (3) (September): 273–291. doi:10.1016/j.jenvp.2005.08.002.
- Abrahamse, Wokje, and Linda Steg. 2009. "How Do Socio-Demographic and Psychological Factors Relate to Households' Direct and Indirect Energy Use and Savings?" *Journal of Economic Psychology* 30 (5): 711–720.
- Abrahamse, Wokje, Linda Steg, Charles Vlek, and Talib Rothengatter. 2007. "The Effect of Tailored Information, Goal Setting, and Tailored Feedback on Household Energy Use, Energy-Related Behaviors, and Behavioral Antecedents." *Journal of Environmental Psychology* 27 (4) (December): 265–276. doi:10.1016/j.jenvp.2007.08.002.
- "Altbau, Altbausanierung, Altbaumodernisierung, Altbauinstandsetzung Und Denkmalschutz - Balkonsanierung, Fußleistenheizung," 2013. Accessed October 12. <http://www.konrad-fischer-info.de/start.htm#IMP>.
- Appelt, Dieter, Hannes Siege, Reiner Mathar, Dieter Böhn, Ingo Juchler, Klaus Hock, Norbert Klaes, et al. 2007. "Orientierungsrahmen Für Den Lernbereich Globale Entwicklung Im Rahmen Einer Bildung Für Nachhaltige Entwicklung." Edited by Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung.
- Auric, and Elmar. 2012. "Wirtschaftlich Heizen Über Raum Und Zeit: Kontinuierlich Oder Bedarfsangepasst?" *Beisammen.de*. October 30. <http://www.beisammen.de/board/index.php?page=Thread&threadID=113370>.
- AUVA, ed. "Lüftung Am Arbeitsplatz." *Sicherheit Kompakt M910 (HUB - M 910 - 0706)*. [http://www.auva.at/mediaDB/MMDB115767\\_M910.pdf](http://www.auva.at/mediaDB/MMDB115767_M910.pdf).
- Berkhout, Peter H.G., Jos C. Muskens, and Jan W. Velthuisen. 2000. "Defining the Rebound Effect." *Energy Policy* 28 (6–7) (June): 425–432. doi:10.1016/S0301-4215(00)00022-7.

- Beyer, Marius, Eva Freund, and Nils Grün. 2008. "Klimaneutrale Universität." [https://www.leuphana.de/fileadmin/user\\_upload/uniprojekte/Nachhaltigkeitsportal/files/Klimaneutrale\\_Leuphana\\_\\_WS\\_0708.pdf](https://www.leuphana.de/fileadmin/user_upload/uniprojekte/Nachhaltigkeitsportal/files/Klimaneutrale_Leuphana__WS_0708.pdf).
- Bienhüls, Jörg. 2009. "Abschlussbericht Der Stadt Lörrach zumProjekt: Einsatz Der DIN V 18599 Für dieSanierungsplanung an 9 Schulen in Lörrachund in Zell i.W.". Lörrach.
- BMVBS 1. 2013. "Leitfaden Nachhaltiges Bauen." Edited by Bundesministerium für Verkehr,Bau und Stadtentwicklung (BMVBS). [www.nachhaltigesbauen.de](http://www.nachhaltigesbauen.de).
- BMVBS 2. 2013. "Informationsportal Nachhaltiges Bauen: Leitfäden Und Arbeitshilfen / Veröffentlichungen - Veröffentlichungen DIN 18599." <http://www.nachhaltigesbauen.de/leitfaeden-und-arbeitshilfen-veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-din-18599.html>.
- Brasche, and Bischof. "Datenauswertungen Zur Raumklimabeurteilung in Abhängigkeit von Thermischen Und Chemischen Messwerten Der Raumluftqualität Und Zum Lüftungsverhalten von Wohnungsnutzern." INNOSEG. Jena: Universitätsklinikum Jena, Institut für Arbeits-, Sozial-, Umweltmedizin und Hygiene, Arbeitsgruppe Raumklimatologie (ark). [http://www.fh-erfurt.de/fhe/index.php?eID=tx\\_nawsecuredl&u=0&file=fileadmin/Material/Institut/IBIT/Anlage.PDF&t=1382818764&hash=3038c33989a54fc07eab1e5c43304ab4](http://www.fh-erfurt.de/fhe/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&file=fileadmin/Material/Institut/IBIT/Anlage.PDF&t=1382818764&hash=3038c33989a54fc07eab1e5c43304ab4).
- Brischke, Lars-Avid, and Laura Spengler. 2011. "Ein Fall Für Zwei: Effizienz Und Suffizienz." *Politische Ökologie* 126 (29): 86–93.
- Brüggen, Irmhild. 2011. "Nachhaltigkeitsbericht Leuphana Universität 2011."
- Brundtland, Gro Harlem. 1987. Report of the World Commission on Environment and Development:" Our Common Future." United Nations.
- DIN 1. 2011. "DIN V 18599-1 2011-12 - Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung Des Nutz-, End- Und Primärenergiebedarfs Für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser Und Beleuchtung - Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung Und Bewertung Der Energieträger." Edited by DIN - Deutsches Institut für Normen e.V. Beuth.
- DIN 10. 2011. "DIN V 18599-10 2011-12 - Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung Des Nutz-, End- Und Primärenergiebedarfs Für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser Und Beleuchtung - Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten." Edited by DIN - Deutsches Institut für Normen e.V. Beuth.

- DIN 2. 2011. "DIN V 18599-2 2011-12 - Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung Des Nutz-, End- Und Primärenergiebedarfs Für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser Und Beleuchtung - Teil 2: Nutzenergiebedarf Für Heizen Und Kühlen von Gebäudezonen." Edited by DIN - Deutsches Institut für Normen e.V. Beuth.
- Effertz, Michael. 2013. "Cofely FA\_Präsentation - Einzelraumregelung.pdf."
- Elberspächer, and von Reden. 2006. Umhegt Oder Abhängig?: Der Mensch in Einer Digitalen Umgebung. Berlin ; New York: Springer.
- Encarnação, José Luis. 2006. "Die Bunte Welt Der 'Ambient Intelligence.'" In Umhegt Oder Abhängig?: Der Mensch in Einer Digitalen Umgebung, 3–35. Berlin ; New York: Springer.
- Fisch, Norbert, and Stefan Plesser. 2007. "EVA – Evaluierung von Energiekonzepten Für Bürogebäude". Braunschweig: Technische Universität. [https://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/igs/Projektarchiv/abschlussbericht\\_eva.pdf](https://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/igs/Projektarchiv/abschlussbericht_eva.pdf).
- Fischer, Corinna. 2008. "Feedback on Household Electricity Consumption: A Tool for Saving Energy?" Energy Efficiency 1 (1) (February 1): 79–104. doi:10.1007/s12053-008-9009-7.
- Fischer, Konrad. 2013. "EnEV-Befreiung § 25/ Ausnahme 24: Heizung & Wärmedämmung, Nachtabsenkung, Nachtabschaltung, Brennwert-Heizung." <http://www.konrad-fischer-info.de/7temp24.htm>.
- Fitzner, Klaus, and Ulrich Finke. 2012. Lüftungsregeln für freie Lüftung. Dortmund; Berlin; Dresden: bauh.
- FIZ 1: Fachinformationszentrum Karlsruhe. 2013. "EnOB: Neubau." Forschung Für Energieoptimiertes Bauen: Neubau. Accessed June 29. <http://www.enob.info/de/neubau/>.
- FIZ 2. 2013. "Forschung Für Energieoptimiertes Bauen: EnOB: Forschungsinitiative Im Detail." Accessed June 29. <http://www.enob.info/de/forschungsfelder/enob-forschungsinitiative-im-detail/>.

- FIZ 3. 2013. "Forschung Für Energieoptimiertes Bauen: Programm Und Förderung." Accessed June 29. <http://www.enob.info/de/forschungsfelder/enob-forschungsinitiative-im-detail/programm-und-foerderung/>.
- "Folgend Wird Deshalb Eine Berechnung Mit Dem Deutlich Geringeren Luftwechselrate von 0,3h<sup>-1</sup> Durchgeführt. Die Werte Ents."
- Fraunhofer IBP. 2013. "Fraunhofer IBP - Presse Mitteilung Vom 16.06.11." September 15. [http://www.ibp.fraunhofer.de/de/Presse\\_und\\_Medien/Presseinformationen/Rechenprogramm.html](http://www.ibp.fraunhofer.de/de/Presse_und_Medien/Presseinformationen/Rechenprogramm.html).
- Frenner, Heike. 2013. "Krank! Auf Ins Büro Oder Doch Im Bett Bleiben?" Karriere.blog. April 10. <http://www.karriere.at/blog/krank-auf-ins-buero-oder-doch-im-bett-bleiben.html>.
- Ganslandt, Rüdiger, and Harald Hofmann. 1992. Handbuch der Lichtplanung. Braunschweig; Wiesbaden: Vieweg.
- Gardner, Gerald T, and Paul C Stern. 2002. Environmental Problems and Human Behavior. Boston, MA: Pearson Custom Pub.
- Geffken, Jan. 2013. "Hottgenroth En - Standardeinstellungen - Nutzungsprofil Nach DIN V 18599 Berechnung." Edited by Hottgenroth Software GmbH & Co. KG. Anhang.
- Grote, Stefan. 2013. "Daemmen Und Sanieren: Start." <http://www.daemmen-sanieren.de/fileadmin/DAM/Energie/waermespeicherung.pdf>.
- Gruber, Peter, Markus Gwerder, and Jürg Tödtli. 2002. Modellprädiktive Regelung Für Heizungsanwendungen. SGA-ASSPA-Bulletin. [http://www.opticontrol.ethz.ch/Lit/Grub\\_02\\_Bull-SGA\\_34\\_7.pdf](http://www.opticontrol.ethz.ch/Lit/Grub_02_Bull-SGA_34_7.pdf).
- Gütegemeinschaft 18599. 2013. "18599 Gütegemeinschaft - Qualitätssicherung Für DIN V 18599-Software - Startseite - 18599siegel.de." 18599 Gütegemeinschaft 2. <http://www.18599siegel.de/>.
- Himburg, Stefan. 2011. "Energetische Bilanzierung von Wohngebäuden nach DIN V 18599." Bauphysik 33 (2) (April): 99–110. doi:10.1002/bapi.201110012.
- Hok, A. 2012. "Sinn Und Unsinn Der Nachtabenkung Bei Der Wohnraumheizung." Ahok.de. <http://www.ahok.de/dt/Nachtabenkung.html#LINKS>.
- Hottgenroth Software GmbH & Co. KG. 2012. Energieberater 18599 3D Plus (version 7.4.0). Köln: Hottgenroth Software GmbH & Co. KG. [Hottgenroth.de](http://Hottgenroth.de).

- Hottgenroth Software GmbH & Co. KG. 2013. "Gebäude-Simulation 3D PLUS - Hottgenroth Software GmbH & Co. KG." <https://shop.hottgenroth.de/Shop/Details/Geb%c3%a4ude-Simulation%203D%20PLUS.html,1303,1,0,373,0>.
- Houwelingen, Jeannet H. van, and W. Fred van Raaij. 1989. "The Effect of Goal-Setting and Daily Electronic Feedback on In-Home Energy Use." *Journal of Consumer Research* 16 (1) (June 1): 98–105.
- Huber, Joseph. 2000. "Industrielle Ökologie: Konsistenz, Effizienz und Suffizienz in zyklusanalytischer Betrachtung". Monograph. 16. <http://www.ssoar.info/ssoar/handle/document/12162>.
- Hunecke, Marcel. 2008. "Möglichkeiten und Chancen der Veränderung von Einstellungen und Verhaltensmustern in Richtung einer Nachhaltigen Entwicklung." In *Nachhaltigkeit als radikaler Wandel*, edited by Hellmuth Lange, 95–121. VS Verlag für Sozialwissenschaften. [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-531-90956-1\\_5](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-531-90956-1_5).
- Hutter, Hans-Peter, Hanns Moshhammer, Peter Wallner, Ruth Baumann, Jürgen Schneider, T. Tappler, Silvia Baldinger, Georg Palmisano, and Michael Kundi. 2002. "B) Ziele Und Aufgaben Des Arbeitskreises Innenraumluft." *Mitteilungen Der Sanitätsverwaltung* 103 (1): 3–6.
- International Energy Agency. 2012. *World Energy Outlook 2012*. Paris, France: International Energy Agency.
- Kappert, Michael, Christian Prechtel, Uwe Röther, Sebastian Rabe, and und weitere (unbekannt). 2007. "Interdisziplinäre, Nutzerorientierte, Nachhaltige Optimierung von Stoff- Und Energieflüssen in Gebäuden -INNOSEG". Erfurt: Institut für bauwerksintegrierte Technologie der FH Erfurt. <http://www.fh-erfurt.de/fhe/ibit/projekte/innoseg/schlussbericht/>.
- Kempa, Ingo, Irene Krauß, Jörg Lengler, and Ole Hildebrand. 2010. "Klimaneutrale Campusentwicklung Leuphana Universität Lüneburg - Energetische Potentialanalyse Zur Sanierung Bestand". Hamburg. Lüneburg.
- Kläs, Christoph, and Christoph Kläs. 2010. *Die Messung von Einstellungen in der Konsumentenforschung*. GRIN Verlag.

- Kluttig, Heike, Andreas Dirscherl, and Hans Erhorn. 2001. "Energieverbräuche von Bildungsgebäuden in Deutschland". Stuttgart. [http://archiv.ensan.de/publikationen/pdf/doku\\_bildungsgebaeude.pdf](http://archiv.ensan.de/publikationen/pdf/doku_bildungsgebaeude.pdf).
- Knierim, Rudolf. 2007. "Rücklauftemperatur: Ungehobener Schatz Für Versorger Und Kunden - Weitere Erlöse aus Ungenutzter Wärmeenergie." Euro Heat & Power 36 (3). Fachthema Wärmeverteilung: 56–65.
- Koch, Andreas, and Daniel Zech. 2011. "Suffizienz, Effizienz, Konsistenz. Energienutzung in Haushalten" presented at the Berliner Energietage, Berlin. [http://www.uni-stuttgart.de/nachhaltigerkonsum/de/Downloads/Suffizienz\\_Effizienz\\_Konsistenz.pdf](http://www.uni-stuttgart.de/nachhaltigerkonsum/de/Downloads/Suffizienz_Effizienz_Konsistenz.pdf).
- Koralewski, Hans Eberhard. 2006. "Energiehaushalt Und Temperaturregulation-Wärmehaushalt Und Temperaturregulation." [http://www.charite.de/klinphysio/bioinfo/2\\_p-skripten/b4\\_b\\_waermehaushalt.pdf](http://www.charite.de/klinphysio/bioinfo/2_p-skripten/b4_b_waermehaushalt.pdf).
- Leuphana 1. 2013. "Leuphana Universität Lüneburg: Über Uns." Leuphana Universität Lüneburg. November. <http://www.leuphana.de/ueber-uns.html>.
- Leuphana 2. 2013. "Forschung Für Energieeffizienz: Projekt: EnEff:Campus: Klimaneutraler Campus Leuphana Universität Lüneburg." Eneff-Stadt.info. <http://www.eneff-stadt.info/de/pilotprojekte/projekt/details/eneffcampus-klimaneutraler-campus-leuphana-universitaet-lueneburg/>.
- Leuphana Universität 3. 2011. "Wärmeabgabe Leuphana Universität 2007-2011 - Hauptcampus." Internes Dokument.
- Maas, Anton. 1995. "Experimentelle Quantifizierung Des Luftwechsels Bei Fensterlüftung". Kassel. [http://www.uni-kassel.de/fb6/bpy/de/forschung/abgeschlprojekte/pdfs/maas\\_diss.pdf](http://www.uni-kassel.de/fb6/bpy/de/forschung/abgeschlprojekte/pdfs/maas_diss.pdf).
- Martiskainen, Mari. 2007. "Affecting Consumer Behaviour on Energy Demand." Sussex: SPRU—Science and Technology Policy Research 81. <http://www.sussex.ac.uk/sussexenergygroup/documents/seg-consumer-behaviour-final-report.pdf>.
- Matthies, Ellen. 2008. "Change - Veränderung Nachhaltigkeitsrelevanter Routinen in Organisationen."

- McCalley, L.T, and Cees J.H Midden. 2002. "Energy Conservation through Product-Integrated Feedback: The Roles of Goal-Setting and Social Orientation." *Journal of Economic Psychology* 23 (5) (October):589–603. doi:10.1016/S0167-4870(02)00119-8.
- Münzenberg, Tino, Tino Weithaas, and Jörg Thumulla. 2003. "Luftwechsel Im Gebäudebestand- Natürlicher Luftwechsel, Fensterlüftung Und Die Notwendigkeit von Lüftungskonzepten." In Stuttgart.
- Nischkauer, Hans. 2005. "Temperaturabhängigkeit Des Strom- Und Gasverbrauchs". Working Paper 15. Wien: Energie-Control GmbH. [http://www.e-control.at/portal/page/portal/medienbibliothek/strom/dokumente/pdfs/WP15\\_TEMPVE R\\_DOKU.pdf](http://www.e-control.at/portal/page/portal/medienbibliothek/strom/dokumente/pdfs/WP15_TEMPVE R_DOKU.pdf).
- Opel, Oliver. 2012. "Zwischenbericht Klimaneutraler Campus Scharnhorststraße/ Bockelsberg". Lüneburg.
- Opel, Oliver, Julia Fisman, Jan Geffken, Birte Hensen, Friedrich Laatz, Mario Majic, Albert Regenbrecht, et al. 2013. "NaCaVi Transdisziplinärer Projektbericht". Lüneburg: Institut für Nachhaltige Chemie und Umweltchemie.
- Oschatz, Prof., Dr. Hartmann, Dr. Werdin, and Prof. Felsmann. 2011. "Gesamtanalyse Energieeffizienz von Hallengebäuden - Abschlussbericht". Aktenzeichen: SF–10.08.18.7 – 09.45 / II 3 – F20-09-047. Dresden: ITG Dresden, Universität Kassel: GAEEH. [http://www.systemvergleich-hallenheizung.de/GAEEH\\_Endbericht\\_BERICHT.pdf](http://www.systemvergleich-hallenheizung.de/GAEEH_Endbericht_BERICHT.pdf).
- Owens, Susan, and Louise Driffill. 2008. "How to Change Attitudes and Behaviours in the Context of Energy." *Energy Policy* 36 (12) (December): 4412–4418. doi:10.1016/j.enpol.2008.09.031.
- Pfafferott, Jens, and Karsten Voss. 2002. "Bürogebäude Vermessungsbüro Lamparter in Weilheim - Thermisches Gebäudeverhalten". TOS-EB-JPt-02-04. Stuttgart: Fraunhofer Institut - Solare Energiesysteme.
- Plesser, Stefan, and Claas Pinkernell. 2013. "Energie- Und Qualitätsmanagement Mit Dem Energie-Navigator" Braunschweig.
- Pompe, Bernd. 2012. "Wärme - Energie" presented at the Wärmemenge und Temperatur, August 11, Institut für Physik -Ernst Moritz Arndt Universität Greifswald.

<http://www2.physik.uni-greifswald.de/~pompe/UP-VORLESUNG/up-waerme-energie.pdf>.

Raw, Garry J., and David I. Ross. 2011. "Energy Demand Research Project: Final Analysis". Report. London, UK: Office of Gas and Electricity Markets. <http://www.ofgem.gov.uk/Pages/MoreInformation.aspx?docid=21&refer=Sustainability/EDRP>.

Ris, Hans Rudolf. 2009. "Nicht Nur Dämmen, Auch Automatisieren - Gebäudeautomation Spart Energie." HK-Gebäudetechnik (6|09) (June): 54–57.

Rost, Jürgen, Andrea Lauströer, and Ninja Raack. 2003. "Kompetenzmodelle Einer Bildung Für Nachhaltigkeit." Praxis Der Naturwissenschaften - Chemie in Der Schule (52 (2003) 8). Praxis Der Naturwissenschaften - Chemie in Der Schule: 10–15.

Schahn, Joachim. 2007. "Projekt Energiemanagement Am Psychologischen Institut Der Universität Heidelberg: Ein Erfolgreicher Fehlschlag." Umweltpsychologie 11 (2): 138–163.

Schramek, Ernst-Rudolf, and Hermann Recknagel. 2009. Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 09/10: einschließlich Warmwasser- und Kältetechnik. München: Oldenbourg Industrieverlag.

Schulz, Holger. 2013. "Arbeitstage pro Jahr (2012, 2013, 2014 ...)." October 22. <http://www.schnelle-online.info/Arbeitstage-pro-Jahr.html>.

Solomon, Michael R, Gary J Bamossy, and Søren Askegaard. 2007. Konsumentenverhalten der europäische Markt. München: Pearson Studium.

Statistisches Bundesamt. 2012. "Qualität Der Arbeit - Krankheitstage Je Beschäftigten in Arbeitstagen pro Jahr - Statistisches Bundesamt (Destatis)." Destatis. [https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Indikatoren/QualitaetArbeit/\\_Grafik/2\\_3\\_Krankenstand.html](https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Indikatoren/QualitaetArbeit/_Grafik/2_3_Krankenstand.html).

Statistisches Bundesamt. 2013. "Statistisches Bundesamt Deutschland - GENESIS-Online". Text. Statistisches Bundesamt. October 22. [https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/data;jsessionid=42D2A63BD3649EA9B6E7C628483690F9.tomcat\\_GO\\_2\\_1?op](https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/data;jsessionid=42D2A63BD3649EA9B6E7C628483690F9.tomcat_GO_2_1?op)

eration=abruftabelleBearbeiten&levelindex=2&levelid=1382478689105&auswahloperation=abruftabelleAuspraegungAuswahlen&auswahlverzeichnis=ordnungsstruktur&auswahlziel=werteabruf&selectionname=810000050&auswahltext=&werteabruf=Werteabruf.

Strietzel. 2011a. "C12\_Og2\_A3\_200\_Bemassung". Leuphana Universität Lüneburg.

Strietzel. 2011b. "C13\_Og2\_A3\_200\_Bemassung". Leuphana Universität Lüneburg.

Urlaub, Susanne, Runa Tabea Hellwig, Christoph van Treeck, and Klaus Sedlbauer. 2010. "Möglichkeiten Und Grenzen Bei Der Modellierung von Einflussfaktoren Auf Die Menschliche Leistungsfähigkeit." *Bauphysik* 32 (6): 373–379.

Vlek, Charles, and Linda Steg. 2007. "Human Behavior and Environmental Sustainability: Problems, Driving Forces, and Research Topics." *Journal of Social Issues* 63 (1) (March): 1–19. doi:10.1111/j.1540-4560.2007.00493.x.

Welge, Ralph, Alexander Kujath, and Oliver Opel. 2010. "Integrating Mobile Devices into AAL-Environments Using Knowledge Based Assistance Systems." In *Telecommunications: The Infrastructure for the 21st Century (WTC)*, 2010, 1–6.

Wolff, Dieter. 2013. "Heizungsregelung - Energiesparend Und Umweltschonend." <http://www.delta-q.de/export/sites/default/de/downloads/heizungsregelung.pdf>.

Wortmann, Klaus. 2009. "Energiesparen - Das Energiebewusstsein im Spiegel des Umweltbewusstseins." In *Enzyklopädie der Psychologie: Umweltpsychologie*. Hogrefe Verl. für Psychologie. <http://www.uni-kassel.de/fb4/psychologie/personal/lantermann/umwelt/energiesparen.pdf>.

## 11 Anhang

## Anhang A

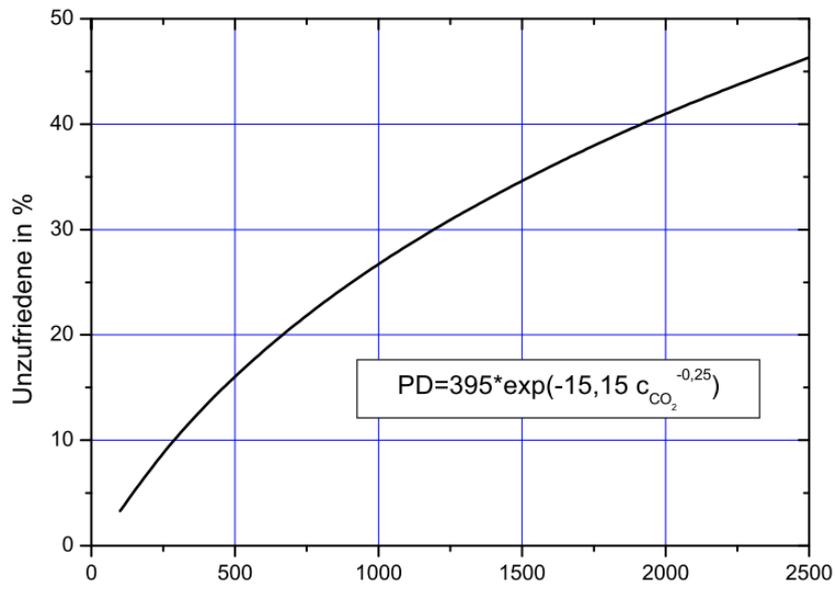
— Vornorm —

DIN V 18599-10:2011-12

Tabelle A.1 — Nutzung Einzelbüro

Einzelbüro		Nr. 1	
<b>Nutzungszeiten</b>		von	bis
tägliche Nutzungszeit	Uhr	7:00	18:00
jährliche Nutzungstage $d_{\text{Nutz,a}}$	d/a	250	
jährliche Nutzungsstunden zur Tagzeit $t_{\text{Tag}}$	h/a	2543	
jährliche Nutzungsstunden zur Nachtzeit $t_{\text{Nacht}}$	h/a	207	
tägliche Betriebszeit RLT und Kühlung	Uhr	5:00	18:00
jährliche Betriebstage für jeweils RLT, Kühlung und Heizung $d_{\text{op,a}}$	d/a	250	
tägliche Betriebszeit Heizung	Uhr	5:00	18:00
<b>Raumkonditionen (sofern Konditionierung vorgesehen)</b>			
Raum-Solltemperatur Heizung $\theta_{i,h,\text{soll}}$	°C	21	
Raum-Solltemperatur Kühlung $\theta_{i,c,\text{soll}}$	°C	24	
Minimaltemperatur Auslegung Heizung $\theta_{i,h,\text{min}}$	°C	20	
Maximaltemperatur Auslegung Kühlung $\theta_{i,c,\text{max}}$	°C	26	
Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb $\Delta\theta_{i,NA}$	K	4	
Feuchteanforderung	–	mit Toleranz	
<b>Mindestaußenluftvolumenstrom <math>\dot{V}_A</math></b>			
personenbezogen	m <sup>3</sup> je Stunde und Person	40	
flächenbezogen	m <sup>3</sup> /(h · m <sup>2</sup> )	4	
Mindestaußenluftvolumenstrom für Gebäude $\dot{V}_A \text{ Geb}$	m <sup>3</sup> /(h · m <sup>2</sup> )	2,5	
Relative Abwesenheit RLT $c_{\text{RLT}}$	–	0,3	
Teilbetriebsfaktor der Gebäudebetriebszeit $F_{\text{RLT}}$	–	0,7	
<b>mech. Außenluftvolumenstrom bzw. Luftwechsel (Praxis)</b>		von	bis
Luftwechsel (allgemein)	h <sup>-1</sup>	2	3
Luftwechsel (volle Kühlfunktion über Zuluft)	h <sup>-1</sup>	4	8
<b>Beleuchtung</b>			
Wartungswert der Beleuchtungsstärke $\bar{E}_m$	lx	500	
Höhe der Nutzebene $h_{\text{Ne}}$	m	0,8	
Minderungsfaktor $k_A$	–	0,84	
relative Abwesenheit $C_A$	–	0,3	
Raumindex $k$	–	0,9	
Minderungsfaktor Gebäudebetriebszeit $F_t$	–	0,7	
<b>Personenbelegung</b>			
maximale Belegungsdichte		gering	mittel
m <sup>2</sup> je Person		18	14
<b>Interne Wärmequellen</b>			
		Vollnutzungs- stunden (h/d)	max. spezifische Leistung (W/m <sup>2</sup> ) tief
Personen (70 W je Person)		6	4
Arbeitshilfen <sup>a</sup>		6	3
			mittel
			hoch
Wärmezufuhr je Tag ( $q_{i,p} + q_{i, \text{fac}}$ )	Wh/(m <sup>2</sup> · d)	42	72
			132
<b>Automationsgrad</b>			
		D	C
Summand Automation $\Delta\theta_{\text{EMS}}$	K	0	0
Faktor adaptives Anheizen $f_{\text{adapt}}$	–	1	1
			B
			A
			-0,5
			-1
			1,35
			1,35
<sup>a</sup> tief/mittel/hoch entspricht 50/100/150 W je Person für Arbeitshilfen			

**Anhang B**



**Abbildung 19: Unzufriedenheit mit dem Raumklima in Abhängigkeit von der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft (Fitzner/Finke 2012:8)**

Anhang C

Tabelle 8: Berechnungen des Endenergiebedarfs (Software: Energieberater 3D Plus)

Teil 1	Raumtemperatur °C	Endenergiebedarf				Anderung Endenergie (pro °C)			Nutzenergiebedarf			Primärenergiebedarf			Energiekosten (inkl. Betriebskosten)		
		kWh	ΔkWh	% zu Ist-Zustand	%	kWh	ΔkWh	% zu Ist-Zustand	kWh	ΔkWh	% zu Ist-Zustand	Euro	% zu Ist-Zustand	Einsparung [€] zu 21°C			
Mit Temperaturabsenkung:																	
51.95wh/m²d -10h	19	6944	-1213	-14,87	0	5230	-1013	-16,23	1292	-40	-3	658	-10,84	-80			
51.95wh/m²d -10h	20	7530	-627	-7,69	8,44	5715	-528	-8,46	1309	-23	-1,73	696	-5,69	-42			
Ist-Zustand:212d/a; -4°C;10h/d Vollzeitstelle	21	8157	0	0	8,33	6243	0	0	1332	0	0	738	0	0			
51.95wh/m²d -10h	22	8824	667	8,18	8,18	6797	554	8,87	1353	21	1,58	781	5,83	43			
51.95wh/m²d -10h	23	9701	1544	18,93	9,94	7598	1355	21,7	1384	52	3,9	839	13,69	101			
51.95wh/m²d -10h	24	10235	2078	25,48	5,5	7983	1740	27,87	1387	55	4,13	873	18,29	135			
						6243	0	0						-738			
Intermetierendes Lüften 0,3/h	21	7829	-328	-4,02		5946	-297	-4,76	1321	-11	-0,83	716	-2,98	-22			
Halbe Stelle 6h/d	21	7479	-678	-8,31		5851	-392	-6,28	1320	-12	-0,9	694	-5,96	-44			
Halbe Stelle 6h/d; 0,8/h	21	7472	-685	-8,4	-0,09	5771	-472	-7,56	1316	-16	-1,2	693	-6,1	-45			
Wärmequellen (3 Personen)	21	7672	-485	-5,95		5828	-415	-6,65	1323	-9	-0,68	706	-4,34	-32			
Durchschnittliche Änderung pro °C [%]					8,08												
DIN V 18599 - Einzelbüro (original): Standard 250d/a; -4°C; 30Wh/m²d	21	8557	400	4,9		6489	246	3,94	1336	4	0,3	763	3,39	25			
Ohne Temperaturabsenkung 212 Tage / Jahr:																	
ohne NA & WE- Absenkung	19	7865	-1397	-15,08	0	6020	-1174	-16,32	1305	-46	-3,4	718	-11,25	-91			
ohne NA & WE- Absenkung	20	8536	-726	-7,84	8,53	6588	-606	-8,42	1328	-23	-1,7	762	-5,81	-47			
Ist-Zustand ohne Absenkung:	21	9262	0	0	8,51	7194	0	0	1351	0	0	809	0	0			
ohne NA & WE- Absenkung	22	10013	751	8,11	8,11	7824	630	8,76	1373	22	1,63	858	6,06	49			
ohne NA & WE- Absenkung	23	10790	1528	16,5	7,76	8479	1285	17,86	1394	43	3,18	909	12,36	100			
ohne NA & WE- Absenkung	24	11567	2305	24,89	7,2	9149	1955	27,18	1398	47	3,48	959	18,54	150			
Durchschnittliche Änderung pro °C [%]					8,02												

Teil 2	Raumtemperatur °C	CO2-Emissionen			Transmission			Lüftungsverluste			Heizungsverluste		
		kg/a	Δ kg	% zu Ist-Zustand	kWh	ΔkWh	% zu Ist-Zustand	kWh	ΔkWh	% zu Ist-Zustand	kWh	ΔkWh	% zu Ist-Zustand
Mit Temperaturabsenkung:													
51.95wh/m²d -10h	19	2192	-5965	0	5361	5352,67	-16,68	1110	1110	-16,73	1713	1713	-10,5
51.95wh/m²d -10h	20	2192	-5965	0	5897	5888,67	-8,35	1221	1221	-8,4	1914	1914	0
Ist-Zustand:212d/a; -4°C;10h/d Vollzeitstelle	21	2192	-5965	0	6434	6425,67	0	1333	1333	0	1914	1914	0
51.95wh/m²d -10h	22	2404	-5753	9,67	6975	6966,67	8,41	1445	1445	8,4	2027	2027	5,9
51.95wh/m²d -10h	23	2681	-5476	22,31	7521	7512,67	16,89	1950	1950	46,29	2103	2103	9,87
51.95wh/m²d -10h	24	2856	-5301	30,29	8066	8057,67	25,37	1670	1670	25,28	2252	2252	17,66
Intermetierendes Lüften 0,3/h	21	2089	-6068	-4,7	6435	6426,67	0,02	1025	1025	-23,11	1883	1883	-1,62
Halbe Stelle 6h/d	21	1974	-6183	-9,95	6309	6300,67	-1,94	941	941	-29,41	1628	1628	-14,94
Halbe Stelle 6h/d; 0,8/h	21	1973	-6184	-9,99	6352	6343,67	-1,27	833	833	-37,51	1701	1701	-11,13
Wärmequellen (3 Personen)	21	2036	-6121	-7,12	6434	6425,67	0	1333	1333	0	1844	1844	-3,66
DIN V 18599 - Einzelbüro (original): Standard 250d/a; -4°C; 30Wh/m²d	21	2322	-5835	5,93	6558	6549,67	1,93	1467	134	10,05	2067		7,99
Ohne Temperaturabsenkung 212 Tage / Jahr:													
ohne NA & WE- Absenkung	19	2106	-7156	-17,38	6434	6425,49	-11,51	1235	1235	-16,61	1845	1845	-10,78
ohne NA & WE- Absenkung	20	2319	-6943	-9,02	6667	6658,49	-8,31	1358	1358	-8,31	1948	1948	-5,8
Ist-Zustand ohne Absenkung:	21	2549	-9718	0	7211	7202,49	0	1471	1471	0	2108	2108	0
ohne NA & WE- Absenkung	22	2788	-6474	9,38	7875	7866,49	8,31	1604	1604	8,31	2189	2189	5,85
ohne NA & WE- Absenkung	23	3036	-6226	19,11	8478	8469,49	16,6	1728	1728	16,68	2311	2311	11,75
ohne NA & WE- Absenkung	24	3290	-5972	29,07	9082	9073,49	24,91	1851	1851	24,98	2418	2418	16,92

**Anhang D**

**Ergebnisse Softwareauswertung**

# Energieberatungsbericht

Gebäude:

Auftraggeber: Herr  
Jan Geffken  
Dorfstraße 12  
23730 Sierksdorf/ Roge

Erstellt von: Jan

Erstellt am: 10. September 2013

## Allgemeine Angaben zum Gebäude

### Objekt:

### Beschreibung:

Gebäudetyp: Nichtwohngebäude  
Baujahr: 1900

**Beheiztes Volumen  $V_g$ :** 72 m<sup>3</sup>

Das beheizte Volumen wurde gemäß EnEV unter Verwendung von Außenmaßen ermittelt.

**Luftvolumen  $V$ :** 58 m<sup>3</sup>

**Nettogrundfläche  $A_{NGF}$ :** 19,25 m<sup>2</sup>

### Verbrauchsangaben:

Der Berechnung dieses Berichts wurde das EnEV-Standard-Nutzerverhalten und die Standard-Klimabedingungen für Deutschland zugrunde gelegt. Daher können aus den Ergebnissen keine Rückschlüsse auf die absolute Höhe des Brennstoffverbrauchs gezogen werden.

# Ist-Zustand des Gebäudes

## Gebäudehülle

In der folgenden Tabelle finden Sie eine Zusammenstellung der einzelnen Bauteile der Gebäudehülle mit ihren momentanen U-Werten.

Bauteil	U-Wert in W/m <sup>2</sup> K
Decke EG-2	0,97
AT 001	2,40
AW 001	0,37
AW 002	0,37
AW 003	0,37
AW 004	0,37
F 001	1,30
F 002	1,30
F 003	1,30
Bodenplatte EG-1	0,34

## Anlagentechnik

### Heizung:

Bereich Heizwärme-Erzeugung 1  
Zentralheizung - Nah-/Fernwärme von 1990 - Nennleistung 6,86 kW  
Energieträger: Kraft-Wärme-Kopplung, regenerativ

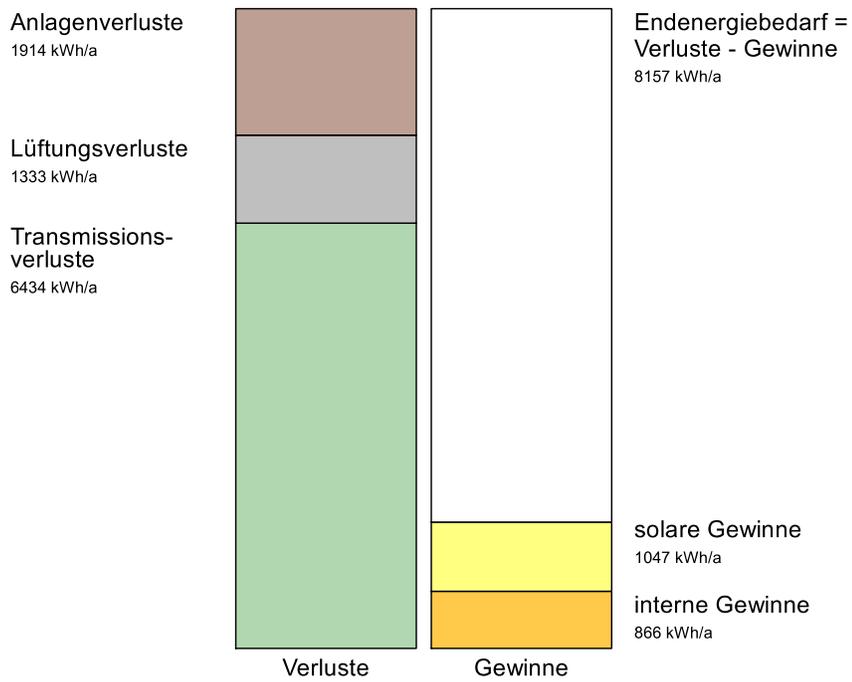
### Warmwasser:

Kein TWW-Kreis vorhanden

## Energiebilanz

Energieverluste entstehen über die Gebäudehülle, durch den Luftwechsel sowie bei der Erzeugung und Bereitstellung der benötigten Energie.

In dem folgenden Diagramm ist die Energiebilanz für die Raumwärme aus Wärmegewinnen und Wärmeverlusten der Gebäudehülle und der Anlagentechnik dargestellt.



## **Vorschläge für die energetische Modernisierung**

### **Variante 1 : Halbe Stelle 6h/d**

#### **Modernisierung der Gebäudehülle**

keine Maßnahme

#### **Anlagentechnik**

##### **Heizung:**

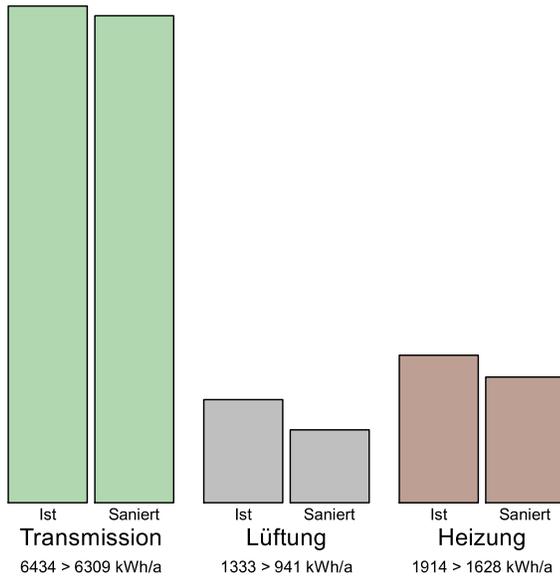
Bereich	Heizwärme-Erzeugung 1
Zentralheizung	- Nah-/Fernwärme von 1990 - Nennleistung 6,86 kW Energieträger: Kraft-Wärme-Kopplung, regenerativ

##### **Warmwasser:**

Kein TWW-Kreis vorhanden

## Einsparung

Nach Umsetzung aller vorgeschlagenen Maßnahmen reduziert sich der Endenergiebedarf Ihres Gebäudes um 8 %. Den Einfluss auf die Wärmeverluste über die einzelnen Bauteile und die Heizungsanlage zeigt das folgende Diagramm.



Der derzeitige Endenergiebedarf von 8157 kWh/Jahr reduziert sich auf 7479 kWh/Jahr. Es ergibt sich somit eine Einsparung von 678 kWh/Jahr, bei gleichem Nutzerverhalten und gleichen Klimabedingungen.

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen werden um 219 kg CO<sub>2</sub>/Jahr erhöht. Dies wirkt sich negativ auf den Treibhauseffekt aus und schadet unserem Klima.

## Vorschläge für die energetische Modernisierung Variante 2 : Lüftung Stoßweise auf Kipp (0,3/h)

### Modernisierung der Gebäudehülle

keine Maßnahme

### Anlagentechnik

#### Heizung:

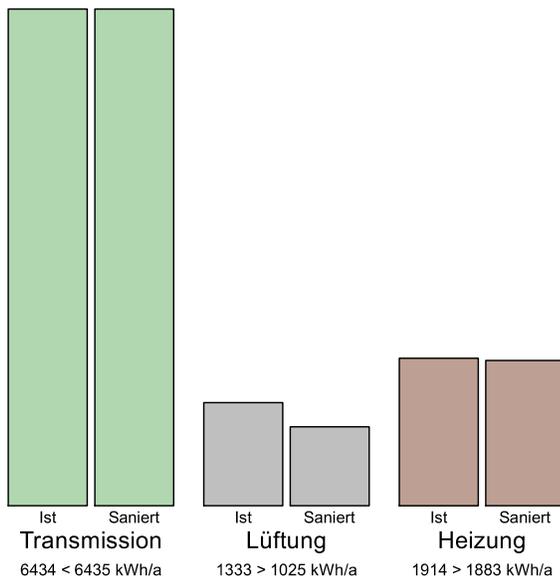
Bereich Heizwärme-Erzeugung 1  
Zentralheizung - Nah-/Fernwärme von 1990 - Nennleistung 6,86 kW  
Energieträger: Kraft-Wärme-Kopplung, regenerativ

#### Warmwasser:

Kein TWW-Kreis vorhanden

## Einsparung

Nach Umsetzung aller vorgeschlagenen Maßnahmen reduziert sich der Endenergiebedarf Ihres Gebäudes um 4 %. Den Einfluss auf die Wärmeverluste über die einzelnen Bauteile und die Heizungsanlage zeigt das folgende Diagramm.



Der derzeitige Endenergiebedarf von 8157 kWh/Jahr reduziert sich auf 7829 kWh/Jahr. Es ergibt sich somit eine Einsparung von 328 kWh/Jahr, bei gleichem Nutzerverhalten und gleichen Klimabedingungen.

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen werden um 104 kg CO<sub>2</sub>/Jahr erhöht. Dies wirkt sich negativ auf den Treibhauseffekt aus und schadet unserem Klima.

## Vorschläge für die energetische Modernisierung Variante 3 : Volle Stelle 10h/d

### Modernisierung der Gebäudehülle

keine Maßnahme

### Anlagentechnik

#### Heizung:

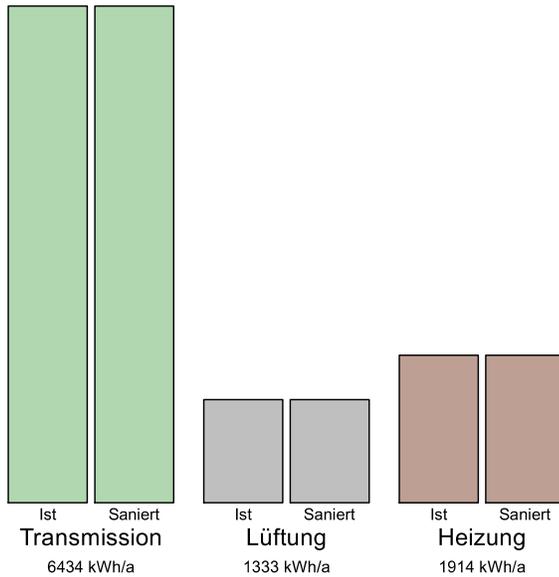
Bereich	Heizwärme-Erzeugung 1
Zentralheizung	- Nah-/Fernwärme von 1990 - Nennleistung 6,86 kW Energieträger: Kraft-Wärme-Kopplung, regenerativ

#### Warmwasser:

Kein TWW-Kreis vorhanden

## Einsparung

Nach Umsetzung aller vorgeschlagenen Maßnahmen reduziert sich der Endenergiebedarf Ihres Gebäudes um 0 %. Den Einfluss auf die Wärmeverluste über die einzelnen Bauteile und die Heizungsanlage zeigt das folgende Diagramm.



Der derzeitige Endenergiebedarf von 8157 kWh/Jahr reduziert sich auf 8157 kWh/Jahr. Es ergibt sich somit eine Einsparung von 0 kWh/Jahr, bei gleichem Nutzerverhalten und gleichen Klimabedingungen.

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen werden um 0 kg CO<sub>2</sub>/Jahr reduziert. Dies wirkt sich positiv auf den Treibhauseffekt aus und hilft, unser Klima zu schützen.

## Vorschläge für die energetische Modernisierung Variante 4 : Halbe Stelle & Luftwechsel (0,8/h)

### Modernisierung der Gebäudehülle

keine Maßnahme

### Anlagentechnik

#### Heizung:

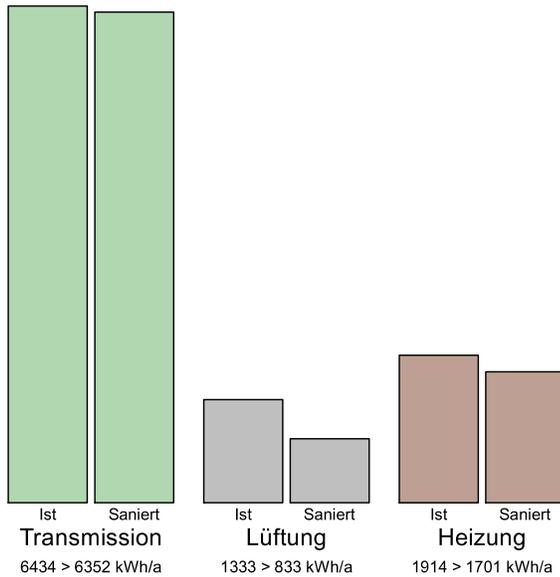
Bereich	Heizwärme-Erzeugung 1
Zentralheizung	- Nah-/Fernwärme von 1990 - Nennleistung 6,86 kW Energieträger: Kraft-Wärme-Kopplung, regenerativ

#### Warmwasser:

Kein TWW-Kreis vorhanden

## Einsparung

Nach Umsetzung aller vorgeschlagenen Maßnahmen reduziert sich der Endenergiebedarf Ihres Gebäudes um 8 %. Den Einfluss auf die Wärmeverluste über die einzelnen Bauteile und die Heizungsanlage zeigt das folgende Diagramm.



Der derzeitige Endenergiebedarf von 8157 kWh/Jahr reduziert sich auf 7472 kWh/Jahr. Es ergibt sich somit eine Einsparung von 685 kWh/Jahr, bei gleichem Nutzerverhalten und gleichen Klimabedingungen.

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen werden um 220 kg CO<sub>2</sub>/Jahr erhöht. Dies wirkt sich negativ auf den Treibhauseffekt aus und schadet unserem Klima.

## Vorschläge für die energetische Modernisierung Variante 5 : Wärmequellen (3 Personen)

### Modernisierung der Gebäudehülle

keine Maßnahme

### Anlagentechnik

#### Heizung:

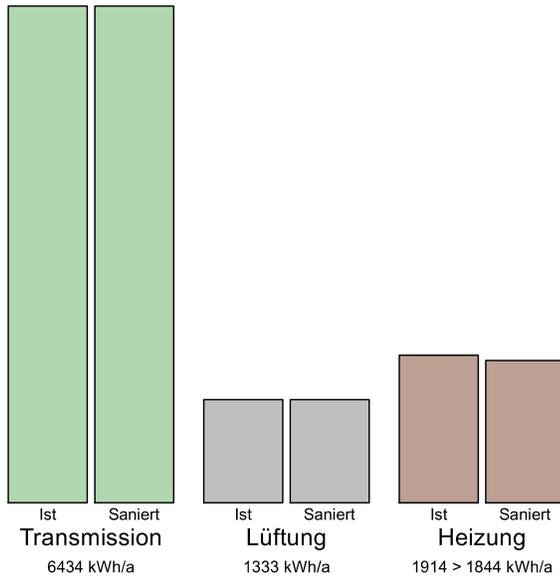
Bereich	Heizwärme-Erzeugung 1
Zentralheizung	- Nah-/Fernwärme von 1990 - Nennleistung 6,86 kW Energieträger: Kraft-Wärme-Kopplung, regenerativ

#### Warmwasser:

Kein TWW-Kreis vorhanden

## Einsparung

Nach Umsetzung aller vorgeschlagenen Maßnahmen reduziert sich der Endenergiebedarf Ihres Gebäudes um 6 %. Den Einfluss auf die Wärmeverluste über die einzelnen Bauteile und die Heizungsanlage zeigt das folgende Diagramm.



Der derzeitige Endenergiebedarf von 8157 kWh/Jahr reduziert sich auf 7672 kWh/Jahr. Es ergibt sich somit eine Einsparung von 485 kWh/Jahr, bei gleichem Nutzerverhalten und gleichen Klimabedingungen.

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen werden um 156 kg CO<sub>2</sub>/Jahr erhöht. Dies wirkt sich negativ auf den Treibhauseffekt aus und schadet unserem Klima.

# Vorschläge für die energetische Modernisierung

## Variante 6 : DIN V 18599 -original

### Modernisierung der Gebäudehülle

keine Maßnahme

### Anlagentechnik

#### Heizung:

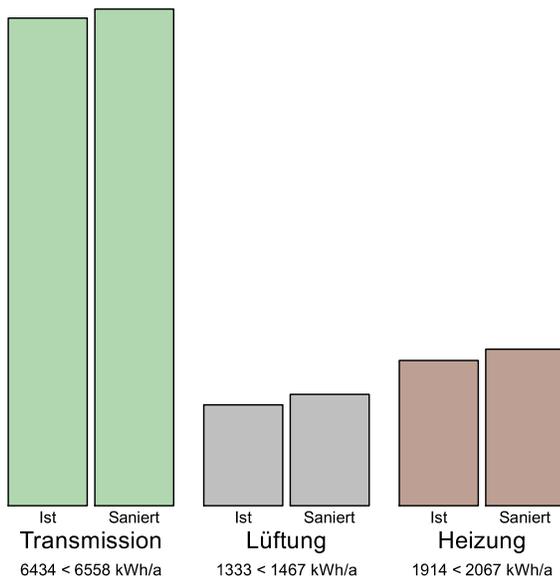
Bereich	Heizwärme-Erzeugung 1
Zentralheizung	- Nah-/Fernwärme von 1990 - Nennleistung 6,86 kW Energieträger: Kraft-Wärme-Kopplung, regenerativ

#### Warmwasser:

Kein TWW-Kreis vorhanden

## Einsparung

Nach Umsetzung aller vorgeschlagenen Maßnahmen erhöht sich der Endenergiebedarf Ihres Gebäudes um 5 %. Den Einfluss auf die Wärmeverluste über die einzelnen Bauteile und die Heizungsanlage zeigt das folgende Diagramm.



Der derzeitige Endenergiebedarf von 8157 kWh/Jahr erhöht sich auf 8557 kWh/Jahr. Es ergibt sich somit mehr Verbrauch von 400 kWh/Jahr, bei gleichem Nutzerverhalten und gleichen Klimabedingungen.

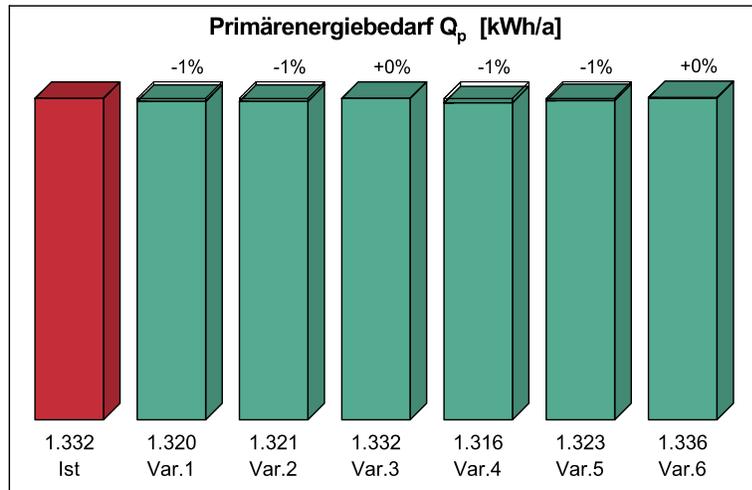
Die CO<sub>2</sub>-Emissionen werden um 130 kg CO<sub>2</sub>/Jahr reduziert. Dies wirkt sich positiv auf den Treibhauseffekt aus und hilft, unser Klima zu schützen.

# Zusammenfassung der Ergebnisse

## Primärenergiebedarf

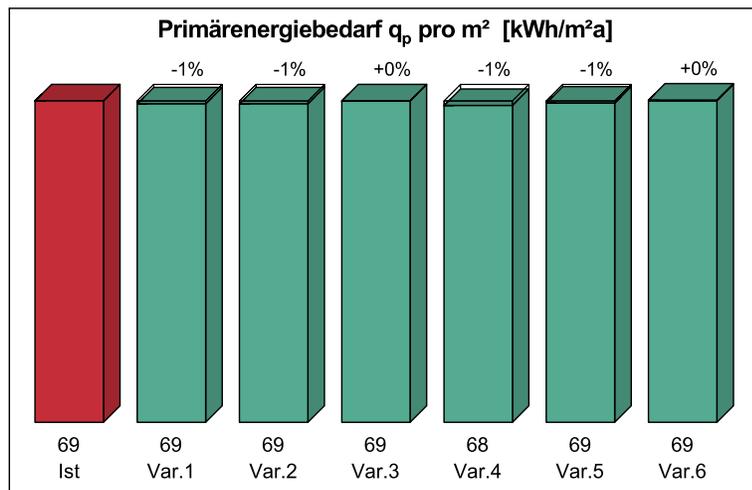
Primärenergiebedarf  $Q_p$ :

- Ist-Zustand
- Var.1 - Halbe Stelle 6h/d
- Var.2 - Lüftung Stoßweise auf Kipp (...)
- Var.3 - Volle Stelle 10h/d
- Var.4 - Halbe Stelle & Luftwechsel (...)
- Var.5 - Wärmequellen (3 Personen)
- Var.6 - DIN V 18599 -original



Primärenergiebedarf  $q_p$  pro  $m^2$ :

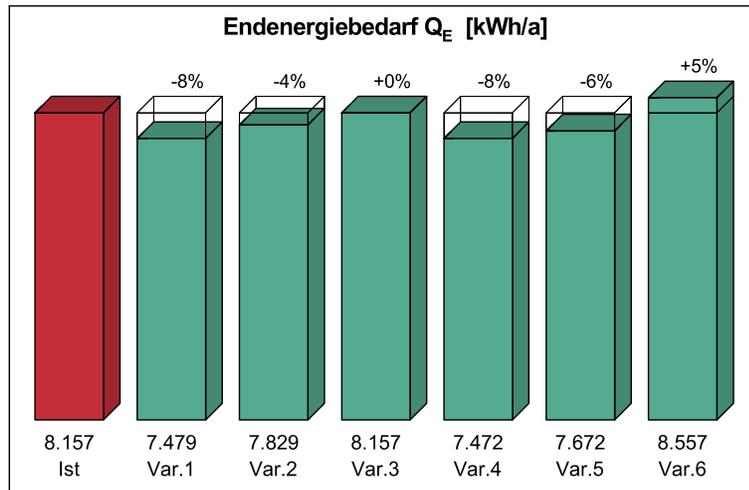
- Ist-Zustand
- Var.1 - Halbe Stelle 6h/d
- Var.2 - Lüftung Stoßweise auf Kipp (...)
- Var.3 - Volle Stelle 10h/d
- Var.4 - Halbe Stelle & Luftwechsel (...)
- Var.5 - Wärmequellen (3 Personen)
- Var.6 - DIN V 18599 -original



### Endenergiebedarf

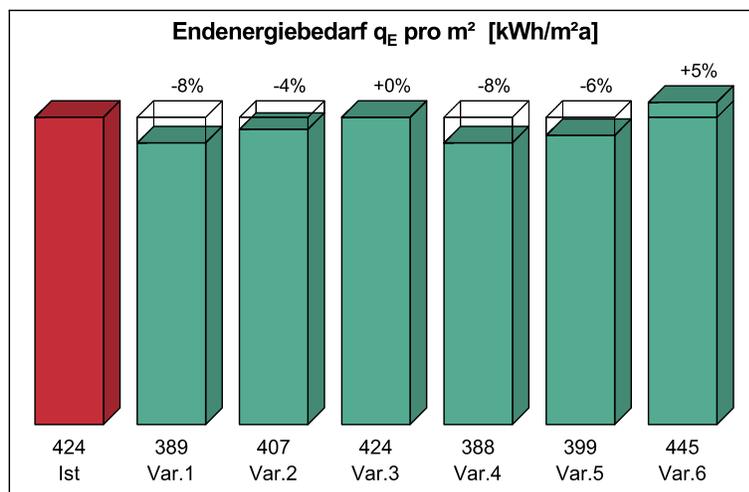
Endenergiebedarf  $Q_E$ :

- Ist-Zustand
- Var.1 - Halbe Stelle 6h/d
- Var.2 - Lüftung Stoßweise auf Kipp (...)
- Var.3 - Volle Stelle 10h/d
- Var.4 - Halbe Stelle & Luftwechsel (...)
- Var.5 - Wärmequellen (3 Personen)
- Var.6 - DIN V 18599 -original



Endenergiebedarf  $q_E$  pro  $m^2$ :

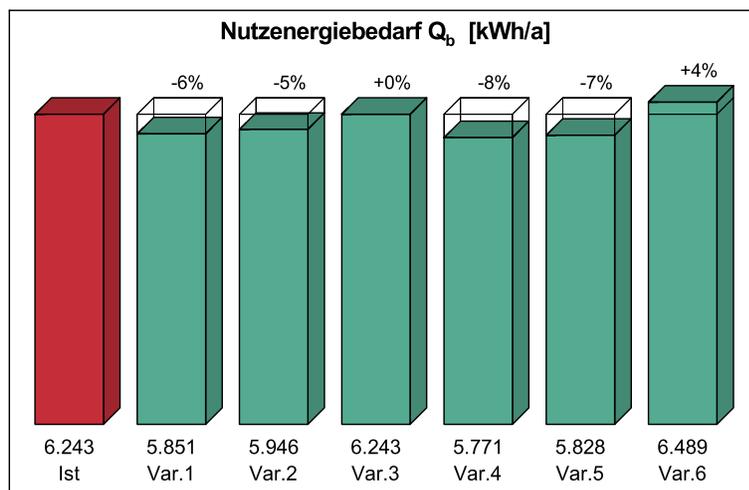
- Ist-Zustand
- Var.1 - Halbe Stelle 6h/d
- Var.2 - Lüftung Stoßweise auf Kipp (...)
- Var.3 - Volle Stelle 10h/d
- Var.4 - Halbe Stelle & Luftwechsel (...)
- Var.5 - Wärmequellen (3 Personen)
- Var.6 - DIN V 18599 -original



### Nutzenergiebedarf

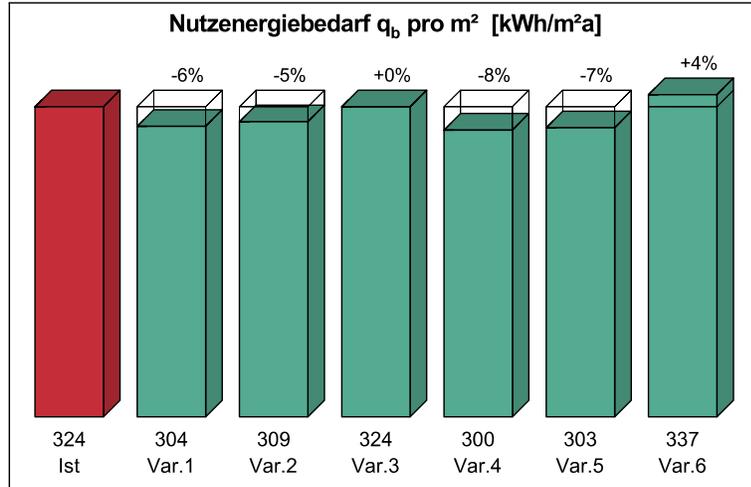
Nutzenergiebedarf  $Q_b$ :

- Ist-Zustand
- Var.1 - Halbe Stelle 6h/d
- Var.2 - Lüftung Stoßweise auf Kipp (...)
- Var.3 - Volle Stelle 10h/d
- Var.4 - Halbe Stelle & Luftwechsel (...)
- Var.5 - Wärmequellen (3 Personen)
- Var.6 - DIN V 18599 -original



Nutzenergiebedarf  $q_b$  pro  $m^2$ :

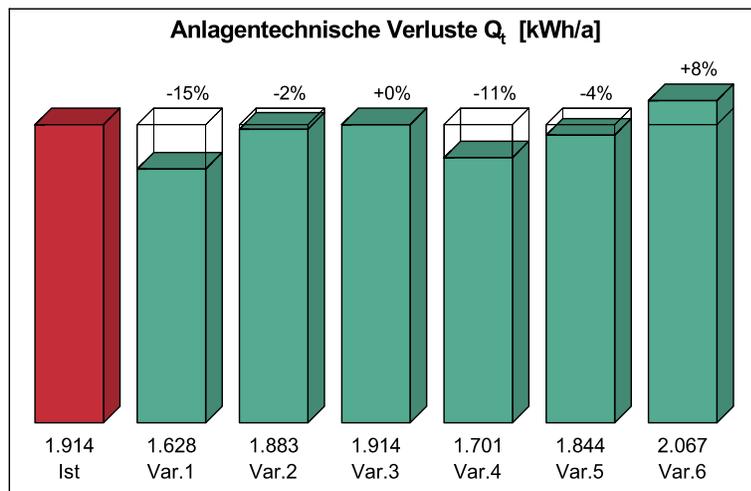
- Ist-Zustand
- Var.1 - Halbe Stelle 6h/d
- Var.2 - Lüftung Stoßweise auf Kipp (...)
- Var.3 - Volle Stelle 10h/d
- Var.4 - Halbe Stelle & Luftwechsel (...)
- Var.5 - Wärmequellen (3 Personen)
- Var.6 - DIN V 18599 -original



### Anlagentechnische Verluste

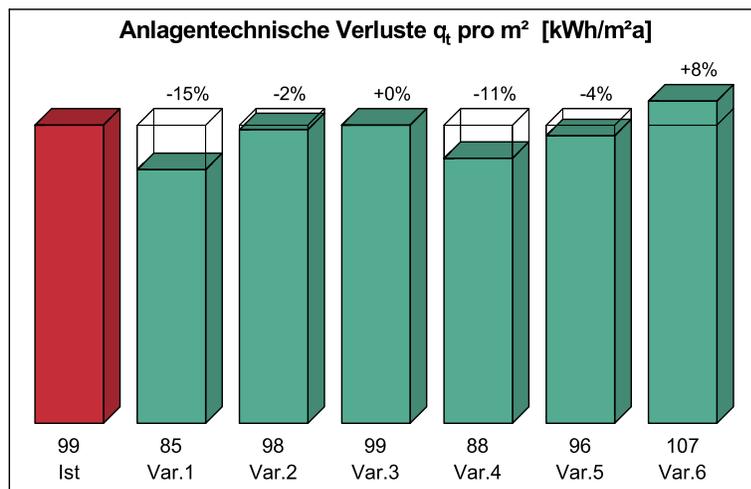
Anlagentechnische Verluste  $Q_t$ :

- Ist-Zustand
- Var.1 - Halbe Stelle 6h/d
- Var.2 - Lüftung Stoßweise auf Kipp (...)
- Var.3 - Volle Stelle 10h/d
- Var.4 - Halbe Stelle & Luftwechsel (...)
- Var.5 - Wärmequellen (3 Personen)
- Var.6 - DIN V 18599 -original



Anlagentechnische Verluste  $q_t$  pro  $m^2$ :

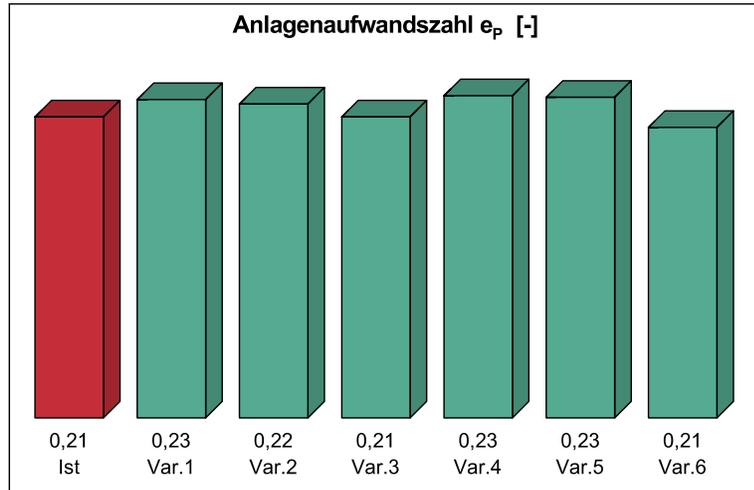
- Ist-Zustand
- Var.1 - Halbe Stelle 6h/d
- Var.2 - Lüftung Stoßweise auf Kipp (...)
- Var.3 - Volle Stelle 10h/d
- Var.4 - Halbe Stelle & Luftwechsel (...)
- Var.5 - Wärmequellen (3 Personen)
- Var.6 - DIN V 18599 -original



### Anlagenaufwandszahl

Anlagenaufwandszahl  $e_p$ :

- Ist-Zustand
- Var.1 - Halbe Stelle 6h/d
- Var.2 - Lüftung Stoßweise auf Kipp (...)
- Var.3 - Volle Stelle 10h/d
- Var.4 - Halbe Stelle & Luftwechsel (...)
- Var.5 - Wärmequellen (3 Personen)
- Var.6 - DIN V 18599 -original

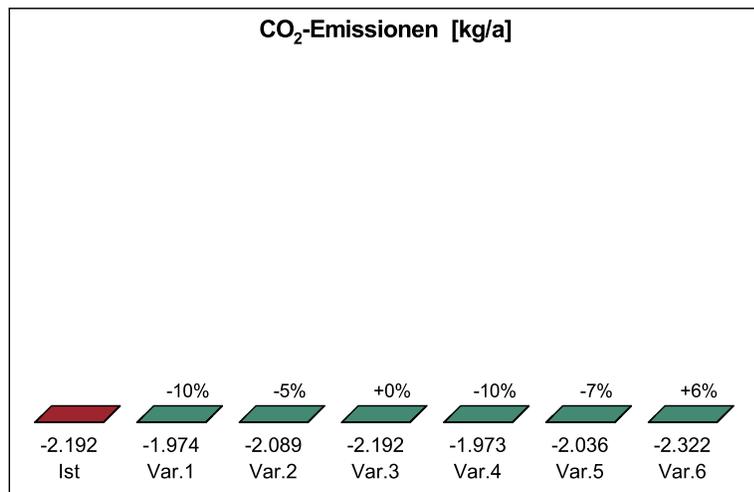


### Schadstoff-Emissionen

#### CO<sub>2</sub>-Emissionen

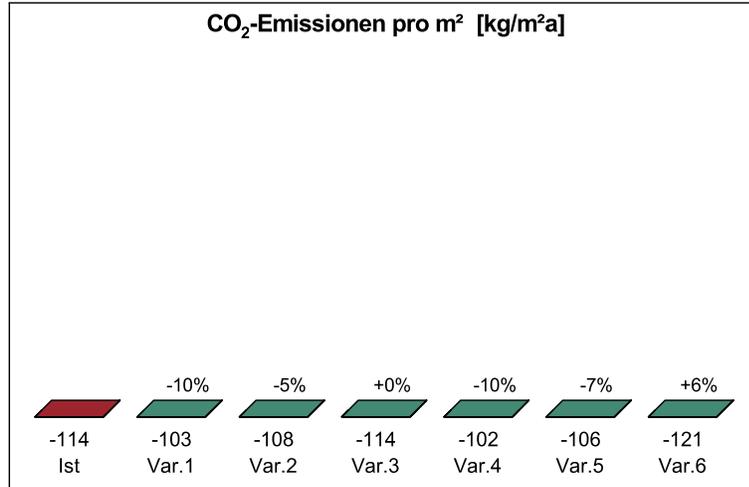
CO<sub>2</sub>-Emissionen:

- Ist-Zustand
- Var.1 - Halbe Stelle 6h/d
- Var.2 - Lüftung Stoßweise auf Kipp (...)
- Var.3 - Volle Stelle 10h/d
- Var.4 - Halbe Stelle & Luftwechsel (...)
- Var.5 - Wärmequellen (3 Personen)
- Var.6 - DIN V 18599 -original



CO<sub>2</sub>-Emissionen pro m<sup>2</sup>:

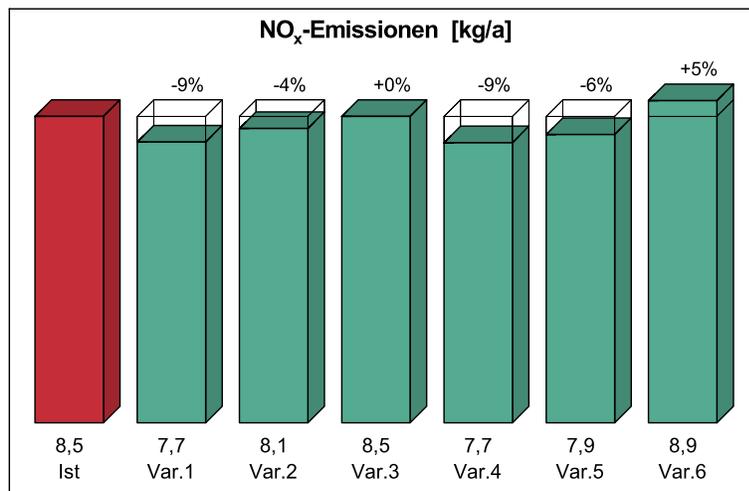
- Ist-Zustand
- Var.1 - Halbe Stelle 6h/d
- Var.2 - Lüftung Stoßweise auf Kipp (...)
- Var.3 - Volle Stelle 10h/d
- Var.4 - Halbe Stelle & Luftwechsel (...)
- Var.5 - Wärmequellen (3 Personen)
- Var.6 - DIN V 18599 -original



### NO<sub>x</sub>-Emissionen

NO<sub>x</sub>-Emissionen:

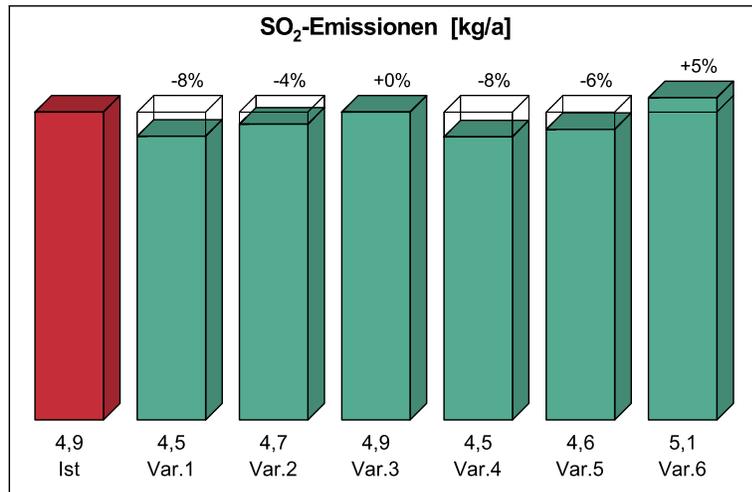
- Ist-Zustand
- Var.1 - Halbe Stelle 6h/d
- Var.2 - Lüftung Stoßweise auf Kipp (...)
- Var.3 - Volle Stelle 10h/d
- Var.4 - Halbe Stelle & Luftwechsel (...)
- Var.5 - Wärmequellen (3 Personen)
- Var.6 - DIN V 18599 -original



### SO<sub>2</sub>-Emissionen

SO<sub>2</sub>-Emissionen:

- Ist-Zustand
- Var.1 - Halbe Stelle 6h/d
- Var.2 - Lüftung Stoßweise auf Kipp (...)
- Var.3 - Volle Stelle 10h/d
- Var.4 - Halbe Stelle & Luftwechsel (...)
- Var.5 - Wärmequellen (3 Personen)
- Var.6 - DIN V 18599 -original

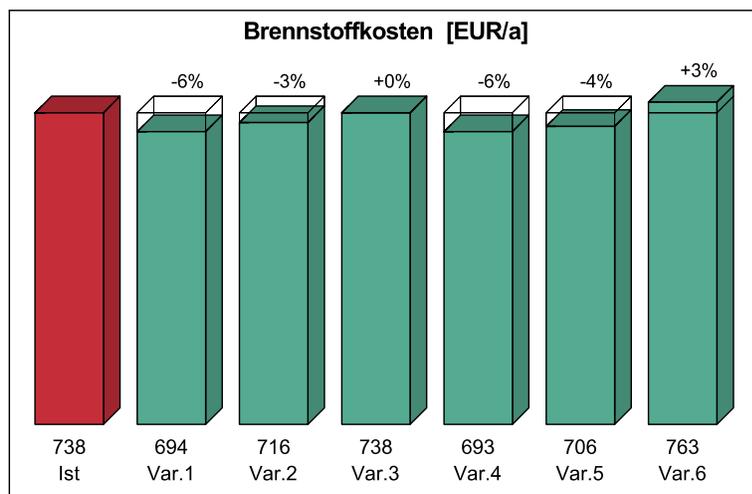


### Kosten

#### Brennstoffkosten

Brennstoffkosten:

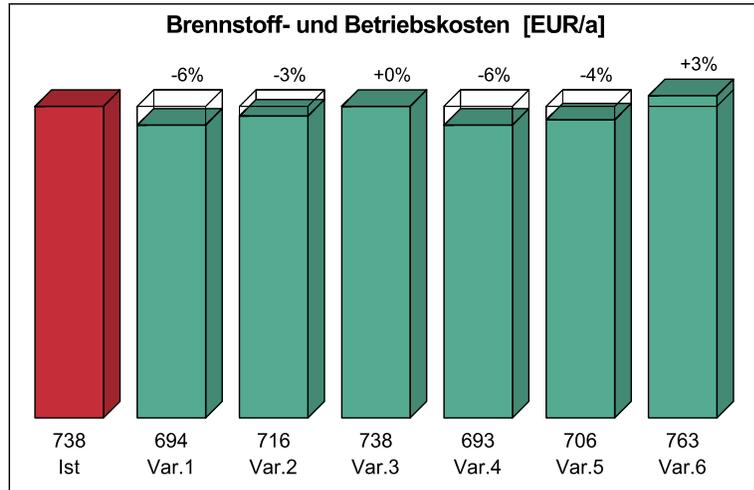
- Ist-Zustand
- Var.1 - Halbe Stelle 6h/d
- Var.2 - Lüftung Stoßweise auf Kipp (...)
- Var.3 - Volle Stelle 10h/d
- Var.4 - Halbe Stelle & Luftwechsel (...)
- Var.5 - Wärmequellen (3 Personen)
- Var.6 - DIN V 18599 -original



### Brennstoff- und Betriebskosten

Brennstoff- und Betriebskosten:

- Ist-Zustand
- Var.1 - Halbe Stelle 6h/d
- Var.2 - Lüftung Stoßweise auf Kipp (...)
- Var.3 - Volle Stelle 10h/d
- Var.4 - Halbe Stelle & Luftwechsel (...)
- Var.5 - Wärmequellen (3 Personen)
- Var.6 - DIN V 18599 -original



# Energieberatungsbericht

Gebäude:

Auftraggeber: Herr  
Jan Geffken  
Dorfstraße 12  
23730 Sierksdorf/ Roge

Erstellt von: Jan

Erstellt am: 10. September 2013

## Allgemeine Angaben zum Gebäude

### Objekt:

### Beschreibung:

Gebäudetyp: Nichtwohngebäude  
Baujahr: 1900

**Beheiztes Volumen  $V_e$ :** 72 m<sup>3</sup>

Das beheizte Volumen wurde gemäß EnEV unter Verwendung von Außenmaßen ermittelt.

**Luftvolumen  $V$ :** 58 m<sup>3</sup>

**Nettogrundfläche  $A_{NGF}$ :** 19,25 m<sup>2</sup>

### Verbrauchsangaben:

Der Berechnung dieses Berichts wurde das EnEV-Standard-Nutzerverhalten und die Standard-Klimabedingungen für Deutschland zugrunde gelegt. Daher können aus den Ergebnissen keine Rückschlüsse auf die absolute Höhe des Brennstoffverbrauchs gezogen werden.

# Ist-Zustand des Gebäudes

## Gebäudehülle

In der folgenden Tabelle finden Sie eine Zusammenstellung der einzelnen Bauteile der Gebäudehülle mit ihren momentanen U-Werten.

Bauteil	U-Wert in W/m <sup>2</sup> K
Decke EG-2	0,97
AT 001	2,40
AW 001	0,37
AW 002	0,37
AW 003	0,37
AW 004	0,37
F 001	1,30
F 002	1,30
F 003	1,30
Bodenplatte EG-1	0,34

## Anlagentechnik

### Heizung:

Bereich Heizwärme-Erzeugung 1  
Zentralheizung - Nah-/Fernwärme von 1990 - Nennleistung 6,86 kW  
Energieträger: Kraft-Wärme-Kopplung, regenerativ

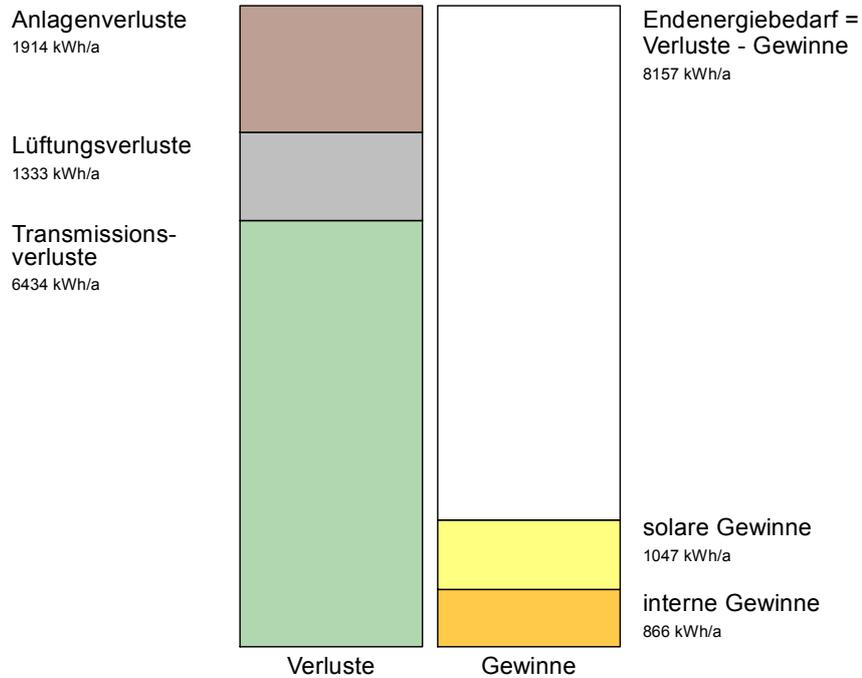
### Warmwasser:

Kein TWW-Kreis vorhanden

## Energiebilanz

Energieverluste entstehen über die Gebäudehülle, durch den Luftwechsel sowie bei der Erzeugung und Bereitstellung der benötigten Energie.

In dem folgenden Diagramm ist die Energiebilanz für die Raumwärme aus Wärmegewinnen und Wärmeverlusten der Gebäudehülle und der Anlagentechnik dargestellt.



## Vorschläge für die energetische Modernisierung Variante 1 : Raumtemperatur 19°C

### Modernisierung der Gebäudehülle

keine Maßnahme

### Anlagentechnik

#### Heizung:

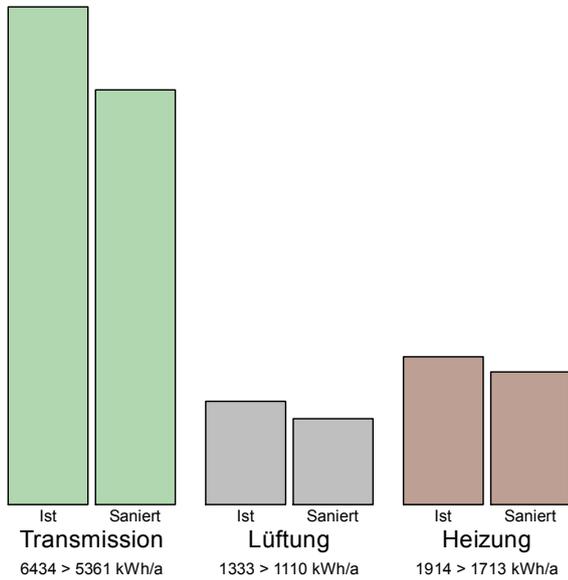
Bereich Heizwärme-Erzeugung 1  
Zentralheizung - Nah-/Fernwärme von 1990 - Nennleistung 6,86 kW  
Energieträger: Kraft-Wärme-Kopplung, regenerativ

#### Warmwasser:

Kein TWW-Kreis vorhanden

## Einsparung

Nach Umsetzung aller vorgeschlagenen Maßnahmen reduziert sich der Endenergiebedarf Ihres Gebäudes um 15 %. Den Einfluss auf die Wärmeverluste über die einzelnen Bauteile und die Heizungsanlage zeigt das folgende Diagramm.



Der derzeitige Endenergiebedarf von 8157 kWh/Jahr reduziert sich auf 6944 kWh/Jahr. Es ergibt sich somit eine Einsparung von 1213 kWh/Jahr, bei gleichem Nutzerverhalten und gleichen Klimabedingungen.

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen werden um 385 kg CO<sub>2</sub>/Jahr erhöht. Dies wirkt sich negativ auf den Treibhauseffekt aus und schadet unserem Klima.

## Vorschläge für die energetische Modernisierung Variante 2 : Raumtemperatur 20°C

### Modernisierung der Gebäudehülle

keine Maßnahme

### Anlagentechnik

#### Heizung:

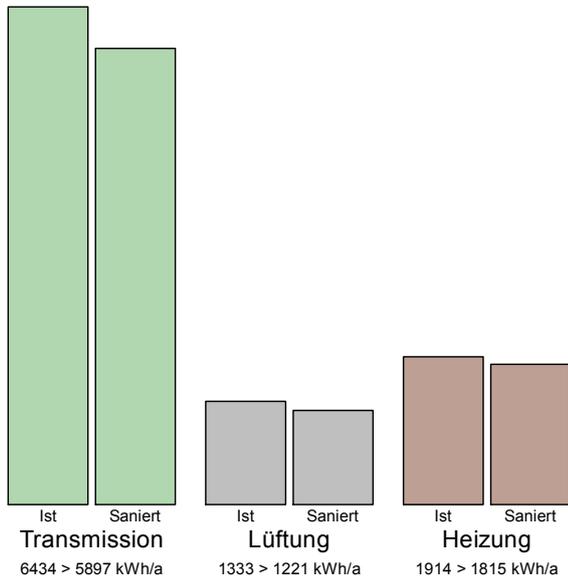
Bereich Heizwärme-Erzeugung 1  
Zentralheizung - Nah-/Fernwärme von 1990 - Nennleistung 6,86 kW  
Energieträger: Kraft-Wärme-Kopplung, regenerativ

#### Warmwasser:

Kein TWW-Kreis vorhanden

## Einsparung

Nach Umsetzung aller vorgeschlagenen Maßnahmen reduziert sich der Endenergiebedarf Ihres Gebäudes um 8 %. Den Einfluss auf die Wärmeverluste über die einzelnen Bauteile und die Heizungsanlage zeigt das folgende Diagramm.



Der derzeitige Endenergiebedarf von 8157 kWh/Jahr reduziert sich auf 7530 kWh/Jahr. Es ergibt sich somit eine Einsparung von 627 kWh/Jahr, bei gleichem Nutzerverhalten und gleichen Klimabedingungen.

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen werden um 198 kg CO<sub>2</sub>/Jahr erhöht. Dies wirkt sich negativ auf den Treibhauseffekt aus und schadet unserem Klima.

## Vorschläge für die energetische Modernisierung Variante 3 : Raumtemperatur 22°C

### Modernisierung der Gebäudehülle

keine Maßnahme

### Anlagentechnik

#### Heizung:

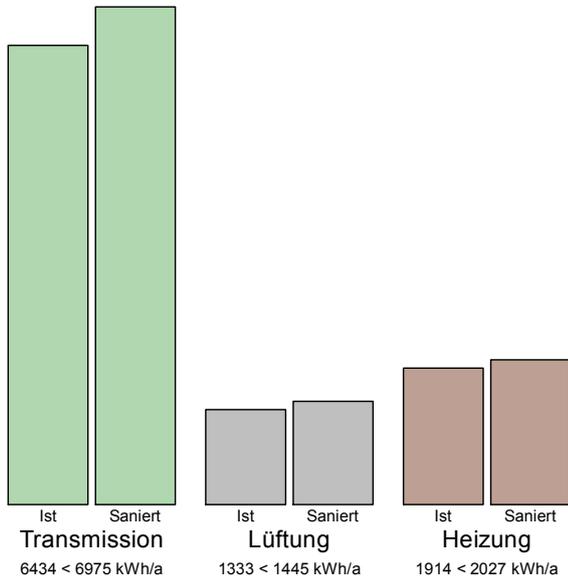
Bereich Heizwärme-Erzeugung 1  
Zentralheizung - Nah-/Fernwärme von 1990 - Nennleistung 6,86 kW  
Energieträger: Kraft-Wärme-Kopplung, regenerativ

#### Warmwasser:

Kein TWW-Kreis vorhanden

## Einsparung

Nach Umsetzung aller vorgeschlagenen Maßnahmen erhöht sich der Endenergiebedarf Ihres Gebäudes um 8 %. Den Einfluss auf die Wärmeverluste über die einzelnen Bauteile und die Heizungsanlage zeigt das folgende Diagramm.



Der derzeitige Endenergiebedarf von 8157 kWh/Jahr erhöht sich auf 8824 kWh/Jahr. Es ergibt sich somit mehr Verbrauch von 667 kWh/Jahr, bei gleichem Nutzerverhalten und gleichen Klimabedingungen.

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen werden um 212 kg CO<sub>2</sub>/Jahr reduziert. Dies wirkt sich positiv auf den Treibhauseffekt aus und hilft, unser Klima zu schützen.

## Vorschläge für die energetische Modernisierung Variante 4 : Raumtemperatur 23°C

### Modernisierung der Gebäudehülle

keine Maßnahme

### Anlagentechnik

#### Heizung:

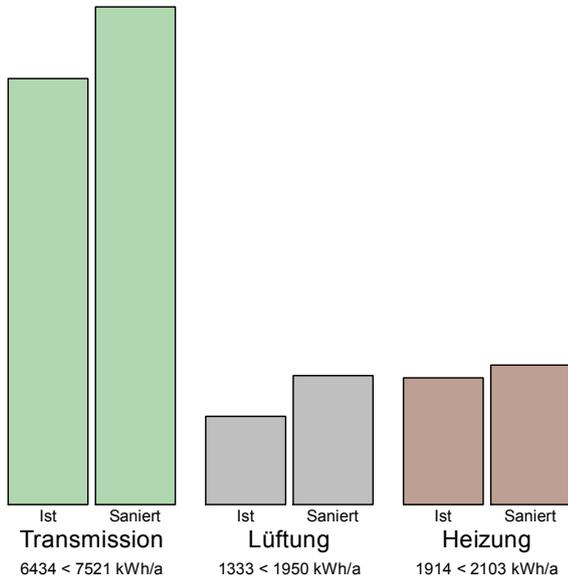
Bereich Heizwärme-Erzeugung 1  
Zentralheizung - Nah-/Fernwärme von 1990 - Nennleistung 6,86 kW  
Energieträger: Kraft-Wärme-Kopplung, regenerativ

#### Warmwasser:

Kein TWW-Kreis vorhanden

## Einsparung

Nach Umsetzung aller vorgeschlagenen Maßnahmen erhöht sich der Endenergiebedarf Ihres Gebäudes um 19 %. Den Einfluss auf die Wärmeverluste über die einzelnen Bauteile und die Heizungsanlage zeigt das folgende Diagramm.



Der derzeitige Endenergiebedarf von 8157 kWh/Jahr erhöht sich auf 9701 kWh/Jahr. Es ergibt sich somit mehr Verbrauch von 1544 kWh/Jahr, bei gleichem Nutzerverhalten und gleichen Klimabedingungen.

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen werden um 489 kg CO<sub>2</sub>/Jahr reduziert. Dies wirkt sich positiv auf den Treibhauseffekt aus und hilft, unser Klima zu schützen.

## **Vorschläge für die energetische Modernisierung Variante 5 : Raumtemperatur 24°C -51,95Wh/m2d -**

### **Modernisierung der Gebäudehülle**

keine Maßnahme

### **Anlagentechnik**

#### **Heizung:**

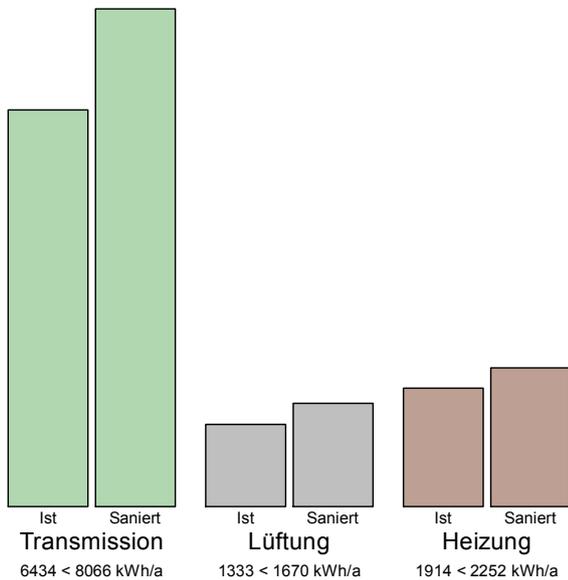
Bereich Heizwärme-Erzeugung 1  
Zentralheizung - Nah-/Fernwärme von 1990 - Nennleistung 6,86 kW  
Energieträger: Kraft-Wärme-Kopplung, regenerativ

#### **Warmwasser:**

Kein TWW-Kreis vorhanden

## Einsparung

Nach Umsetzung aller vorgeschlagenen Maßnahmen erhöht sich der Endenergiebedarf Ihres Gebäudes um 25 %. Den Einfluss auf die Wärmeverluste über die einzelnen Bauteile und die Heizungsanlage zeigt das folgende Diagramm.



Der derzeitige Endenergiebedarf von 8157 kWh/Jahr erhöht sich auf 10235 kWh/Jahr. Es ergibt sich somit mehr Verbrauch von 2078 kWh/Jahr, bei gleichem Nutzerverhalten und gleichen Klimabedingungen.

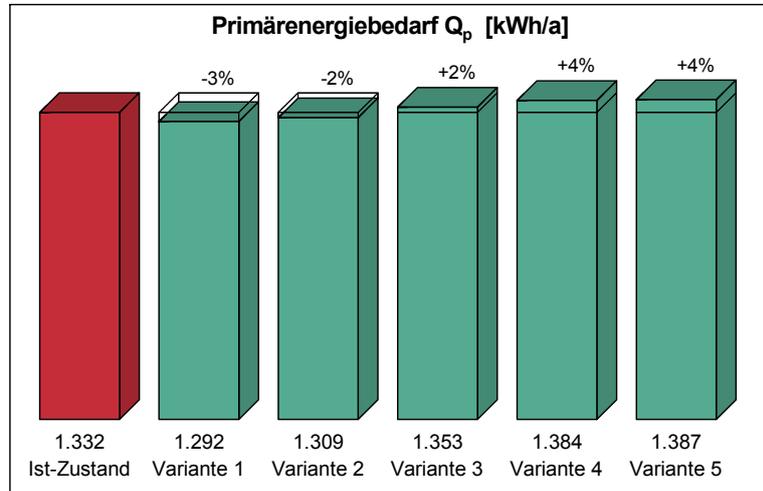
Die CO<sub>2</sub>-Emissionen werden um 664 kg CO<sub>2</sub>/Jahr reduziert. Dies wirkt sich positiv auf den Treibhauseffekt aus und hilft, unser Klima zu schützen.

# Zusammenfassung der Ergebnisse

## Primärenergiebedarf

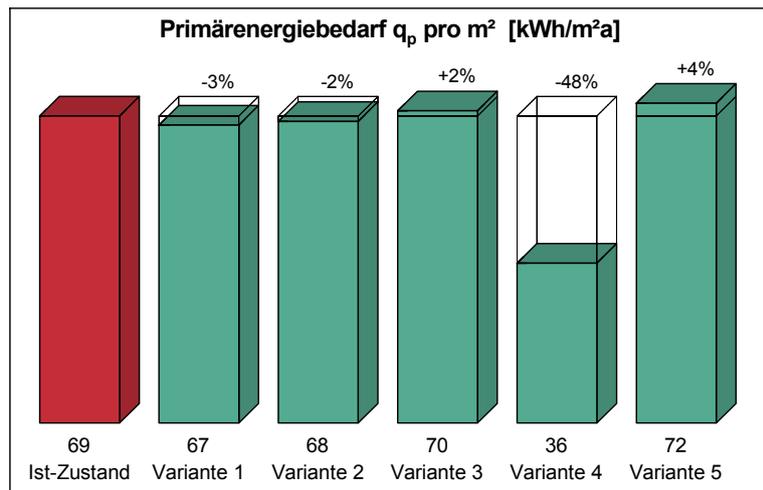
Primärenergiebedarf  $Q_p$ :

- Ist-Zustand
- Var.1 - Raumtemperatur 19°C
- Var.2 - Raumtemperatur 20°C
- Var.3 - Raumtemperatur 22°C
- Var.4 - Raumtemperatur 23°C
- Var.5 - Raumtemperatur 24°C -51,9...



Primärenergiebedarf  $q_p$  pro  $m^2$ :

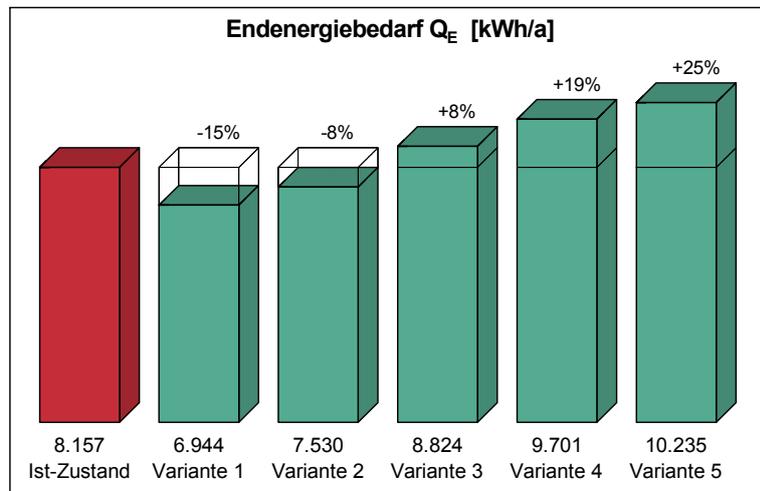
- Ist-Zustand
- Var.1 - Raumtemperatur 19°C
- Var.2 - Raumtemperatur 20°C
- Var.3 - Raumtemperatur 22°C
- Var.4 - Raumtemperatur 23°C
- Var.5 - Raumtemperatur 24°C -51,9...



### Endenergiebedarf

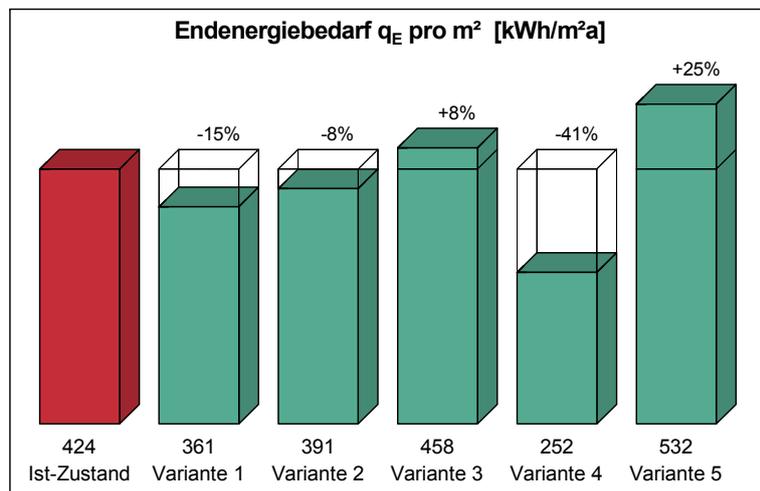
Endenergiebedarf  $Q_E$ :

- Ist-Zustand
- Var.1 - Raumtemperatur 19°C
- Var.2 - Raumtemperatur 20°C
- Var.3 - Raumtemperatur 22°C
- Var.4 - Raumtemperatur 23°C
- Var.5 - Raumtemperatur 24°C -51,9...



Endenergiebedarf  $q_E$  pro  $m^2$ :

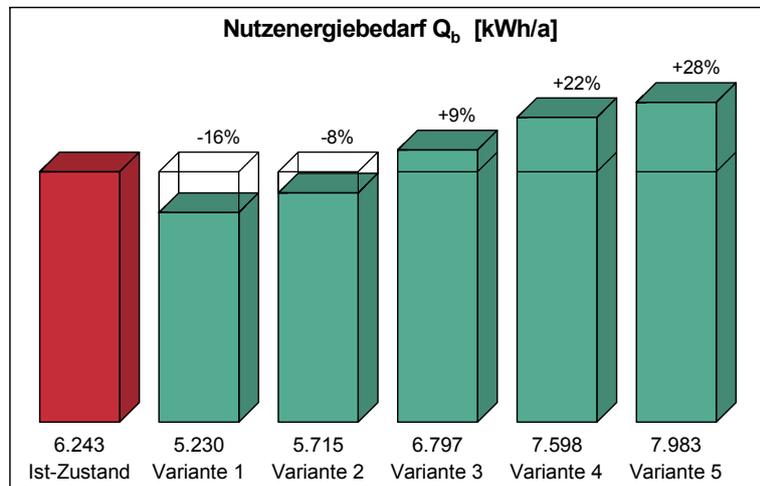
- Ist-Zustand
- Var.1 - Raumtemperatur 19°C
- Var.2 - Raumtemperatur 20°C
- Var.3 - Raumtemperatur 22°C
- Var.4 - Raumtemperatur 23°C
- Var.5 - Raumtemperatur 24°C -51,9...



### Nutzenergiebedarf

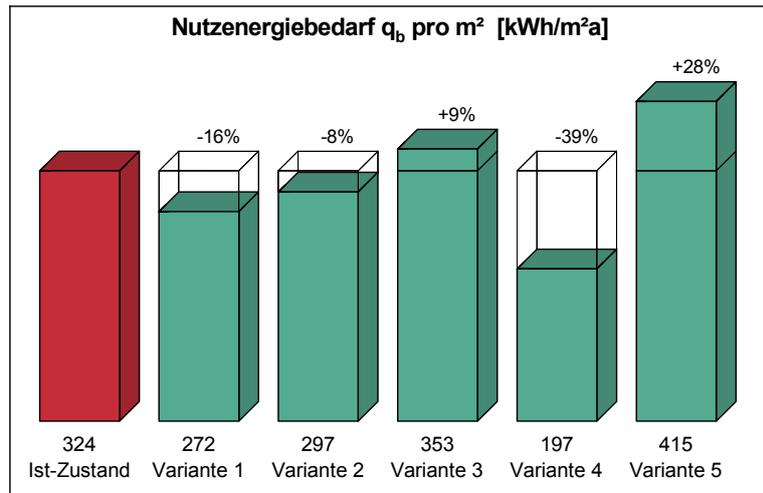
Nutzenergiebedarf  $Q_b$ :

- Ist-Zustand
- Var.1 - Raumtemperatur 19°C
- Var.2 - Raumtemperatur 20°C
- Var.3 - Raumtemperatur 22°C
- Var.4 - Raumtemperatur 23°C
- Var.5 - Raumtemperatur 24°C -51,9...



Nutzenergiebedarf  $q_b$  pro  $m^2$ :

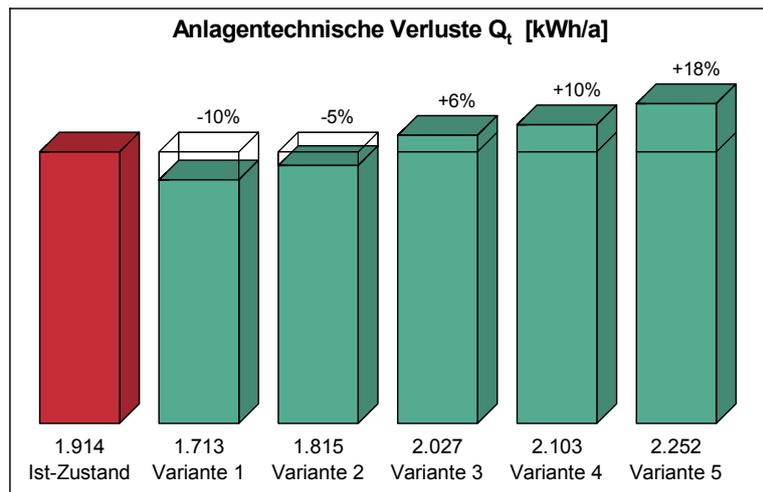
- Ist-Zustand
- Var.1 - Raumtemperatur 19°C
- Var.2 - Raumtemperatur 20°C
- Var.3 - Raumtemperatur 22°C
- Var.4 - Raumtemperatur 23°C
- Var.5 - Raumtemperatur 24°C -51,9...



### Anlagentechnische Verluste

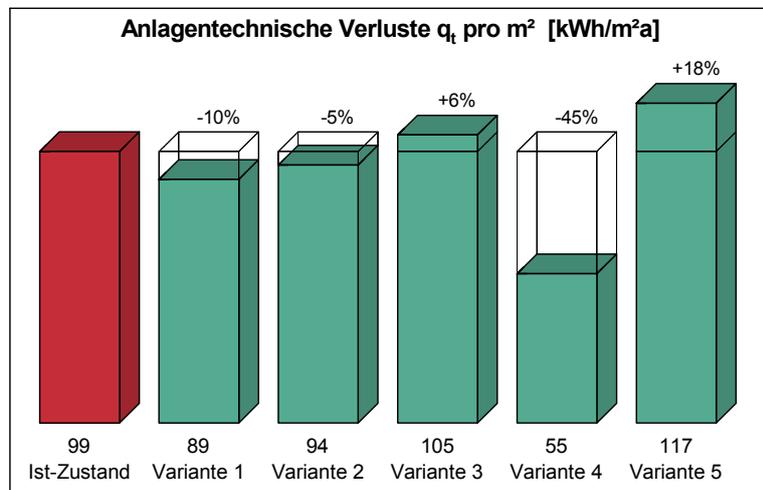
Anlagentechnische Verluste  $Q_t$ :

- Ist-Zustand
- Var.1 - Raumtemperatur 19°C
- Var.2 - Raumtemperatur 20°C
- Var.3 - Raumtemperatur 22°C
- Var.4 - Raumtemperatur 23°C
- Var.5 - Raumtemperatur 24°C -51,9...



Anlagentechnische Verluste  $q_t$  pro  $m^2$ :

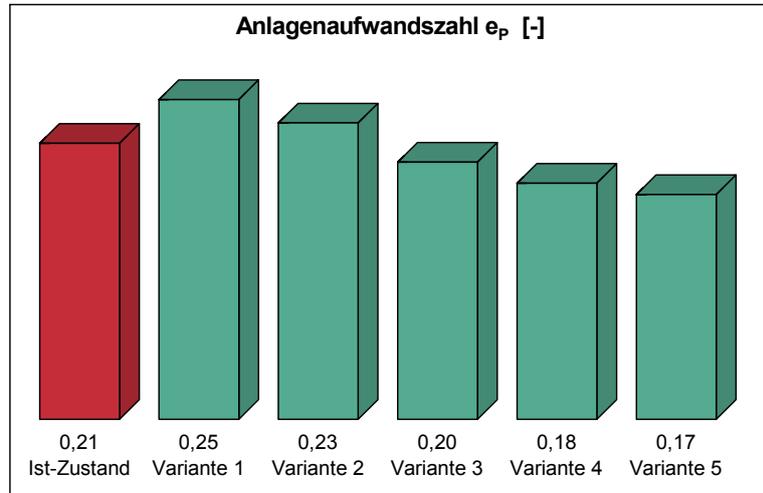
- Ist-Zustand
- Var.1 - Raumtemperatur 19°C
- Var.2 - Raumtemperatur 20°C
- Var.3 - Raumtemperatur 22°C
- Var.4 - Raumtemperatur 23°C
- Var.5 - Raumtemperatur 24°C -51,9...



### Anlagenaufwandszahl

Anlagenaufwandszahl  $e_p$ :

- Ist-Zustand
- Var.1 - Raumtemperatur 19°C
- Var.2 - Raumtemperatur 20°C
- Var.3 - Raumtemperatur 22°C
- Var.4 - Raumtemperatur 23°C
- Var.5 - Raumtemperatur 24°C -51,9...

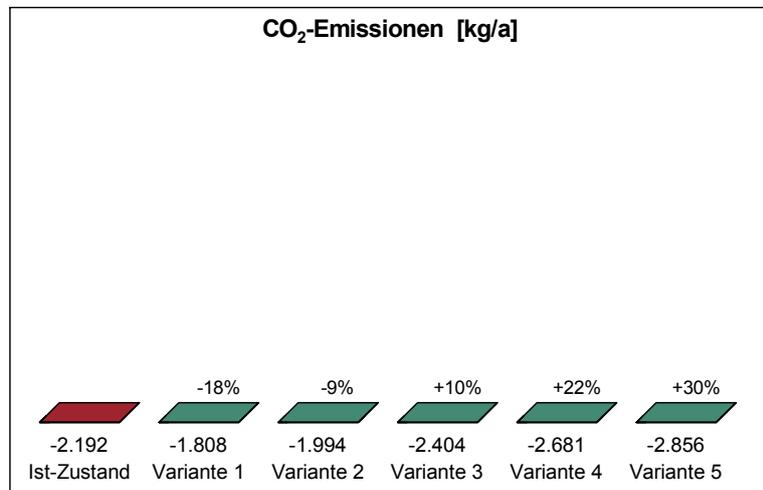


### Schadstoff-Emissionen

#### CO<sub>2</sub>-Emissionen

CO<sub>2</sub>-Emissionen:

- Ist-Zustand
- Var.1 - Raumtemperatur 19°C
- Var.2 - Raumtemperatur 20°C
- Var.3 - Raumtemperatur 22°C
- Var.4 - Raumtemperatur 23°C
- Var.5 - Raumtemperatur 24°C -51,9...



CO<sub>2</sub>-Emissionen pro m<sup>2</sup>:

Ist-Zustand

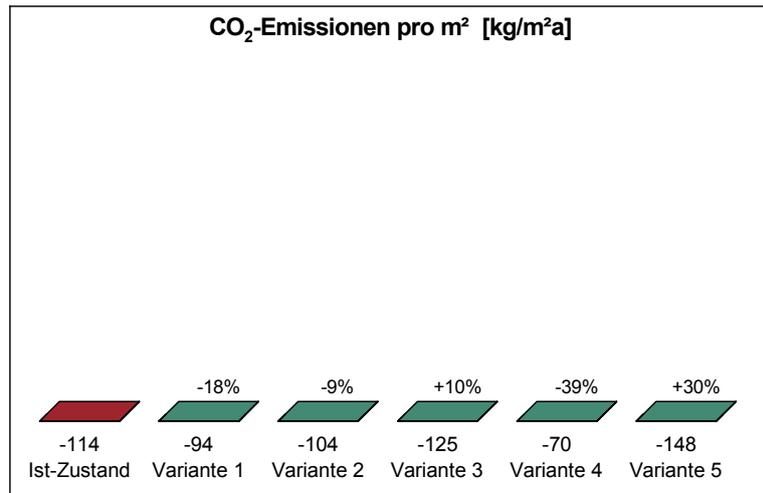
Var.1 - Raumtemperatur 19°C

Var.2 - Raumtemperatur 20°C

Var.3 - Raumtemperatur 22°C

Var.4 - Raumtemperatur 23°C

Var.5 - Raumtemperatur 24°C -51,9...



## NO<sub>x</sub>-Emissionen

NO<sub>x</sub>-Emissionen:

Ist-Zustand

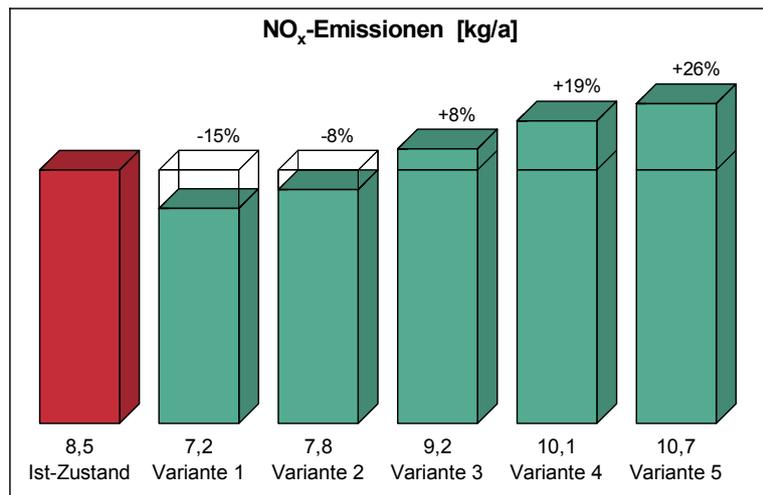
Var.1 - Raumtemperatur 19°C

Var.2 - Raumtemperatur 20°C

Var.3 - Raumtemperatur 22°C

Var.4 - Raumtemperatur 23°C

Var.5 - Raumtemperatur 24°C -51,9...



## SO<sub>2</sub>-Emissionen

SO<sub>2</sub>-Emissionen:

Ist-Zustand

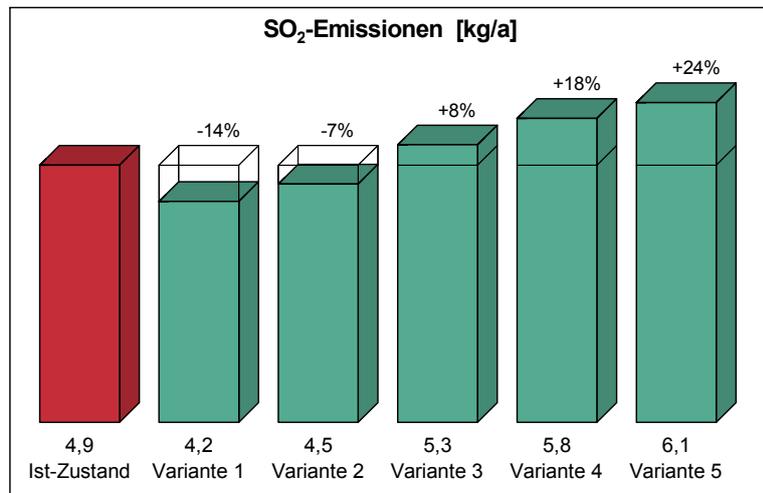
Var.1 - Raumtemperatur 19°C

Var.2 - Raumtemperatur 20°C

Var.3 - Raumtemperatur 22°C

Var.4 - Raumtemperatur 23°C

Var.5 - Raumtemperatur 24°C -51,9...



## Kosten

### Brennstoffkosten

Brennstoffkosten:

Ist-Zustand

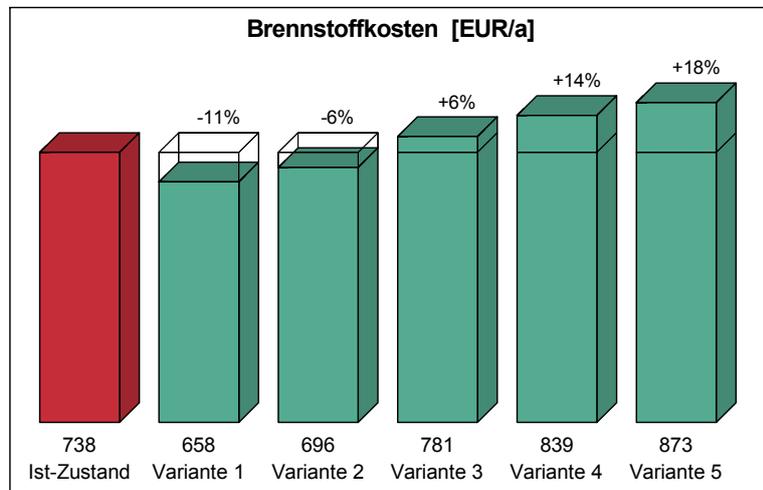
Var.1 - Raumtemperatur 19°C

Var.2 - Raumtemperatur 20°C

Var.3 - Raumtemperatur 22°C

Var.4 - Raumtemperatur 23°C

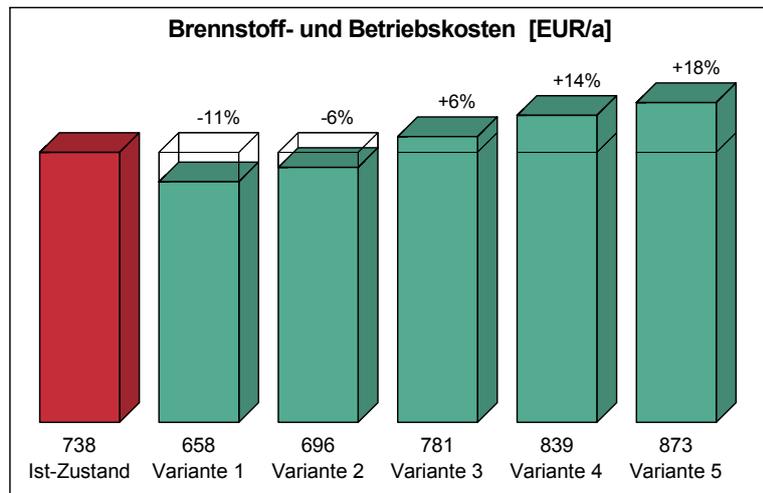
Var.5 - Raumtemperatur 24°C -51,9...



### Brennstoff- und Betriebskosten

Brennstoff- und Betriebskosten:

- Ist-Zustand
- Var.1 - Raumtemperatur 19°C
- Var.2 - Raumtemperatur 20°C
- Var.3 - Raumtemperatur 22°C
- Var.4 - Raumtemperatur 23°C
- Var.5 - Raumtemperatur 24°C -51,9...



**Zentrales Prüfungsamt**

Anlage 5

**Eidesstattliche Erklärung**

- 0 "Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die in den benutzen Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe."
- 0 "Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass
- ich die vorliegende Arbeit - bei einer Gruppenarbeit den entsprechend gekennzeichneten Teil der Arbeit - selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe,
  - alle Stellen der Arbeit, die ich wortwörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommen habe, als solche kenntlich gemacht habe."

Zutreffendes ankreuzen

---

(Datum, Unterschrift)

## **Bachelorthesis**

# **Optimierung der Nutzerinteraktion durch Visualisierung und Anwendung des Ambient Intelligence Systems im Bereich Energiemanagement**

Leuphana Universität Lüneburg

Fakultät II: Wirtschaftswissenschaften

Institut für Produkt- und Prozessinnovation Lüneburg,

zur Erlangung des akademischen Grades eines Bachelor of Engineering (B.Eng.)

Vigiththan Wayaspathy: Matrikel-Nr. 3013086

David Rausch: Matrikel-Nr. 3013324

Dozenten:

Erstprüfer: Dr. rer. nat. Oliver Opel

Zweitprüfer: Dipl. -Ing. Stefan Bielawa,

Abgabetermin:

18.04.2014



# Inhalt

<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>III</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>IV</b>
<b>1. ABSTRACT</b> .....	<b>6</b>
<b>2. EINLEITUNG</b> .....	<b>6</b>
2.1 MOTIVATION UND ZIELSETZUNG .....	7
2.2 AUFBAU UND VORGEHENSWEISE.....	8
<b>3. GRUNDLAGEN UND STAND DER FORSCHUNG</b> .....	<b>10</b>
3.1 ENERGIEMONITORING .....	10
3.1.1 Begriffserklärung .....	10
3.1.2 Aufbau eines Energiemonitoringsystem.....	12
3.1.3 Sensoren .....	13
3.1.4 Einsparpotenziale .....	14
3.1.5 Anbindung an das AmI.....	15
3.2 AMBIENT INTELLIGENCE .....	16
3.2.1 Begriffserklärung .....	16
3.2.2 Aufbau eines Ambient Intelligence System.....	17
3.2.3 Einzelraumregelung.....	18
3.2.4 Anwendungsbereiche des AmI.....	20
3.2.5 Vision und Anforderungen an das Ambient Intelligence System.....	21
3.2.6 Recht und Privatsphäre.....	22
<b>4. NUTZERINTERAKTION DURCH AMBIENT INTELLIGENCE SYSTEM</b> .....	<b>23</b>
4.1 EINBINDUNG DER NUTZER .....	24
4.2 METHODEN UND MAßNAHMEN.....	24
4.2.1 Handlungsaktivierende Maßnahmen und handlungsunterstützende Maßnahmen.....	25
4.3 FEEDBACKSYSTEM.....	26
4.4 VISUALISIERUNG .....	28
<b>5. SYNAVISION</b> .....	<b>30</b>
5.1 WAS IST SYNAVISION? .....	31
5.2 WIE FUNKTIONIERT SYNAVISION PLOT PILOT .....	33
5.3 ANWENDUNGSBEREICHE .....	44
5.4 AUFBEREITUNG DER MESSDATEN.....	45
5.5 VISUALISIERUNG DES ENERGIEVERBRAUCHS.....	47
5.6 GRENZEN VON SYNAVISION .....	52
5.7 BEWERTUNG.....	53
<b>6. BETRIEBSOPTIMIERUNG</b> .....	<b>54</b>
6.1 APP ZUR OPTIMIERUNG DER NUTZERINTERAKTION DURCH DAS AMI .....	55
<b>7. ZUSAMMENFASSUNG/FAZIT</b> .....	<b>63</b>
<b>8. AUSBLICK</b> .....	<b>65</b>
<b>9. QUELLEN</b> .....	<b>66</b>

**Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Aufbau eines Energiemonitoringsystem (vgl. Venzmer 20011:4) ..... 12

Abbildung 2: Aufbau eines AmI System (Meier 2012:6) ..... 17

Abbildung 3: Verdeutlicht grafisch die Unterscheidung zwischen handlungsaktivierenden und handlungsunterstützenden Maßnahmen (vgl. Opel et al. 2013:105). ..... 25

Abbildung 4: Mögliche Darstellung der allgemeinen Verbrauchsdaten über einen längeren Zeitraum..... 29

Abbildung 5: Mögliche Darstellung der Verbrauchsdaten zweier Büros über einen längeren Zeitraum..... 30

Abbildung 6: Anmeldeplattform für den Plot Pilot ..... 33

Abbildung 7: Beispieldaten von der Synavision GmbH ..... 34

Abbildung 8: Importbereich vom Plot Pilot ..... 35

Abbildung 9: Parser-Eigenschaften vom Plot Pilot ..... 35

Abbildung 10: Übersicht der hochgeladenen Sensoren ..... 36

Abbildung 11: Erzeugungsbereich Bar-/Line Plot ..... 37

Abbildung 12: Bar-/Line Plot ..... 38

Abbildung 13: Auswahl an Sensoren im Plot Pilot ..... 38

Abbildung 14: Plot-Einstellungen ..... 39

Abbildung 15: Konfigurationsmöglichkeiten im Plot Pilot..... 40

Abbildung 16: Scatter Plot ..... 41

Abbildung 17: Carpet Plot ..... 42

Abbildung 18: Synavision Feedbackfunktion ..... 43

Abbildung 19: Demodaten von der Synavision..... 45

Abbildung 20: Messdaten von der TU Braunschweig..... 46

Abbildung 21: Einzelraum- und Beleuchtungsregelung..... 47

Abbildung 22: Außentemperatur und Heizleistung..... 49

Abbildung 23: Vergleich der Raumfeuchte von zwei Büroräumen ..... 50

Abbildung 24: Wärmeverbrauch über ein Jahr..... 51

Abbildung 25: Messdaten in Grad Celsius ..... 52

Abbildung 26: App /Log-In ..... 56

Abbildung 27: App /Einstellungen ..... 57

Abbildung 28: App/Funktionen ..... 59

Abbildung 29: App/Aktueller Verbrauch ..... 58

Abbildung 30: App /Mögliche Ursachen ..... 61

Abbildung 31: App / Verbrauch Vormonat..... 60

Abbildung 32: App /Vergleich ..... 61

### **Abkürzungsverzeichnis**

Abb.	=	Abbildung
Bsp.	=	Beispiel
bzw.	=	beziehungsweise
d.h.	=	das heißt
ebd.	=	ebendort
et al.	=	und andere
etc.	=	et cetera
f.	=	folgend
ff.	=	folgender
ggf.	=	gegebenenfalls
GmbH	=	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
u.a.	=	unter anderem
usw.	=	und so weiter
vgl.	=	vergleiche
z. B.	=	zum Beispiel

*Der härteste und wichtigste Kampf des 21. Jahrhunderts wird ohne Waffen geführt. Die Werkzeuge dieses Kampfes heißen: Energieeffizienz, Energie sparen und erneuerbare Energien.*

Franz Alt (2007)

## **1. Abstract**

How to create an insightful and well-arranged user activity that furthers the optimization of buildings?

The evolution of computing technology caused changes for human computer interaction. While traditional desktop computers are mainly based on explicit interaction with keyboard and mouse, smart environments often shift the focus on implicit interaction. Hence people may interact naturally in a physical environment, which reacts on their activities and provides assistance, to support users to accomplish their goals. Interactions are characterized by several users performing a task cooperatively, the involvement of several devices, multimodality and context dependence. Furthermore, humans expect to use the system directly without reading any manuals. Assistance systems try to save users' time and decrease the mental workload. In this thesis, a system for monitoring energy and resource consumption is presented which includes the measurement and the data transmission and finally the visualization. The visualization enables the consumer to get a direct feedback of his energy consumption. The monitoring system of Synavision GmbH should be integrated in the new central building at the Leuphana University. For this purpose, the tool was tested and evaluated as part of this thesis. Different solutions are compared by their advantages and disadvantages regarding availability and their capabilities of practical realization. The result showed that the Plot Pilot is suitable for an understanding and clear presentation of the user interaction through the use of an ambient intelligence system. An app was designed and developed to fulfill an optimization of operations, in which an optimal user area in conjunction with the monitoring and ambient intelligence system is guaranteed.

## **2. Einleitung**

Die Leuphana ist dem Nachhaltigkeitsbild besonders verpflichtet und hat sich zum Ziel gesetzt, durch Bildung, Forschung und Transfer einen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung der Zivilgesellschaft des 21. Jahrhunderts zu leisten (Leuphana<sup>1</sup>). Einer der großen Gefahren für die Umwelt ist der Klimawandel, an dem Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in Lüneburg zur Reduzierung und Vermeidung arbeiten. Die spürbaren Probleme des Klimawandels und die rasant gestiegenen Kosten für Energieträger haben das Thema Energiemanagement in den Mittelpunkt gestellt. Die Energiepolitik des 21. Jahrhunderts bedarf umfassender Veränderungen, um das Ziel einer nachhaltigen Energieversorgung zu erreichen. Im Jahr 2002 wurde als Ziel die Klimaneutralität beschlossen, die zunächst durch

den Kauf von Zertifikaten, langfristig jedoch aus eigener Kraft erreicht werden sollte (Leuphana<sup>2</sup>). Ursprünglich sollte dieses Ziel bis 2012 erreicht werden, nun voraussichtlich Ende 2014 (vgl. ebd.). Einer der Hauptgründe für die zeitliche Verschiebung ist die Einbeziehung des neuen energetisch optimierten Zentralgebäudes und der damit verbundenen Erforschung neuer technischer Produkte (ebd.). Das Zentralgebäude ist ein Campus der Zukunft, entworfen von Daniel Libeskind, ein seit 2007 nebenberuflicher Professor an der Leuphana Universität. Zusammen mit Studierenden und anderen Universitätsmitgliedern wurde ein ganzheitliches Konzept für das neue Zentralgebäude entwickelt, als einen Ort, der Studieren, Forschen und Leben verbindet. Dabei soll das Zentralgebäude nicht nur mit seiner außergewöhnlichen Architektur Maßstäbe setzen, sondern auch als Net Zero Emission Building zudem, zu einem verantwortungsvollen Umgang mit Energie und Ressourcen beitragen. Das Zentralgebäude verfügt über eine Vielzahl geplanter innovativer Maßnahmen zur Reduzierung des Energiebedarfs sowie für die flexible, exergetisch optimierte Einbindung in das Campus-Energiesystem. Die vorliegende Bachelorarbeit ist ebenfalls ein Beitrag zum Forschungsprojekt *Klimaneutraler Campus Sharnhorststraße Bockelsberg*. Hierfür forschten zwei Studierende insgesamt neun Wochen an einer gemeinsamen Fragestellung für die mögliche energetische Nutzereinbindung am neuen Zentralgebäude.

### **2.1 Motivation und Zielsetzung**

In Zeiten steigender Energiepreise rückt die Analyse des Energieverbrauchs verstärkt in den Fokus der Betrachtung.

Nach Meier (2012:3) sind 40% des Energieverbrauchs in Gebäuden auf Heizen und Beleuchtung zurückzuführen. Dabei werden 80% der benötigten Energie in der Nutzungsphase zugeführt. Das Ergebnis zeigt, wie hoch das energetische Einsparpotenzial für einen energieeffizienten Gebäudebetrieb sein kann (vgl. Meier 2012:3). Durch bewusstes Nutzerverhalten lassen sich bis zu 20% des Energieverbrauchs einsparen.

Es ist wichtig die Bedürfnisse der Gebäudenutzer<sup>1</sup> in das Gebäudemanagement mit einzubeziehen, denn nur zufriedene Gebäudenutzer sind in der Lage produktiv zu arbeiten und können die Motivation aufbringen Energie einzusparen, für die sie nicht finanziell aufkommen müssen. (vgl. ebd.). Damit wachsen die Anforderungen an ein nachhaltiges

---

<sup>1</sup> Wenn in dieser Bachelorthesis im Sinne der Lesbarkeit teilweise nur die männliche Form verwendet wird, sind sowohl Frauen als auch Männer gemeint.

Energiemanagement. Die Verbräuche müssen detailliert erfasst, zugeordnet und entsprechend für die Nutzer visualisiert werden.

Zielsetzung ist daher die Einleitung von Optimierungsmaßnahmen, die dem Nutzer ermöglicht sich aktiv am Energieverbrauch des Zentralgebäudes der Leuphana Universität zu beteiligen. Die Gebäudenutzer sollen vermittelt bekommen, wie sie Energie sparen können. Die Nutzer sollen Interesse am Energiesparen entwickeln und energiebewusstes Verhalten in den Alltag integrieren.

Das Ziel einer aktiven Nutzerinteraktion soll im Zentralgebäude durch die Anwendung eines Ambient Intelligence -Systems gewährleistet werden. Durch die Installation ist das System in der Lage die Präferenzen der Gebäudenutzer zu lernen und diese bei der Steuerung der verschiedenen Heiz-, Kühl- und Lüftungssysteme zu berücksichtigen.

Die vorliegende Bachelorarbeit beschäftigt sich vorrangig mit der Rückkopplung des Energieverbrauchs, vor allem auf den Nutzer selbst. Eine große Herausforderung stellt dabei die fehlende Form der Visualisierung von Energieverbräuchen da. Dafür wird ein System zum Energiemonitoring benötigt, das zur Erfassung, Übermittlung und Darstellung von Energie- und Ressourcenverbräuchen dient. Für das neue Zentralgebäude nutzt die Leuphana Universität Lüneburg den *Energie Navigator* der Synavision GmbH. Das Monitoring wird gefördert durch das Bundeswirtschaftsministerium im Rahmen der Forschungsinitiative EnEff:Stadt. Durch eine optimale Visualisierung werden die Gebäudenutzer in das Energiekonzept mit eingebunden und sind somit befähigt variable Energieverbräuche zeitlich zu verschieben. Dies kann dazu beitragen Spitzenlasten abzuf puffern (vgl. ebd.).

Vor allem kann der Energieverbrauch für das neue Audimax Gebäude möglichst nachhaltig gestaltet werden und ist somit ein weiterer Baustein zur Zielerreichung der 100% Klimaneutralität der Leuphana Universität Lüneburg.

### **2.2 Aufbau und Vorgehensweise**

Im folgenden Abschnitt soll der Aufbau und die Vorgehensweise dieser Bachelorarbeit dargestellt werden. Diese Bachelorarbeit ist in acht Kapitel untergliedert. Im ersten Kapitel wurden bereits durch ein Abstract grob der Inhalt und die Ergebnisse dieser Bachelorarbeit aufgezeigt.

Im zweiten Kapitel wird durch die Einleitung an das Thema dieser wissenschaftlichen Arbeit herangeführt. In der Einleitung finden sich die Einordnung des Forschungsfeldes, die Motivation und Zielsetzung dieser Arbeit sowie die Herangehensweise dieser Ausarbeitung.

Das dritte Kapitel handelt von den theoretischen Grundlagen, die zum Verständnis dieser Arbeit notwendig sind. Hierbei werden zwei wesentliche Systeme vorgestellt, die als Grundlage dieser Arbeit dienen. Zunächst wird das Energiemonitoring beschrieben, welche die Rückkopplung des Energieverbrauchs für den Nutzer ermöglicht. Im Anschluss dieses Teilkapitels erfolgt die Anbindung an das nächste Teilkapitel. Es wird das Ambient Intelligence System vorgestellt, das zur Gewährleistung einer intelligenten Gebäudesteuerung und der aktiven Nutzerbeteiligung notwendig ist.

Im vierten Kapitel wird verstärkt die Rolle des Nutzers im Ambient Intelligence System aufgezeigt. Zusätzlich werden die Grundlagen eines Feedbacksystems beschrieben und Visualisierungsmöglichkeiten für den Nutzer dargestellt.

Stützt sich der theoretische Teil hauptsächlich auf Literatur- und Internetrecherchen, basiert der praktische Teil überwiegend auf eigenen Erfahrungen, die im Praktikum und bei den vorgestellten Programmen gewonnen wurden.

Das fünfte und sechste Kapitel beinhaltet den praktischen Teil dieser Arbeit. Im vierten Kapitel werden die Produkte der Synavision GmbH vorgestellt. Hierbei wird der Fokus auf den Synavision Plot Pilot gelegt, da im Praktikum hauptsächlich der Plot Pilot überprüft wurde. Dieser Teil wird mit einer Bewertung des Produktes abgeschlossen. Die Überprüfung erfolgte mit dem Ziel einer möglichen Umsetzung am neuen Zentralgebäude.

Im sechsten Kapitel werden aufbauend auf den Ergebnissen der vorigen Kapitel sowie eigenen Überlegungen, Optimierungsmöglichkeiten und Handlungsempfehlungen aufgezeigt. Hierbei wird eine optimale Benutzeroberfläche für eine App<sup>2</sup> vorgestellt.

Das siebte Kapitel bildet den inhaltlichen Abschluss dieser Bachelorarbeit. Es beinhaltet die Zusammenfassung und ein Fazit sowie einen Ausblick in die Zukunft.

Es folgt ein Quellen- und ein Anhangsverzeichnis.

---

<sup>2</sup> Eine App ist eine schmale Computer- oder Mobilesoftware, die eine bestimmte Funktion für den Benutzer erfüllt (Gründerszene 2014).

### **3. Grundlagen und Stand der Forschung**

Damit der Nutzer optimal in das Energiekonzept mit eingebunden werden kann, sind intelligente Systeme und technische Voraussetzungen notwendig.

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Systeme, die als Grundlage dieser Arbeit dienen, vorgestellt und näher erläutert.

#### **3.1 Energiemonitoring**

In den letzten Jahren wuchs der Bedarf an elektronischen Kommunikationsmöglichkeiten stark an. Die Technologie wurde immer besser und die Installationstechnik entwickelte sich im Hinblick auf die Vernetzung von Komponenten stetig weiter. Daraus entwickelte sich die Gebäudesystemtechnik, die sich bis heute durchgesetzt hat. Zur Gebäudesystemtechnik gehören Systeme zur Gebäudeautomatisierung wie Leon oder EIB, die ihre Sensoren und Aktoren über Bussysteme kontaktieren. Durch die Anwendung dieser Automatisierungssysteme soll der Komfort, die Sicherheit und nicht zuletzt Einsparungen von Ressourcen ermöglicht werden (vgl. Beck 2001:1).

Zur Abrechnung der verbrauchten Energien wird in der Regel eine Erfassung bzw. Verteilung durchgeführt. Je nach Energieart funktioniert dies mit unterschiedlicher Sensorik. Meist erfährt der Nutzer nur den kumulierten Verbrauch, welcher oftmals als nicht nachvollziehbar empfunden wird. Dieser Komplex kann durch eine zeitnahe grafische Darstellung der Verbräuche behoben werden. Eine zeitnahe und visuell aufbereitete grafische Darstellung gibt den Nutzer somit die Möglichkeit, Besonderheiten im Verbrauch mit dem eigenen Verhalten zu erklären und durch diesen direkten Bezug aus der Verbindung der Komponenten Verhalten und Verbrauch zu lernen.

Das System zur Visualisierung der Energieverbräuche wurde geprägt durch den Begriff Energiemonitoring.

##### **3.1.1 Begriffserklärung**

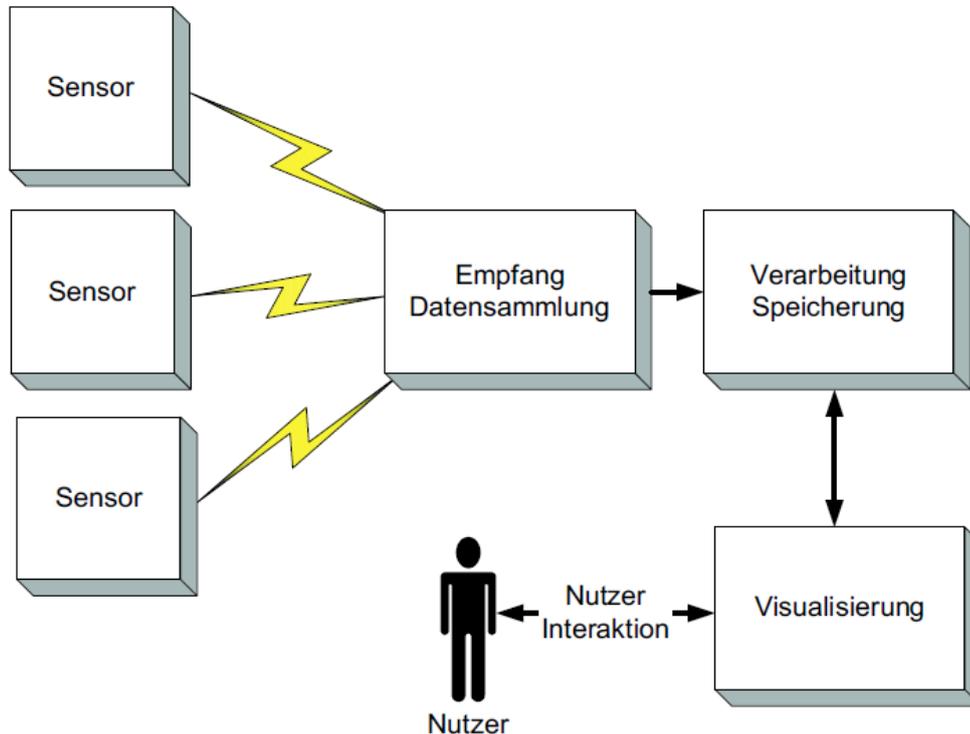
Energiemonitoring ist ein unverzichtbares Instrument, um Energieeinsparungen in Gebäuden zu realisieren. In der Definition bedeutet Energiemonitoring, die Darstellung von Energieverbräuchen durch technische Hilfsmittel (vgl. McClelland/ Cook 1979:9). Neben der reinen Abrechnung und der grafischen Darstellung wird darunter auch die Analyse des

Verbrauchs von Energie in Form von Strom, Wasser und Gas etc. verstanden. Damit betrachtet das Energiemonitoring den gesamten Bereich der Energie- und Verbrauchsmedien in Kommunen, Gewerbe, Industrie und der Wohnungswirtschaft.

Der Begriff „Monitoring“ entstand bereits im Jahre 1979. Zur dieser Zeit wurde ein Signalgerät getestet, das dem Nutzer seinen Stromverbrauch anzeigen konnte und Einsparungen von bis zu 12% ermöglichte (vgl. ebd.). Es wurde nachgewiesen, dass eine Rückkopplung des Energieverbrauchs den Nutzer motivieren kann, Energiesparen zu erlernen (vgl. Clemens 1983:83). Damals wurde diese Technologie nur für Großverbraucher und Energieerzeuger eingesetzt. Es wurde viel über den Einfluss von Nutzerverhalten im Bereich Raumkonditionierung nachgewiesen, allerdings gab es bis in den neunziger Jahren noch keinen Ansatz zur Erkennung und Eindämmung von Energieverlusten durch beispielsweise falsches Lüftungsverhalten (vgl. Mügge/ Günter 1993:68). Heute gibt es Ansätze und Technologien wie das Ambient Intelligence System, die in der Lage sind Nutzer auf Ihren Energieverbrauch aufmerksam zu machen und visuell durch ein Monitoring System darzustellen. In Kapitel 3.2 wird diese Thematik noch ausführlich behandelt.

### 3.1.2 Aufbau eines Energiemonitoringsystem

Die unten aufgeführte Abbildung veranschaulicht den Aufbau eines Energiemonitoringsystem.



**Abbildung 1: Aufbau eines Energiemonitoringsystem (vgl. Venzmer 2011:4)**

Energiemonitoringsysteme bestehen aus Sensoren, die den Energieverbrauch erfassen, meist in Form von herkömmlichen Zählern und die mit elektronischer Auslesemöglichkeit ausgestattet sind, um die ermittelten Energieverbräuche übertragen zu können. Dann gibt es den Datensammler, der die Sensordaten konzentriert und einer Einheit zur Verarbeitung und Speicherung zuführt. Eine weitere Einheit ist die Visualisierung, die die erfassten und gespeicherten Daten darstellt und somit die Schnittstelle zum Nutzer repräsentiert. Es können bei der Darstellung verschiedene zeitlich oder örtlich bezogene Auswertungen gewählt werden. Nach Venzmer (2011:4) sollte die Anzeige benutzerfreundlich und übersichtlich sein, die selbst von Nutzer ohne Vorkenntnisse sofort verstanden und bedient werden kann. Eine interaktive und verständnisvolle Visualisierung für die Nutzer ist allerdings noch ein allgegenwärtiges Problem. Im praktischen Teil wird hierfür ein Lösungsansatz aufgezeigt.

### 3.1.3 Sensoren

Die menschlichen Sinne wie sehen, hören, schmecken, fühlen und riechen sind jedem bekannt. Die Sensormesstechnik ist die Umsetzung dieser menschlichen Sinne in die Technik und somit ein hochinteressantes und hoch innovatives Betätigungsfeld. In der klassischen Definition ist ein Sensor ein Element, das aus einer physikalischen Größe ein meist analoges elektrisches Signal erzeugt (vgl. Sensorik<sup>1</sup>:2010). Sensoren sind in keinem Bereich der Technik mehr wegzudenken. Sie nehmen Messgrößen wie z.B. Druck, Temperatur, akustische und optische Signale u.v.m. auf und wandeln diese in elektrische Signale um. Mit Hilfe dieser Signale können Aktoren jetzt entsprechend reagieren z.B. Einschalten der Beleuchtung durch Bewegungsmelder.

Auch um die Energiemengen eines Gebäudes zu erfassen sind Sensoren notwendig. Die Abrechnung der zugeführten Energie würde ohne Sensorik nicht funktionieren. Je nach erfasster Energieträger ist die Ausführung bzw. das Messprinzip der Sensorik unterschiedlich. Im Nachfolgenden werden die unterschiedlichen Sensoren bzw. Zähler für Strom, Gas, Wasser und Wärme aufgeführt und deren Funktionsweise kurz erläutert.

#### *Wasserzähler*

Ein Wasserzähler ist ein Messgerät, welche das Volumen der durchgeflossenen Wassermenge anzeigt. Diese werden meist im geschäftlichen Verkehr, z.B. zwischen Versorgungsunternehmen und Verbraucher, eingesetzt (vgl. Sensorik<sup>2</sup> 2013).

#### *Gaszähler*

Gaszähler sind Messgeräte zur Erfassung einer in einem bestimmten Zeitraum durchgesetzten Gasmenge. Diese kommen überwiegend im Bereich der Gasversorgung zum Einsatz, werden aber auch zur exakten Mengenbestimmung bei labortechnischen Untersuchungen eingesetzt. Die vom Gaszähler erfasste Einheit ist der Kubikmeter im Betriebszustand, der zur Abrechnung in Normkubikmeter umgerechnet wird (vgl. Kramer 2001).

#### *Stromzähler*

Stromzähler sind Messgeräte zur Ermittlung der Menge einer gelieferten bzw. verbrauchten elektrischen Größe. Gemessen werden nicht elektrische Stromstärken, sondern elektrische Wirkleistung, die über die Zeit summiert wird, wodurch elektrische Energie gemessen wird. Gezählt werden in diesen Geräten mechanisch die Umdrehungen einer Scheibe, deren Drehzahl proportional zur Wirkleistung ist, oder elektronisch entsprechende Impulse (vgl. Sensorik<sup>3</sup> 2013).

#### *Wärmezähler*

Zur Ermittlung des Wärmeverbrauchs eines Gebäudes werden sogenannte Wärmezähler eingesetzt. Durch die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf eines Heizungsrohres und dem Durchfluss ist das Gerät in der Lage, die vom Verbraucher umgesetzte Energie zu ermitteln (vgl. Kuppler/ Friedemann 1993:78).

Die Entwicklung der Sensorsystemtechnik ist in den letzten Jahren sehr schnell vorangeschritten. Inzwischen entwickeln Forschungsinstitute und Ingenieure einfache Sensoren zu höher integrierten und intelligenten Systemen mit Selbstabgleich, Selbstüberwachung, umfangreicher Signalkonditionierung, Digitalisierung, digitaler Signalverarbeitung und digitalen Systemschnittstellen. Häufig werden nicht mehr analoge Messwerte an die lokale höhere Steuerungsebene übertragen, sondern digitale System- oder Störgrößen an zum Teil weit entfernte Überwachungszentralen.

Sensoren sind von besonderer Bedeutung für die Technik und Basis der Informationstechnik. Als enabling technology sind Sensoren ein Schlüssel für erneuerbare Energien und Energieeffizienz. Dabei werden sie sowohl für die Erforschung neuer Lösungen benötigt, als auch für deren späteren Betrieb und die Optimierung der Systeme.

#### **3.1.4 Einsparpotenziale**

Häufig ist die Zusammensetzung des Energieverbrauchs unbekannt und oft fehlen die Ressourcen und die nötige Fachkompetenz, um den Verbrauch zu optimieren. Ausreißer im Energieverbrauch zeitnah zu manifestieren und die Möglichkeit haben, steuernd einzugreifen, sind die entscheidenden Grundlagen für ein erfolgreiches Energiemanagement. Aus diesem Grund wurden Energiemonitoringsysteme entwickelt. Durch die permanente Überwachung der Energieverteilung können Probleme-, frühzeitig erkannt und vorbeugend behoben werden. Zu dem kann durch die Erfassung und Visualisierung der Energieflüsse und Identifizierung der größten Energieverbraucher das konkrete Einsparpotenzial bewertet werden und auch die Wirtschaftlichkeit möglicher Optimierungsmaßnahmen abgeleitet werden. Nachdem geeignete Maßnahmen und Konzepte zur Umsetzung definiert wurden, ist es wichtig, die konkreten Maßnahmen möglichst effektiv auszuschöpfen, um die Energieeffizienz des Gebäudes zu verbessern (vgl. Techem 2014).

### 3.1.5 Anbindung an das AmI

In diesem Kapitel wird erstmals der Übergang vom einfachen Energiemonitoring zum Ambient Intelligence System (AmI) aufgezeigt. Das AmI ist eine Erweiterung des Energiemonitoring, wofür auch die Nutzerinteraktion ein wichtiger Grundstein ist. Diese Nutzerinteraktion wird in Kapitel 4 noch näher beschrieben.

Um ein AmI-System einführen zu können, werden Schnittstellen benötigt. Diese lesen Online-Daten aus und ermöglichen die Rückgabe der Sollwerte an die Gebäudeleittechnik (GLT). Daraufhin werden über die GLT die nötigen Veränderungen vorgenommen. Die erwähnte Schnittstelle zwischen dem AmI und der GLT sollte über eine Openness Productivity Collaboration (OPC) stattfinden. Diese Steuerungssoftware ist eine Initiative zur Standardisierung des Datentransfers in der Automatisierung (vgl. OPC:2014). Bislang waren solche Softwaresysteme an Zugriffsverfahren der jeweiligen Steuerungshersteller gebunden. OPC dagegen bietet die Möglichkeit auf Prozessdaten beliebiger Hersteller in einheitlicher Art zuzugreifen und ist zusätzlich weit verbreitet in der Automatisierungstechnik. Aus diesen Gründen sollte die Programmierung mit angemessenem Aufwand möglich sein, ferner wurde diese Software in der Praxis bereits erfolgreich angewendet (vgl. Pebble:2012). Zudem kann mit Hilfe von OPC eine Anbindung an ERP-Systeme (Enterprise-Resource-Planing), wie SAP stattfinden. Wenn möglich, sollte hierfür der neue OPC-UA-Standard (OPC-Unified Architecture) eingesetzt werden, weil dieser die vielen verschiedenen alten OPC-Standards (OPC-DA, OPC-AE, OPC-HDA....) vereint. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass die alten OPC-Standards auf Microsoft Schnittstellen basieren. Bei diesen handelt es sich mittlerweile um veraltete Technologien. Der neue OPC-UA-Standard basiert auf einer serviceorientierten Architektur und durch die Nutzung von Webservices wird die Nutzung von OPC-UA-Standards plattformunabhängig. Weitere Alternativen zu OPC-UA-Standards könnten oBIX<sup>3</sup> und BACnet/WS<sup>4</sup> sein, wobei OPC-UA-Standards ein erweiterbares Datenmodell bietet. Ein Überblick über den Einsatz von Webservices im Gebäudemonitoring ist in Zach u.a., 2011 zu finden (vgl. Zach 2011:4).

---

<sup>3</sup> Open Building Information Exchange, abgekürzt oBIX, hat die Zielsetzung, eine herstellernerneutrale Kommunikation zwischen den mechanischen und elektronischen Kontrollsystemen in Gebäuden zu ermöglichen (vgl. <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/open-building-information-exchange-oBIX.html>).

<sup>4</sup> BACnet bildet eine webbasierende Schnittstelle zwischen Gebäuden und Automatisierungsgeräten (vgl. <http://www.ccontrols.com/pdf/Extv8n2.pdf>)

## **3.2 Ambient Intelligence**

In den letzten Jahren sind Computerchips vermehrt in Gegenständen des täglichen Gebrauchs zu finden. In vielen neuen Autos sind an die hundert Mikroprozessoren verbaut, alle elektrischen Geräte bis hin zum Garagentoröffner beinhalten digitale Schaltungen, auch Sicherungsetiketten für Kaufhauswaren sind als Funkchips ausgeführt.

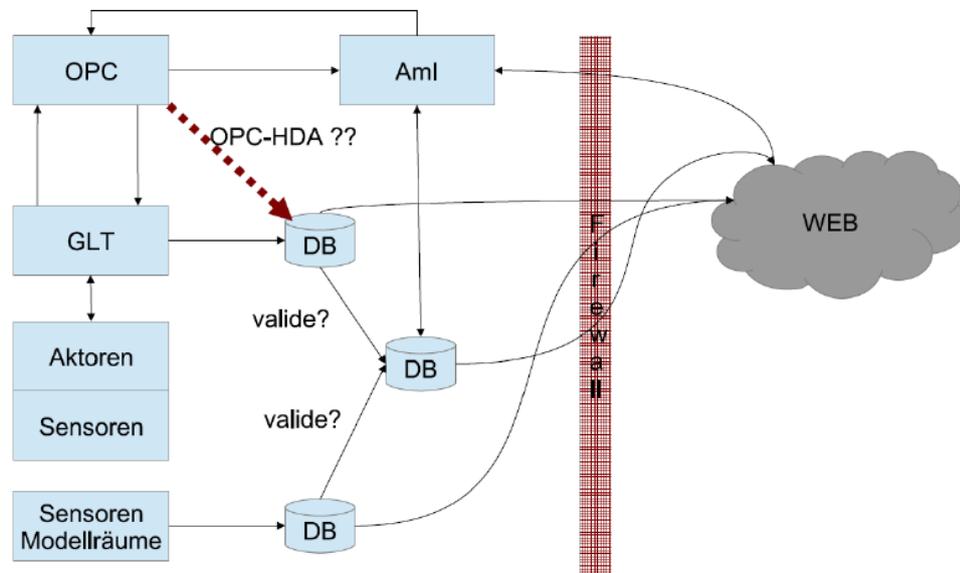
Seit einigen Jahren wurde eine ergänzende Entwicklung entdeckt, die vielfach als revolutionär gewertet wird. Durch die Vernetzung von Mikroprozessen untereinander und mit dem globalen Internet ist es möglich, Milliarden von Spezialcomputern zu einem großen Ganzen zu integrieren. Diese Veränderung wird häufig mit dem Leistungsunterschied zwischen Einzellern und hoch entwickelten Gehirnen verglichen. Es werden sichtbare Standardcomputer durch zukünftig unsichtbare- d.h. in Alltagsgegenständen integrierte Überallcomputer ersetzt. Auf diese Weise wird die vernetzte Computerintelligenz unsichtbarer, jedoch integraler Bestandteil unserer Umgebung bzw. unseres Ambiente. Deshalb der Begriff Ambient Intelligence (vgl. Encarnação 2006:12).

### **3.2.1 Begriffserklärung**

Der Begriff Ambient Intelligence ist eng mit den Begriffen Ubiquitous Computing sowie Pervasive Computing verwandt und wird oftmals synonym zu diesen verwendet, obgleich Unterschiede bestehen (vgl. Hansmann et al. 2001:1). In der Definition ist Ambient Intelligence eine intelligente Umgebung, die sensitiv und adaptiv auf die Anwesenheit von Menschen und Objekten reagiert und dabei dem Menschen vielfältige Dienste leistet (vgl. Münch/ Gabel 2005:1). Es ist dabei in der Lage, die Daten, die es aus der realen Welt aufnimmt, zu analysieren und darauf flexibel zu reagieren. Das System passt sich zudem den individuellen Bedürfnissen des Nutzers an und kann neue Geräte in das System integrieren. Dabei wird ein möglichst intuitiver Umgang des Menschen mit den involvierten Geräten angestrebt und individuelle und kontextspezifische Faktoren werden vom ambienten System zusätzlich berücksichtigt. Der Nutzen für den Menschen steht dabei im Vordergrund, während die Technik selbst immer weiter in den Hintergrund tritt und den Nutzer stattdessen aktiv aus dem Hintergrund heraus unterstützt (vgl. Fellner et al. 2010:9).

### 3.2.2 Aufbau eines Ambient Intelligence System

Die unten aufgeführte Abbildung veranschaulicht den prinzipiellen Aufbau eines AmI System.



**Abbildung 2: Aufbau eines AmI System (Meier 2012:6)**

Damit dieses System funktionieren kann, müssen die Räume mit Sensoren und Aktoren ausgestattet sein. Des Weiteren muss die Präsenz des globalen Netzes verfügbar sein, sowie eine Schnittstelle vom AmI System zur Gebäudeleittechnik. Zunächst melden die Sensoren in zeitlichen Abständen ihre Messwerte an die Gebäudeleittechnik (vgl. Geffken 2013:28). In einem weiteren Schritt werden die Signale an die Datenbank weitergeleitet (vgl. ebd.). Anschließend führt das AmI System die Messwerte aus der Datenbank zusammen und verarbeitet diese zusammen mit weiteren Rahmenbedingungen wie z.B. die Wetterprognose. Das Besondere am Ambient Intelligence System ist das integrierte Feedbacksystem, wodurch es in der Lage ist, sich auf Verhaltensweisen und Präferenzen einzustellen und mit dem Nutzer in Interaktion treten kann. Die Anforderungen der Nutzer sowie weitere Daten zur Nutzerinteraktion sind im AmI System gespeichert. Diese sind Daten wie beispielsweise-, die Eingriffshäufigkeit, personenbezogene Energieverbräuche sowie Kontextinformationen. Die Informationen sind ebenfalls neben den physikalischen Messwerten in einer gemeinsamen Datenbank vorhanden (vgl. Meier 2012:5). Die OPC Schnittstelle ermöglicht die Anbindung des Ambient Intelligence System an die Gebäudeleittechnik. Diese ermöglichen das Auslesen von Online-Daten sowie die Rückgabe der Sollwerte an die GLT(vgl. ebd.:9). Das System analysiert und berechnet das optimale Verhalten der Aktoren aufgrund der Anforderungen und Bedürfnisse der Nutzer und sendet ein entsprechendes Steuersignal an die Aktoren (vgl.

Geffken 2013:28). Der Ablauf kann erneut beginnen. Variable Gegebenheiten werden vom System automatisch angepasst (vgl. ebd.).

#### **3.2.3 Einzelraumregelung**

Das neue Zentralgebäude enthält viele geplante innovative Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs sowie der exergetisch optimierten Einbindung in das Campus-Energiesystem. Eine innovative Maßnahme ist das Ambient Intelligence System, welches den Nutzerinnen und Nutzer -den Einbezug in das Energiekonzept ermöglicht. Weiterhin sollen beispielsweise statische Heizsysteme und Unterflurkonvektoren sowie Trinkwarmwasser über Frischwasserstationen über ein 55°C - Niveau durch die Einzelraumregelung gesteuert werden.

Eine reine Einzelraumsteuerung reicht für eine intelligente Gebäudesteuerung nicht aus, da die Interaktion der Nutzer fehlt. Um zu verstehen inwiefern sich die Interaktion negativ auswirkt, wird nun die Thematik der Einzelraumregelung näher untersucht.

Einzelraumregelung sind seit Jahren bei vielen Neubauten Stand der Technik. Bei vielen bestehenden Bauten besteht jedoch ein verstärkter Nachrüstbedarf für diese Komfort steigernde und energiesparende Einrichtung. Die Einzelraumregelung ermöglicht die technische Voraussetzung dafür, dass in jedem Raum eines Gebäudes individuell der Sollwert für die Raumtemperatur nach einem beliebigen Zeitprogramm vorgegeben und eingehalten werden kann.

Durch die Erfahrung, dass Thermostatventile fortgeschrittener gegenüber handgeregelten Ventilen sind, dennoch den aktuellen menschlichen und technischen Anforderungen an eine moderne Heizungsanlage nicht mehr gerecht wurden, entwickelte sich die Einzelraumregelung (vgl. Knorr et al. 2005:58).

Folgende Erkenntnisse wurden bei der Beobachtung festgestellt (nach/vgl. ebd.):

- Beim Lüften öffnet sich das Thermostatventil und es wird aus dem Fenster geheizt
- Einstellung nur über Skale ohne echte Temperaturangaben
- Einstellwert ist abhängig von der Vorlauftemperatur (0,4 - 1,4° / 30° Vorlauf), individuell gefundene Einstellungen bleiben bei Änderung der Außentemperatur nicht erhalten
- Die Nachtabsenkung der Vorlauftemperatur führt zum Öffnen der Ventile und der Wasserstrom in den Heizkörpern wird stark erhöht. Die Absenkung der Raumtemperatur ist gering und die Stromkosten der Pumpen steigen.
- Zeitliche und raumweise unterschiedliche Absenkung ist nicht möglich
- Thermostate werden immer „hochgestellt“, aber nur selten wieder zurückgeregelt

Die Auswirkungen dieser Nachteile sind bei kleiner Raumanzahl durch engagierte Bedienung der Thermostatventile in Grenzen zu halten. Aber nur wenige Menschen werden aktiv (ebd.).

Das Ziel einer Einzelraumsteuerung ist es, die Differenz zwischen der gewünschten Soll-Temperatur der Nutzer und abhängigen Ist-Temperatur möglichst gering zu halten. Durch den Abgleich zwischen Raum- Ist-Temperatur und Raum- Soll-Temperatur kann das System direkt auf raumspezifische Veränderungen reagieren. Wie sensibel das System ist, hängt dabei wiederum von den Spezifikationen der Sensoren und Steuerungseinheiten ab (vgl. Geffken 2013:29).

Die Einzelraumregelung ist besonders effektiv, wo Räume eines Gebäudes zu unterschiedlichsten Zeiten mit verschiedenen Anforderungen an die Raumtemperatur genutzt werden.

Universitäten oder Schulen sind geeignete Beispiele für besonders unterschiedliche Nutzungsbedingungen, die zum Sparen von Energie und Heizkosten auffordern.

In der Leuphana Universität gibt es große Unterschiede in der Nutzungszeit der Räume

- Keine Vorlesungen in den Semesterferien
- Sonderveranstaltungen in den Abendstunden
- Keine durchgängige Nutzung der Räume
- Wochendebetrieb variierend
- Seminare für Dozenten an unterschiedlichen Tagen
- Hausmeister und technische Kräfte nach Arbeitszeit

Des Weiteren gibt es große Unterschiede in der benötigten Raumtemperatur, z.B.

- WC
- Flure
- Seminarräume
- Hörsaal
- Teeküche
- Büros
- Fremdwärmequellen (Dozenten und Studenten, Mitarbeiter etc.)

Mit zunehmender Individualisierung der Arbeitszeit und steigenden Energiekosten wird die Einzelraumregelung zur praktischen Notwendigkeit um die Betriebskosten wirtschaftlich zu gestalten.

Allerdings reicht eine reine Einzelraumregelung für das neue Zentralgebäude nicht aus, da die Interaktion der Nutzer fehlt. Aus diesem Grund ist ein Feedbacksystem empfehlenswert, wobei dafür ausreichende Messdaten und entsprechende Forderungen aufbereitet und zurück gemeldet werden müssen. In Kapitel 3 wird das Thema der Nutzerinteraktion und das damit verbundene Feedbacksystem detaillierter erläutert und beschrieben.

### **3.2.4 Anwendungsbereiche des AmI**

Intelligente Umgebungen erleichtern den Anwendern das Leben. Sie passen sich selbstständig, proaktiv und situationsspezifisch den Bedürfnissen und Zielen der Nutzer an, um sie im täglichen Leben zu unterstützen (vgl. Friedewald et al.2005:105 f.).

Typische Einsatzbereiche finden sich im Bereich der Logistik und insbesondere im Supply Chain Management, aber auch in Aus- und Weiterbildungsprozessen sowie im Gesundheitssektor und im Eigenheim.

Der Heimbereich ist der am weitesten untersuchte Bereich, in dem AmI erforscht wird. In einem intelligenten Zuhause werden die Bewohner und ihre Aktivitäten durch viele Sensoren beobachtet und entsprechende Dienste werden angeboten. Das Projekt Phillips Homelab<sup>5</sup> hat viele Untersuchungen und Forschungen durchgeführt, um ein AmI-basiertes Heim besser zu gestalten. Viele neue Ideen und Konzepte wurden zu diesem Zweck untersucht, wie z. B. die

---

<sup>5</sup> <http://www.research.philips.com/technologies/projects/ami/background.html>

Sprache- und Gestenerkennung, drahtlose Netzwerke, der Umgang von Menschen mit Computersystemen usw. (vgl. Donath :2013).

Im Gesundheitssektor werden Intelligente Umgebungen sowohl in Krankenhäusern als auch in privaten Wohnungen eingesetzt. So können in einem Krankenhaus beispielsweise leere Betten automatisch erfasst und gemeldet werden oder das Personal je nach Situation zugewiesen werden. Zu Hause kann z.B. ein „intelligenter“ Medizinschrank seinem Benutzer über die korrekte Menge der Tabletten informieren und bei aufgebrauchten Medikamenten dem Hausarzt melden. (vgl. Seibt et al.2010:1f.).

Der Begriff Ambient Assisted Living ist ebenfalls ein Bereich, in dem es hauptsächlich um das Leben in einer unterstützenden Umgebung handelt. Das Ziel dabei sind die Bedürfnisse der älteren und kranken Bevölkerungen zu befriedigen. Das Konzept wurde entwickelt, um die Unabhängigkeit und das tägliche Leben dieser Menschen zu unterstützen (vgl. Zagler 2009:9). Das Ambient Assisted Living steht im engen Zusammenhang mit dem Heim- und Gesundheitsbereich. Es gibt viele Projekte, die sich mit diesem Bereich beschäftigen. Das deutsch-ungarische BelAmI-Projekt ist ein Beispiel davon (vgl. BelAmI 2009).

Es gibt auch andere Gebiete, in den AmI angewendet werden kann. So werden beim Straßenverkehr die Situationen des Verkehrs automatisch erfasst und der Verkehrsleitzentrale gemeldet, so dass der Verkehr situationsgerecht gesteuert wird. Im Bereich Logistik und Handel wird durch den Einsatz von „RFID-Chips“ (Funketiketten) eine Identifikation von Behältern auch aus größeren Entfernungen möglich (vgl. Seibt et al.2010:1f.).

Die Leuphana Universität hat sich ebenfalls das Ziel gesetzt, das Ambient Intelligence System für das neue Zentralgebäude umzusetzen. Die Visionen und Anforderungen an dieses System sowie datenschutzrechtliche Aspekte werden im nachfolgenden Abschnitt behandelt.

#### **3.2.5 Vision und Anforderungen an das Ambient Intelligence System**

Im Mittelpunkt der Vision von Ambient Intelligence stehen die Anforderungen der Nutzer an den Raumkomfort. Eine intelligente, vorausschauende Steuerung der technischen Gebäudeausstattung ermöglicht den Energieverbrauch erheblich zu senken. Dafür benötigt das System Informationen aus verschiedenen Quellen, um den Zustand des Gebäudes vorhersagen zu können. Wesentliche Daten sind vor allem die Präferenz des Nutzers, die Kontextinformationen über den Nutzer wie beispielsweise die Arbeitszeiten, die zur Verfügung stehende Energie und die Wettervorhersage. Das System soll die relevanten

Größen durch Nutzereingaben und Kontextinformationen aufnehmen und daraus Nutzerprofile erstellen. Die Benutzereingaben können mittels Smartphone oder Laptops eingegeben werden (vgl. Meier 2012:3).

Durch die Profilerstellung wird das Ambient Intelligence System in der Lage sein, die Präferenzen der Nutzer vorhersagen zu können und auf diese Weise schon frühzeitig die vorhandenen Ressourcen am Zentralgebäude möglichst genau einplanen können (vgl. ebd.:4).

Zusätzlich sollen die Nutzer des Zentralgebäudes ein Feedback bzw. eine Rückmeldung zu ihren Energieverbräuchen erhalten, um sie gezielt auf ihren Umgang mit dem Energieverbrauch aufmerksam zu machen. Damit Unstimmigkeiten oder Probleme in der frühen Phase bereits erkannt bzw. gar nicht erst entstehen können, wird die Funktion der automatischen Fehlererkennung in Betracht gezogen.

Die Vision ist eine Brücke zwischen rein energetischen Effizienzbetrachtungen und erhobenen Messdaten bis hin zu einem nutzerorientierten Energiemanagement zu schlagen (ebd.).

#### **3.2.6 Recht und Privatsphäre**

Ambient Intelligence ist eine Technologie, die dem Menschen vielseitige Dienste anbietet und deren Nutzern das Leben in gewisser Weise erleichtert. Doch beinhalten auch solche fortgeschrittene intelligente Systeme Risiken, die beachtet werden müssen. Zunehmend werden datenschutzrechtliche Aspekte außer Acht gelassen, die vor allem beim Benchmarking mit anderen Nutzern, fraglich werden. Der Erfolg von intelligenten Umgebungen wird entscheidend davon abhängen, wie gut persönliche Daten sowie die Privatsphäre und andere Rechte des potenziellen Nutzers geschützt werden können und ob es gelingt, Vertrauen gegenüber der wenig greifbaren informatisierten Umwelt aufzunehmen (vgl. Seibt et al.2010:26).

Die Begriffe Privatsphäre, Identität, Sicherheit und Vertrauen sind die Schlüsselfragen von intelligenten Umgebungen, die in den Zukunftsversionen thematisiert worden sind. Daher wächst innerhalb der Forschungs- und Entwicklungsszene das Bewusstsein über eine systemimmanente Herausforderung für soziale Normen und Werte hinsichtlich Privatsphäre und Überwachung, welche von unsichtbaren, intuitiven und allgegenwärtigen Computernetzen ausgeht. Als potenzielle Gefahrenquelle für die Privatsphäre werden zwei technische Innovationen herangezogen: Zum einen die massiv erhöhten Kapazitäten zur

technischen Erfassung und Speicherung alltäglicher Aktivitäten und Interaktionen von Privatpersonen in vielfältigen Ausprägungen sowie über große Distanzen und Zeiträume hinweg, zum anderen die gesteigerten Fähigkeiten zur schnellen Durchsuchung von großen Datenbanken, womit zusätzlich Möglichkeiten zur Erstellung von personenbezogenen Datenprofilen und andere Formen des Data Mining einhergehen.

Auf diesem Gebiet werden folgende allgemeine Problembereiche identifiziert, mit denen die Nutzer bzw. Betroffenen von AmI konfrontiert werden:

- Ein allgegenwärtiges Netzwerk von Anwendungen und Kommunikationen zieht einen massiven Anstieg bei der Erhebung und Übermittlung personenbezogener Daten nach sich.
- Die Einführung von biometrischen Verfahren und Wahrnehmungssensoren für bestimmte Anwendungen wird die Qualität der im Umlauf befindlichen personenbezogenen Daten verändern.
- Um personalisierte Dienste anbieten zu können, wird durch AmI-Systeme ein Großteil des Alltagslebens digital erfasst und gespeichert.

Die aufgeführten Probleme im Bereich der Privatsphäre werden sich im Verlauf der technischen Entwicklung sukzessiv entfalten. Deswegen ist eine frühzeitige Auseinandersetzung mit den potenziellen Risiken der Technologie empfehlenswert, wenn diese in gesellschaftliche erwünschte Bahnen gelenkt werden sollen. Diese Thematik wird aufgrund der begrenzten Kapazität im Rahmen dieser Bachelorarbeit nicht weiter ausgeführt, sollte jedoch durch ein Folgeprojekt behandelt werden.

#### **4. Nutzerinteraktion durch Ambient Intelligence System**

Die Leuphana Universität hat sich zum Ziel gesetzt, eine nachhaltige und klimaneutrale Universität zu werden. Um Energie einzusparen, setzt die Universität seit etwa zwanzig Jahren technische Maßnahmen ein (vgl. Lüdeke-Freund/Burandt, 2010). Im folgenden Kapitel wird zuerst die Rolle des Nutzers im Ambient Intelligence System aufgezeigt. Anschließend werden Feedbackmöglichkeiten und die Visualisierung erläutert. Warum der Nutzer berücksichtigt werden muss und warum eine möglichst effiziente Optimierung nur durch Einbindung der Nutzer erreicht werden kann, wird in Kapitel 4.1 aufgeführt. In Kapitel 4.2 werden die Methoden und Maßnahmen in handlungsunterstützende und handlungsaktivierende Maßnahmen eingeteilt und in Kapitel 4.2.1 wird nachfolgend erläutert,

wie die bestmögliche Optimierung der Nutzerinteraktion für das Audimax-Gebäude erreicht werden kann. In Kapitel 4.3 werden die effektivsten Feedbackmöglichkeiten aufgezeigt. Auch wie diese Feedbackmethoden am besten dem Nutzer vermittelt werden, wird in diesem Kapitel angesprochen. Welche Visualisierungsarten es gibt und wie diese dargestellt werden sollten, wird im Kapitel 4.4 erläutert.

### **4.1 Einbindung der Nutzer**

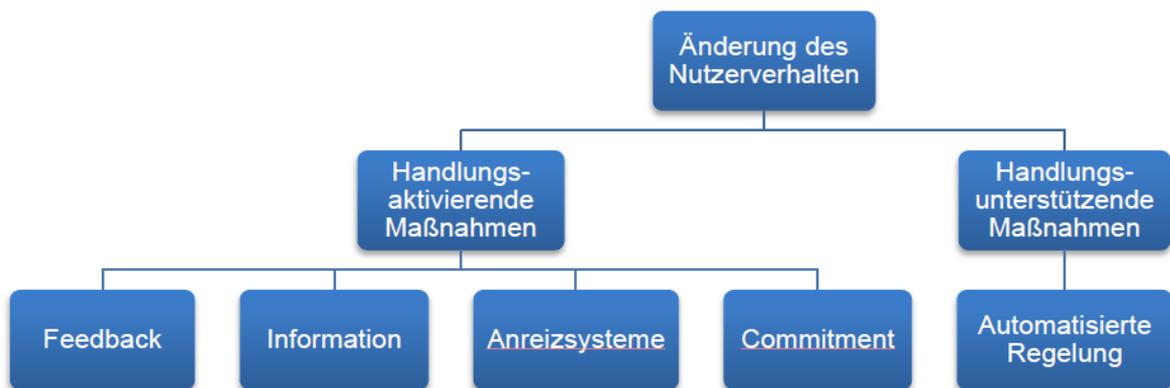
Die Rolle des Nutzers im Ambient Intelligence System muss berücksichtigt werden, da der Nutzer Schwankungen des Verbrauchs im Verhältnis von 1:3 verursachen kann (vgl. Klan, H., Kast, W 1988:552). Eine aktuellere Studie der TU Braunschweig ergab eine durchschnittliche Abweichung von bis zu 70% zwischen dem theoretischen und praktischen Energiebedarf. Diese Abweichungen entstanden durch den Einfluss der Nutzer auf den Energieverbrauch, welches durch die Analyse von FISCH/PLESSER verdeutlicht wurde (vgl. Fisch/Plessner 2007:154). Aus diesem Grund sollte die Optimierung der Nutzerinteraktion einer der Hauptbestandteile beim Energiemanagement sein. Ergänzend dazu ist zu erwähnen, dass die Einsparungen durch Optimierung der Nutzerinteraktion, im Verhältnis zu den Investitionskosten sehr hoch sind (Opel et al. 2013:114).

Die Interaktion zwischen Nutzer und System kann wie folgt ablaufen: Das Ambient Intelligence System wird an die jeweiligen Nutzer gekoppelt. Durch die Interaktion versucht das System den Nutzer auf mögliche Fehler hinzuweisen und zeigt zugleich eine effiziente Alternative auf. Dabei bleibt die Hauptverantwortung beim Nutzer, dieser soll lediglich durch kooperatives Handeln mit dem Ambient Intelligence System energiesparend agieren. Der Nutzer kann auch selbstständig Verbrauchsdaten aufrufen und beispielsweise verschiedene Büroräume mit einander vergleichen. Nur durch diese ständige Interaktion zwischen Nutzer und System kann die Energieeinsparung für das neue Zentralgebäude optimiert werden.

### **4.2 Methoden und Maßnahmen**

In diesem Kapitel werden die Maßnahmen nach Gardner & Stern in handlungsaktivierende Maßnahmen und handlungsunterstützende Maßnahmen aufgeteilt (Gardner & Stern 2002:261), um auf das Nutzerverhalten positiv einwirken zu können. Handlungsaktivierende Maßnahmen stellen diejenigen Maßnahmen dar, die den Nutzer zum Energiesparen motivieren (z.B. in Form von Feedback, Aufklärung oder Anreizsystemen).

Handlungsunterstützende Maßnahmen bestehen aus technischen Geräten und assistieren das Nutzerverhalten, z.B. durch automatisierte Regelung von Licht oder Wärme, und sollen zu Energieeinsparungen führen. Jedoch kann das Wissen um den geringeren Verbrauch zu unachtsamen statt zu bewusstem Umgang mit den technischen Geräten führen. Ein solches Verhalten der Nutzer wird als substitutionsbezogener Reboundeffekt bezeichnet (vgl. Berkhout et al. 2000:431).



**Abbildung 3:** Verdeutlicht grafisch die Unterscheidung zwischen handlungsaktivierenden und handlungsunterstützenden Maßnahmen (vgl. Opel et al. 2013:105).

#### 4.2.1 Handlungsaktivierende Maßnahmen und handlungsunterstützende Maßnahmen

Das größte Einsparpotenzial für ein Feedbacksystem besteht bei der Gebäudeplanung und der Gebäudeerrichtung. Bei fertiggestellten Gebäuden ist die Installation besonders teuer, weil das Feedbacksystem an die Gebäudeleittechnik gekoppelt werden muss. Somit ist es von Vorteil, das nötige Messsystem bereits bei der Gebäudeplanung zu berücksichtigen. Dies ist bei dem Neubau des Zentralgebäudes der Leuphana Universität geschehen. In diesem Bereich wurden entsprechende Lösungen bereits erarbeitet und das Messsystem bei der Gebäudeplanung der Leuphana Universität für diese Ansprüche ausgelegt. Im neuen Zentralgebäude werden in den Büros folgende technische Hilfsmittel verbaut:

- Präsenzmelder
- Temperatursensor
- Lichtstärkenregler

- CO2-Sensor
- Fensterkontakt-Sensor
- Stromverbrauchszähler
- Stellventil Heizkörper

Diese technischen Hilfsmittel werden den handlungsunterstützenden Maßnahmen zugeordnet und haben somit einen geringen Lerneffekt (vgl. Abrahamse et al. 2005:274). Verbindet man jedoch die gemessenen Daten von den handlungsunterstützenden Maßnahmen mit dem Feedbacksystem der handlungsaktivierenden Maßnahmen, sollte die bestmögliche Optimierung der Kundeninteraktion erreicht und negative Einflüsse des substitutionsbezogenen Reboundeffektes könnten verdrängt werden.

Aus diesem Grund spielt das Feedbacksystem bei der Erreichung der bestmöglichen Kundeninteraktion eine wichtige Rolle. Im nächsten Abschnitt wird deshalb dargestellt, welche Feedbackmöglichkeiten am besten geeignet sind und in welcher Form diese dargestellt werden sollten.

### **4.3 Feedbacksystem**

Wie bereits dargestellt kann der Nutzer einen großen Einfluss auf den Energieverbrauch haben. Aus diesem Grund sollte sein Verhalten optimiert werden. Diese Optimierung kann mit Hilfe von Anreizsystemen erreicht werden und sie wirken am effektivsten in Kombination mit einem Feedback (Martiskainen 2007:43). In der Studie von Fischer wurden verschieden Feedbackkriterien aufgeführt und nach ihrer Einsparmöglichkeit beurteilt (Fischer 2008:97ff.). Laut der Studie sollte das Feedback in Form eines digitalen Mediums erfolgen. Die Messdaten sollten interaktiv gestaltet sein und aus einer Kombination von Texten, Tabellen und Diagrammen bestehen (ebd.). Für den Inhalt des Feedbacksystems ist es wichtig, dass die Rückmeldungen an den Nutzer einfach zu verstehen sind und in mindestens täglichen Abständen stattfinden. Jedoch sind auch bei einem wöchentlichen oder monatlichen Feedback nennenswerte Erfolge zu erwarten. (ebd.:101). Laut Fischer sollte das System auch über einen langen Zeitraum Daten auswerten können und die eigenen Verbrauchsdaten mit denen anderer Nutzer im Vergleich darstellen (ebd.).

Eine weitere Feedbackmöglichkeit liefert uns das Experiment der Verhaltenswissenschaft, welches vor einigen Jahren in San Marcos, Kalifornien, stattfand. Studenten hängten Zettel an

die Haustüren der Bewohner, auf den hingewiesen wurde lieber Ventilatoren statt die Klimaanlage im Sommer zu nutzen. Dazu wurden von Viertel zu Viertel unterschiedliche Gründe für die Umstellung von der Klimaanlage auf die Ventilatoren genannt. Ein Viertel bekam einen Umwelthinweis, ein anderes bekam den möglichen Sparhinweis und ein weiteres Viertel sollte dadurch Stromausfälle verhindern. Bei der Auswertung wurde festgestellt, dass keines dieser Hinweise den geringsten Effekt bei den Nutzern verursachte. Ein Viertel bekam jedoch noch einen vierten Hinweis, und zwar das 77% der Nachbarn ihre Klimaanlage ab- und ihren Ventilator anstellen. Genau in diesem Viertel wurde nachweislich weniger Energie verbraucht, nur weil den Bürgern gesagt wurde, wie sich ihre Nachbarn verhalten (vgl. Laskey:2013). Dies bedeutet, dass sich die Nutzer bei unbequemen Alternativen nicht von finanziellen Anreizen oder Maßhalteappellen beeinflussen lassen. Durch den Konformitätsdruck werden sich die Nutzer eher für die unbequeme Variante entscheiden.

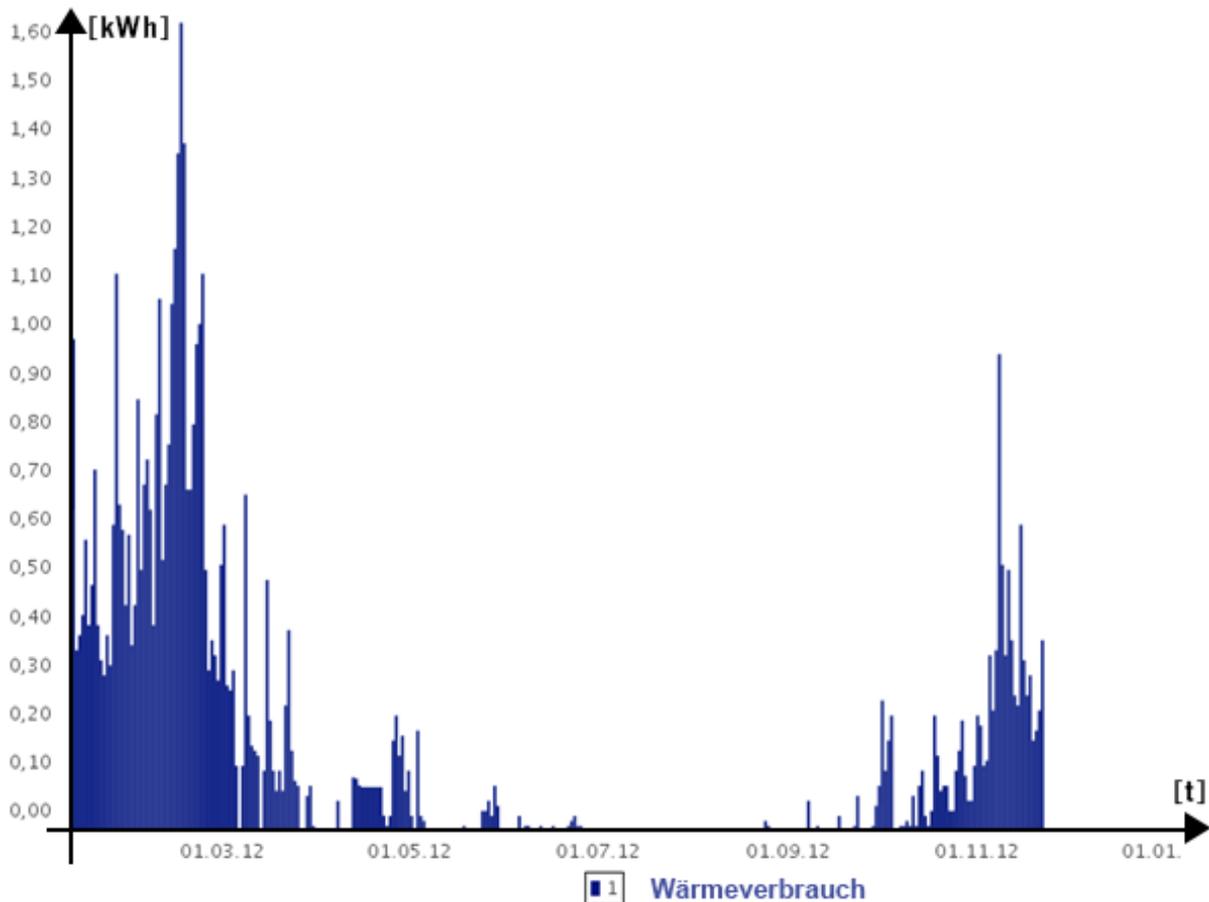
Um eine Betriebsoptimierung im neuen Audi-Max Gebäude zu erreichen, sollte der Nutzer zusätzlich Angaben zu seiner Zufriedenheit machen können. „Mit Betriebsoptimierung von komplexen Anlagen werden alle Handlungen und Maßnahmen im Lebenszyklus einer haustechnischen Anlage verstanden, die zum Ziel haben, diese Anlagen mit einem minimalen Ressourceneinsatz unter Berücksichtigung der jeweiligen Wirtschaftlichkeit zu betreiben. Dabei sind die vereinbarten Bedingungen einzuhalten.“(Energie Schweiz 2002:4)

Ausgangsbasis zu den Angaben über die Zufriedenheit der Nutzer sollten die Regeln für Arbeitsplatzvorschriften bilden, welche die Normen zum bestehenden Raumparameter bilden (vgl. Lohmann-Haislah: 2012). Diese Werte könnten als Startwerte für ein angenehmes Raumklima dienen und würden die Nutzer nicht mit der Angabe von Sollwerten belasten. Zudem könnte der Nutzer über eine Sieben stufige Skala (-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3) seine Zufriedenheit zur Raumtemperatur mitteilen. Hierzu könnte die „0“ für Zufriedenheit stehen. Am Beispiel der Temperatur wäre die „+2“ zu warm und die „-1“ wäre etwas zu kalt. Daraufhin wird über die Gebäudeleittechnik die notwendige Änderung vorgenommen und das System ordnet den individuellen Raumkomfort jedem einzelnen Nutzer, bzw. seinem Büro, automatisch zu. Damit sollten die Präferenzen der Nutzer kontextbezogen erfasst sein. Nach diesem Schritt ist die Grundfunktionalität des Systems abgeschlossen und im zweiten Schritt sollte das AmI-System die Regelung der Raumtemperatur selbstständig übernehmen. Im dritten Schritt sollte der Nutzer auf mögliche Einsparungen hingewiesen werden und die vom Nutzer angeforderte Energie mit der bereitgestellten, erneuerbaren Energie in Einklang

gebracht werden. Im folgenden Kapitel werden wichtige Visualisierungskriterien genannt und erste Visualisierungsmöglichkeiten aufgezeigt.

#### **4.4 Visualisierung**

Die Informationsvisualisierung ist ein Werkzeug des Feedbacksystems und stellt eine Schnittstelle zwischen dem System und dem Nutzer her. Aus diesem Grund sollte diese Komponente besondere Aufmerksamkeit erhalten und nach den Kriterien Übersichtlichkeit, Bedienbarkeit und Ergonomie erstellt werden. Wie aus Kapitel 4.3 bereits bekannt, sollte das Feedback aus der Kombination von Texten, Tabellen und Diagrammen bestehen und in Form eines digitalen Mediums mit dem Nutzer interagieren. Die Verbrauchsdaten sollen in einer klar strukturierten Bedienoberfläche zusammengefasst werden. Das Smartphone eignet sich hierbei als Hardwareplattform und bietet eine gute Möglichkeit der Visualisierung. Über eine App wäre die grafische Darstellung mit verschiedenen Anzeigefarben und weiteren notwendigen Verbrauchsinformationen keine große Herausforderung für diese Hardware. Zudem lag laut Statista.com bereits im Okt. 2013 die Anzahl der Smartphone Nutzer in Deutschland bei rund 37,4 Millionen (vgl. Visualisierung:2013). Nachteilig erscheinen dagegen der immer steigende Stromverbrauch der Smartphones und eine eventuell komplizierte Bedienung der App, diese Problemstellung wird in der Arbeit von Andreea Tribel noch ausführlich behandelt. Ein weiterer Nachteil besteht in der Verpflichtung ein Smartphone zu besitzen, um eine Interaktion mit dem System zu erreichen. Eine mögliche Alternative wären Mikrocontroller und LC-Displays, welche an sinnvollen Positionen angebracht werden könnten, um den Nutzer Informationen über den Stromverbrauch zu geben. Allerdings gestaltet sich eine Interaktion mit diesen technischen Geräten als schwierig. Ein Feedback kann nicht regelmäßig stattfinden und Steuerungsmöglichkeiten für Heizkörper, Lüftung und andere an das System gekoppelte Geräte könnten mit falschen Absichten von unbefugten dritten Personen verändert werden. Aus diesem Grund sollten nur allgemeine Verbrauchsdaten, ohne weitere Funktionen, an zentralen Orten visualisiert werden. Diese grafische Aufbereitung der allgemeinen Verbrauchsdaten könnten wie folgt gestaltet sein.

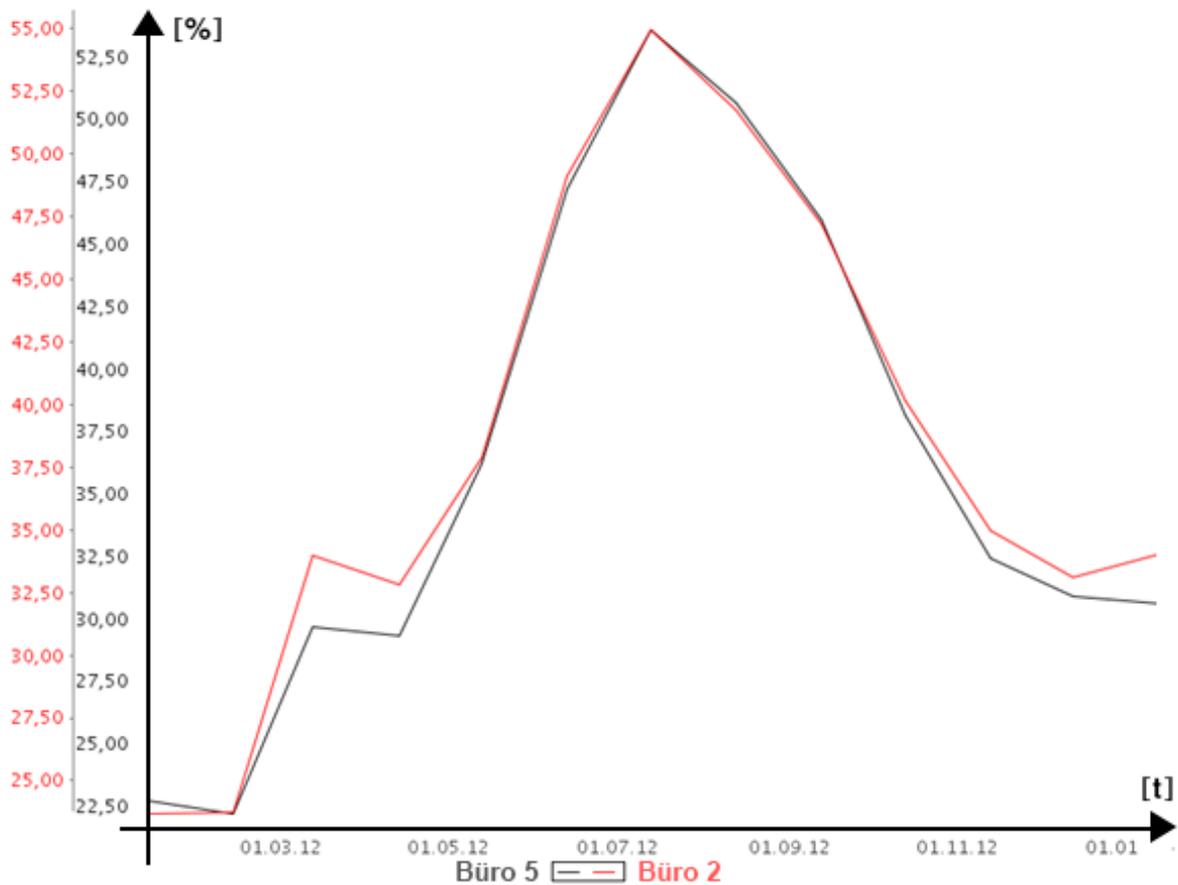


**Abbildung 4: Mögliche Darstellung der allgemeinen Verbrauchsdaten über einen längeren Zeitraum.**

Bei der Grafik handelt es sich um ein Säulendiagramm. Diese zeichnen sich durch ihre Übersichtlichkeit aus und gehören zu den am häufigsten verwendeten Diagrammtypen. Säulendiagramme lassen Rückschlüsse auf Häufigkeiten und Unregelmäßigkeiten zu und eignen sich aus diesen Gründen für die Visualisierung von allgemeinen Verbrauchsdaten an zentralen Orten.

Die Nutzerinteraktion sollte dagegen über ein Smartphone stattfinden. Für diese Nutzerinteraktion können auch persönliche Verbrauchsdaten über die App dargestellt werden. Hierzu wäre auch ein direkter Zugriff auf Heizkörper und andere an das System gekoppelte Geräte vorteilhaft. Der Zugriff sollte sich allerdings auf die im eigenen Büro befindenden Geräte beschränken, um Veränderungen mit falschen Absichten von unbefugten dritten Personen zu vermeiden. Für die Nutzerinteraktion sollte eine erweiterte Auswertung der Messdaten möglich sein. Damit sollte zum Beispiel ein Vergleich über einen längeren Zeitraum mit den Werten eines vergleichbaren Büros stattfinden. So erhält der Nutzer eine direkte Vergleichsmöglichkeit seines Verhaltens mit den anderer über einen

längeren Zeitraum. Wie diese Grafik aussehen kann, wird in der folgenden Abbildung beispielsweise dargestellt.



**Abbildung 5: Mögliche Darstellung der Verbrauchsdaten zweier Büros über einen längeren Zeitraum.**

Bei der oben aufgeführten Abbildung handelt es sich um ein Liniendiagramm. Dieser Diagrammtyp ist weit verbreitet und eignet sich besonders um Tendenzen über einen längeren Zeitraum aufzuzeigen. In diesem Beispiel wird zusätzlich eine Vergleichsmöglichkeit geschaffen, indem Messdaten von zwei verschiedenen Büroräumen in einem Diagramm dargestellt werden.

## 5. Synavision

In Kapitel 3 wurden alle grundlegenden Informationen zum Energiemonitoring und zum Ambient Intelligence System erläutert, die für das Verständnis des Gesamtsystems notwendig sind. In Kapitel 4 wurde die Rolle der Nutzer und dessen Interaktion näher beschrieben und die theoretische Grundlage für die Visualisierung und das Feedbacksystem wurde erbracht. In dem folgenden Kapitel wird nun die praktische Phase dieser Bachelorarbeit beschrieben.

Hierzu werden erst mal einige wichtige Informationen zu dem Unternehmen Synavision GmbH gegeben und einzelne Produkte vorgestellt. Dabei wird das Produkt Plot Pilot besonders detailliert erläutert, da dieses Software-Tool zur Visualisierung eingesetzt werden sollte. In der praktischen Phase wurde getestet in wieweit sich der Plot Pilot durch Visualisierung der Verbrauchsdaten für eine Nutzerinteraktion eignet. Zu diesem Zweck wird zuerst die Funktionsweise des Software-Tools in Kapitel 5.2 beschrieben. Zusätzlich werden in Kapitel 5.3 die Anwendungsbereiche der Synavision GmbH aufgezeigt. In Kapitel 5.4 wird der Vorgang bei der Aufbereitung der Messdaten erläutert und mit einigen Screenshots verdeutlicht. In dem darauf folgendem Kapitel 5.5 werden unterschiedliche Verbrauchsmesswerte in drei Arbeitsschritten visualisiert. Anschließend werden in Kapitel 5.6 die Grenzen des Software-Tools aufgezeigt. Zuletzt wird in Kapitel 5.7 das Software-Tool bewertet und weitere zusätzliche und nützliche Einstellmöglichkeiten angesprochen.

### **5.1 Was ist Synavision?**

Die Synavision GmbH ist ein Spin-Off-Unternehmen des Lehrstuhls für Software Engineering RTWH Aachen und des Instituts für Gebäude- und Solartechnik der Technischen Universität Braunschweig. Ein Spinn-Off-Unternehmen entsteht aus einer Ausgliederung einer Organisationseinheit aus bestehenden Strukturen von Unternehmen, Universitäten oder Forschungsinstituten. Diese Neugründung des Unternehmens wird durch Mitarbeiter der Ursprungsorganisation vollzogen (vgl. Wirtschaftslexikon.Spin-Off-Unternehmen:2013). Das noch junge Unternehmen hat ihren Sitz in Aachen und legt ihr Augenmerk auf die softwaregestützte Planung und das Gebäudemanagement.

Um innovative Produktlösungen sowie kundenspezifische Individuallösungen im Bereich der Datenerfassung und -auswertung anbieten zu können, entwickelte Synavision GmbH ein Software-Tool. Der Kundenstamm für das Software-Tool besteht noch hauptsächlich aus Städten, Kommunen sowie Erstellern von Energiebedarfsausweis nach der Energiesparverordnung (EnEV). Die Energiesparverordnung ist die wichtigste Verordnung zur Energieeffizienz von Gebäuden (Dipl. Ing Tuschinski:14). Den Kunden von Synavision ermöglichen die Softwaresysteme ein einfaches und effektives Abarbeiten ihrer Prüfpflichten. Der Kundenstamm sollte sich in der Zukunft jedoch stark erweitern, da das Thema der Energieeinsparung für immer mehr Bereiche der Wirtschaft sowie auch für Privatpersonen wichtig wird.

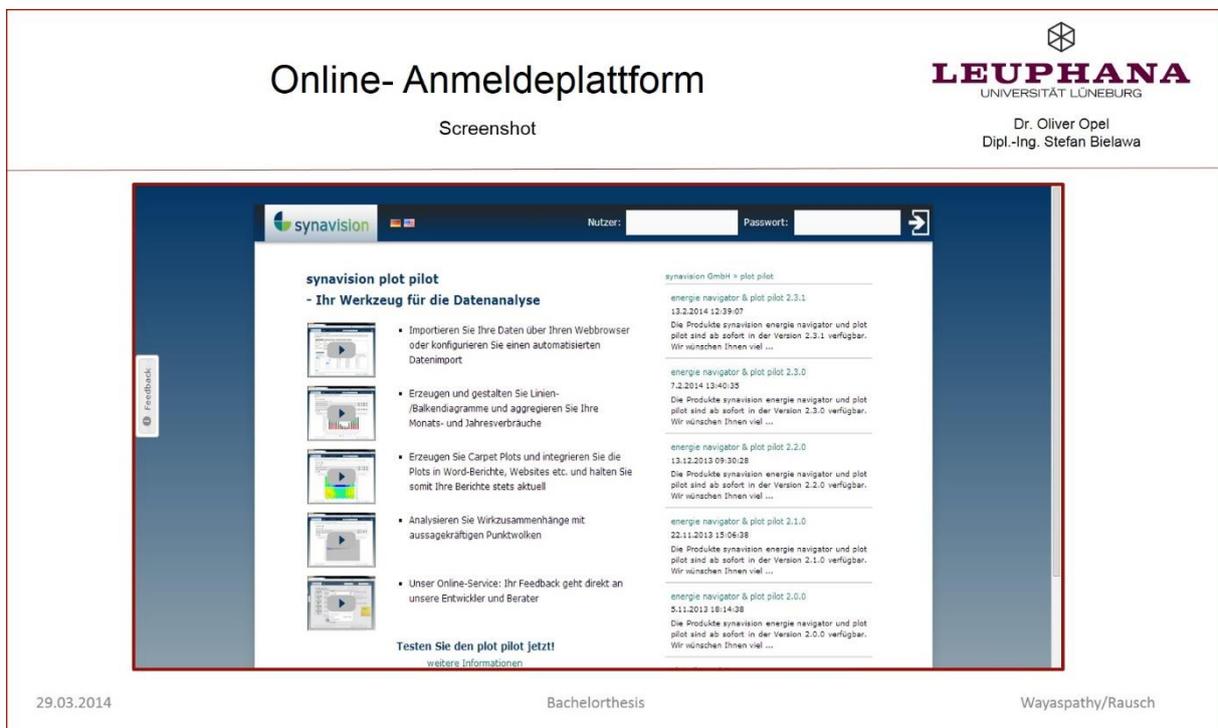
Um der bereits erwähnten Zielgruppe ihre Arbeit zu erleichtern, hat die Synavision GmbH drei innovative Software-Tools für das Qualitätsmanagement entwickelt. Das erste Tool ist unter den Namen Synavision Task Manager bekannt und soll den Kunden von der Planung bis zur Umsetzung der Prozesse unterstützen. Mit dem Task Manager kann der Kunde beliebige Checklisten erstellen, diese als Vorlage abspeichern und anschließend zum Arbeiten nutzen. Bei Abnahmen können einheitliche Dokumente genutzt, Prüfungen schnell und präzise dokumentiert, Fotos und andere Dokumente hinzugefügt und alle Vorgänge im Archiv präzise nachverfolgt werden. Ebenfalls können Bestandsaufnahmen, Bauprotokolle und Mangelanzeigen einfach und schnell erstellt und über den Webbrowser hochgeladen werden. Dies kann über jegliches internetfähiges Gerät geschehen, wie beispielsweise PC, Laptop, Tablet oder Handy. Das zweite Tool ist unter dem Namen Synavision Energie Navigator bekannt und ist das erste Werkzeug zur effektiven Qualitätssicherung der Gebäudeautomation. Damit wird ein Meilenstein gelegt, welcher erstmals die Funktionsweise von Gebäuden und Anlagen in der Planungsphase durch Automationsfunktionen spezifiziert. Anschließend kann in der Betriebsphase eine automatische Überprüfung stattfinden. Energieeffizienz und Nutzerkomfort können mit Hilfe des Energie Navigators ständig überwacht und verbessert werden. Der Energie Navigator, welcher in nationalen und internationalen Forschungsprojekten entwickelt wurde, soll die Qualitätssicherung im Gebäudebetrieb ermöglichen. Das dritte Software-Tool der Synavision GmbH wurde in der Praktikumszeit hauptsächlich angewendet. Dieser ist als Synavision Plot Pilot bekannt und ist ein leistungsstarkes Monitoring System, welches vollständig webbasierend ist. Dieses System ermöglicht eine übersichtliche Darstellung von Energieverbräuchen und anderen Messdaten. Diese Messdaten können aus beliebigen Messsystemen übernommen und einheitlich in Form von Rasterdiagrammen, Liniendiagrammen, Punktwolken- und Balkendiagrammen informativ visualisiert werden. Der Plot Pilot verhilft dem Nutzer dadurch zu einer besseren Übersicht und Kontrolle seiner Daten. Um die Diagramme zur jeder Zeit abzurufen, können diese zusätzlich in externe Berichte und Webseiten eingebunden werden. Um ein besseres Verständnis zu unserer Arbeit mit dem Plot Pilot zu bekommen, werden im nächsten Kapitel einzelne Arbeitsschritte erklärt und mit Hilfe von Screenshots verdeutlicht.

## 5.2 Wie funktioniert Synavision Plot Pilot

Wie bereits im vorigen Kapitel beschrieben, ist der Plot Pilot ein Werkzeug für professionelle Funktionsprüfungen und Monitoring. Das Tool ermöglicht Daten über einen Webbrowser zu importieren, verschiedene Plots zu gestalten und zu erzeugen sowie diese in Microsoft Word Berichte und Webseiten einzufügen. Darüber hinaus kann ein automatischer Datenimport konfiguriert werden, welches ein vollständiges Energiemanagement realisiert.

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte zur Handhabung des Tools beschrieben. Des Weiteren werden positive sowie negative Aspekte der Funktionen im Hinblick zur möglichen Nutzerinteraktion für das Zentralgebäude aufgezeigt. Die nachfolgenden Screenshots dienen lediglich zur Beschreibung des Tools und sind in Originalgröße dem Anhang zu entnehmen.

Der unten zu sehende Screenshot zeigt die Anmeldeplattform für den Plot Pilot.



**Abbildung 6: Anmeldeplattform für den Plot Pilot**

Ist die Anmeldung erfolgreich gewesen, kann im nächsten Schritt der Arbeitsbereich ausgewählt werden. Anschließend können CSV Dateien mit den Messdaten von einem lokalen Rechner aus in dem Plot Pilot importiert werden. Wenn Tabellenkalkulationsprogramme wie Excel verwendet werden, müssen diese vorher als CSV Datei abgespeichert werden. Beispiele für Importdateien befinden sich im Bereich Services.

Die folgende Abbildung zeigt eine Beispieldatei für die Datenübergabe aus der Gebäudeautomation.

## Beispieldatei

Screenshot



Dr. Oliver Opel  
Dipl.-Ing. Stefan Bielawa

	A	B	C	D	E	F
1	synavision demo Datei					
2	Gebäude					
3	Datenpunktadresse	Demo_Heating_East_001	Demo_Heating_East_002	Demo_Heating_Supply_004	Demo_Heating_Return_Temp_005	Demo_Heating_Valve_East_0
4	Grenzwert oben	50	50	100	100	
5	Grenzwert unten	0	0	0	0	
6	Einheit	kW	kWh	°C	°C	%
7	Kurztext	Heizleistung	Wärmeverbrauch	Vorlauftemperatur	Rücklauftemperatur	Ventilstellung
8	Langtext					
9	Version	4.31.56	4.31.56	4.31.56	4.31.56	4.31.56
10	01.01.2009 00:00	3.24	0.81	47	38	22
11	01.01.2009 00:15	3.24	0.81	47	38	22
12	01.01.2009 00:30	3.43	0.8075	47	38	24
13	01.01.2009 00:45	3.4	0.85	47	38	27
14	01.01.2009 01:00	3.41	0.8525	47	38	30
15	01.01.2009 01:15	3.31	0.8275	47	39	27
16	01.01.2009 01:30	3.09	0.7725	47	38	21
17	01.01.2009 01:45	3.1	0.775	47	38	2
18	01.01.2009 02:00	3.24	0.81	46	38	21
19	01.01.2009 02:15	3.22	0.805	46	38	21
20	01.01.2009 02:30	3.14	0.785	46	38	22
21	01.01.2009 02:45	3.06	0.755	46	38	24
22	01.01.2009 03:00	3.22	0.805	46	37	23
23	01.01.2009 03:15	3.25	0.8125	46	37	27
24	01.01.2009 03:30	3.25	0.8125	46	37	26
25	01.01.2009 03:45	3.23	0.8075	46	37	24
26	01.01.2009 04:00	3.05	0.7625	46	37	23
27	01.01.2009 04:15	3.01	0.7525	45	37	25
28	01.01.2009 04:30	3.21	0.8025	45	37	2
29	01.01.2009 04:45	3.06	0.765	45	37	23
30	01.01.2009 05:00	3	0.75	45	37	22
31	01.01.2009 05:15	2.96	0.74	45	37	22
32	01.01.2009 05:30	2.98	0.745	45	37	28
33	01.01.2009 05:45	3.17	0.7925	45	37	22
34	01.01.2009 06:00	3	0.75	44	37	25
35	01.01.2009 06:15	2.93	0.7325	44	37	24
36	01.01.2009 06:30	2.96	0.74	44	37	25
37	01.01.2009 06:45	2.99	0.7475	44	37	25

29.03.2014 Bachelorthesis Wayaspathy/Rausch

**Abbildung 7: Beispieldaten von der Synavision GmbH**

Die Importdateien müssen ein Zeilen- und Spaltenformat haben. Im vertikalen Bereich stehen im Kopf der Spalten jeweils Metadaten zu jedem Sensor. Hier muss ein eindeutiger Name für jeden Sensor enthalten sein, z.B. die Datenpunktadresse des Sensors aus der Gebäudeautomation. Als weitere Metadaten können ein kurzer und ein langer Klartext, die Einheit sowie der zulässige Wertebereich angegeben werden. Darunter stehen die jeweiligen Messdaten. In einer Spalte steht der Zeitstempel zu allen Messwerten. In diesem Beispiel ist es Spalte A. Für ein geeignetes Dateiformat ist ein Text im Leistungsverzeichnis hinterlegt, der dem Projekt zur Verfügung steht.

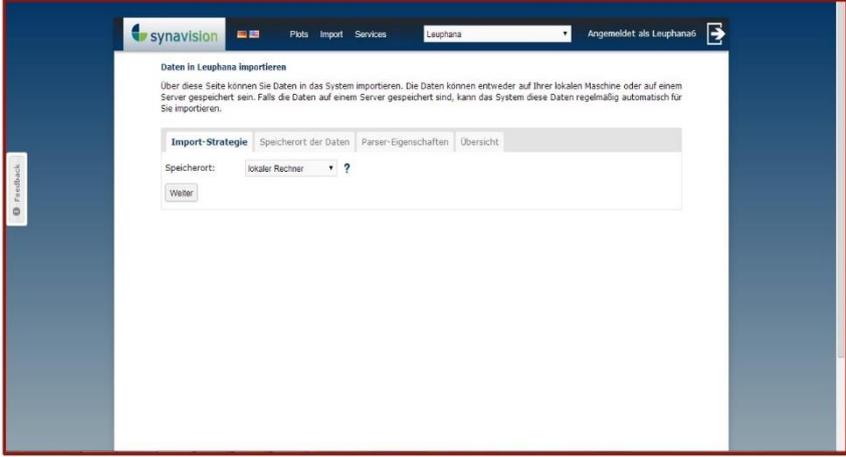
## Importbereich

Screenshot



**LEUPHANA**  
UNIVERSITÄT LÜNEBURG

Dr. Oliver Opel  
Dipl.-Ing. Stefan Bielawa



29.03.2014
Bachelorthesis
Wayaspathy/Rausch

**Abbildung 8: Importbereich vom Plot Pilot**

Zum Importieren der Dateien können Nutzer im Importbereich "Daten importieren" und den lokalen Speicherort des Rechners bestimmen. Anschließend kann die entsprechende Datei ausgewählt und hochgeladen werden.

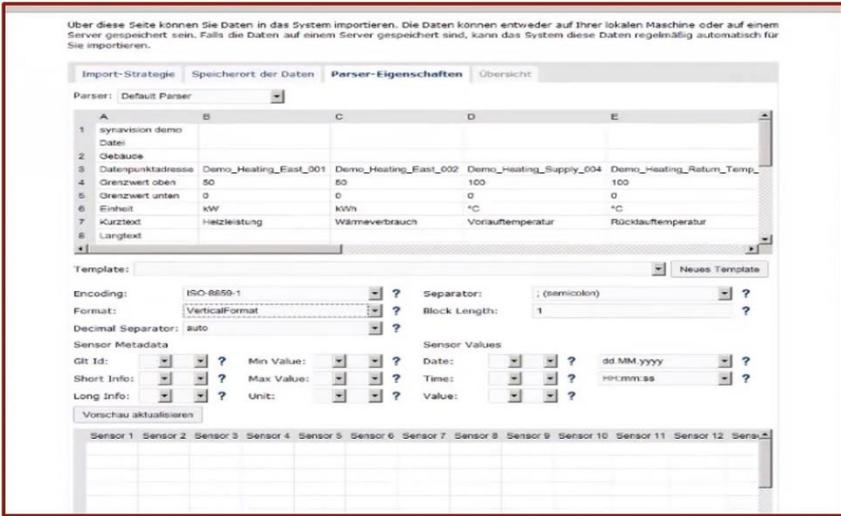
## Parser-Eigenschaften

Screenshot



**LEUPHANA**  
UNIVERSITÄT LÜNEBURG

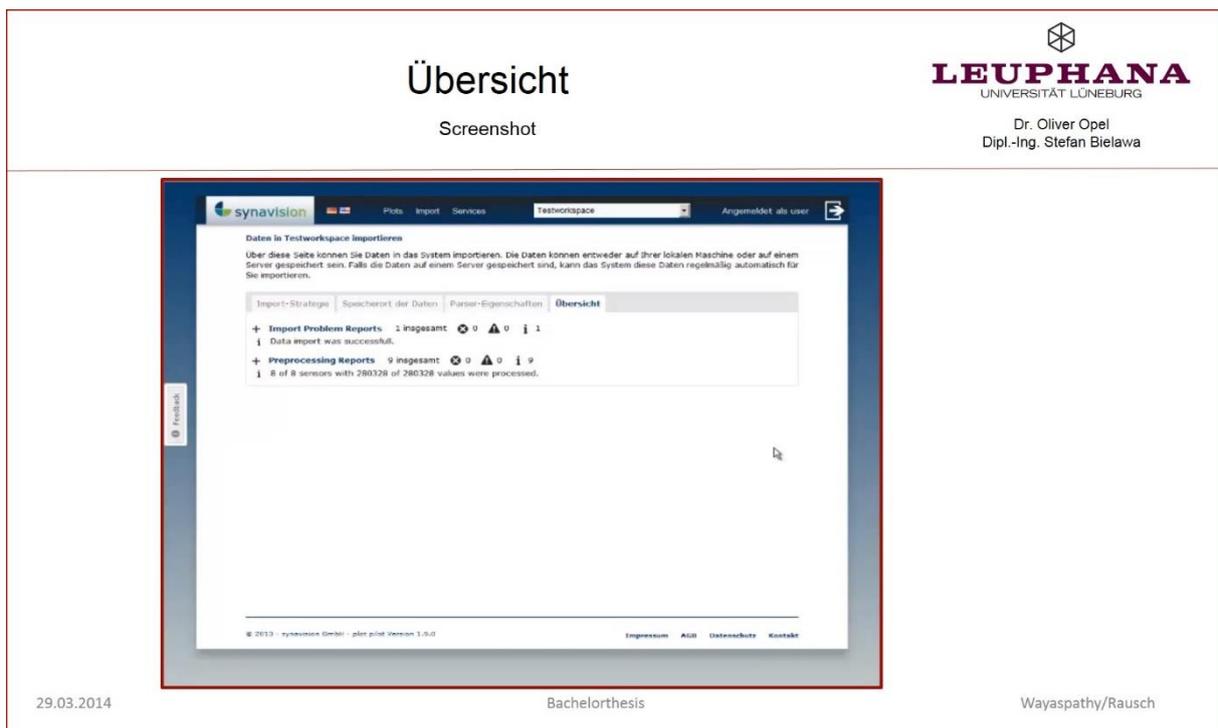
Dr. Oliver Opel  
Dipl.-Ing. Stefan Bielawa



29.03.2014
Bachelorthesis
Wayaspathy/Rausch

**Abbildung 9: Parser-Eigenschaften vom Plot Pilot**

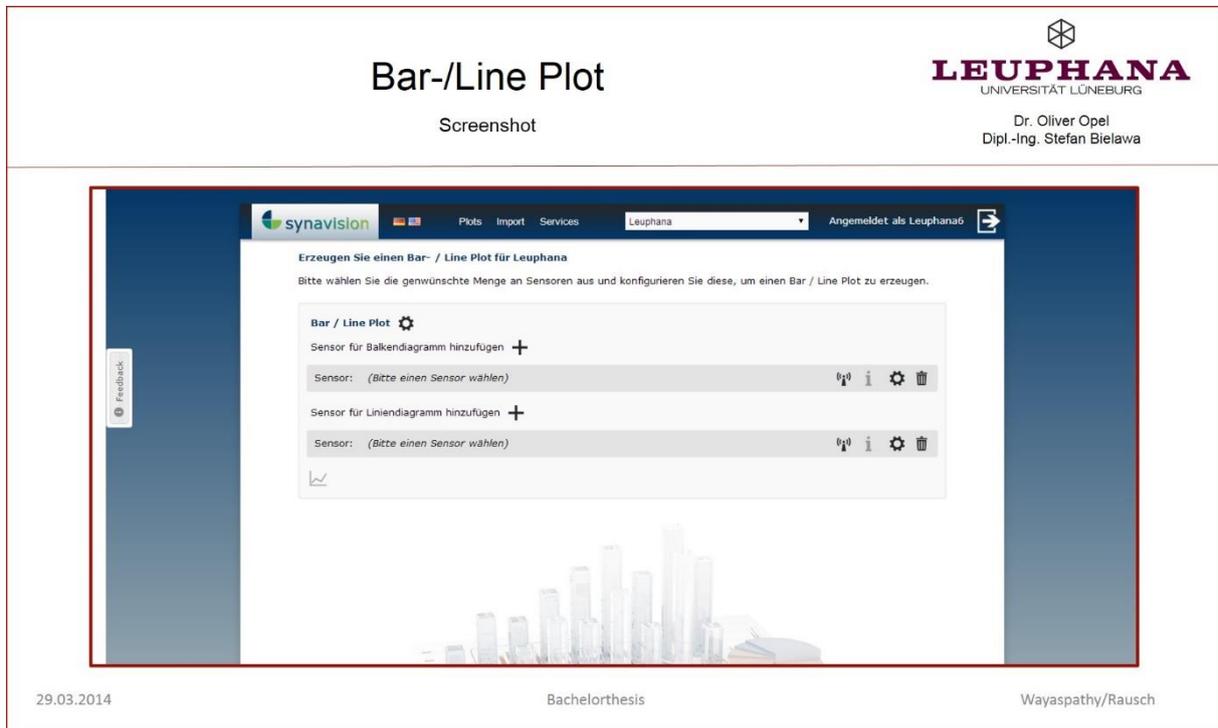
Nun wird der Importparser angezeigt, der dazu dient, die Daten aus der Datei einzulesen. Das obere Fenster zeigt die Daten aus der importierten CSV Datei. Im unteren Fenster wird angezeigt, wie der Plot Pilot die Daten einliest. Dieser Vorgang wird im Parser definiert. Falls mehrere Dateien im gleichen Format eingelesen werden sollen, kann vor der Definition des Parsers ein Template angelegt werden, welches beim Import automatisch gespeichert wird. Beim nächsten Import können die Dateien erneut verwendet werden, ohne den Parser neu zu definieren. Im Beispiel steht die erste Sensor ID in Spalte B und Zeile 3. Diese muss nun im Parser für die GLT ID eingegeben werden. Durch Aktualisierung der Vorschau können Nutzer beobachten, wie der Plot Pilot die IDs der Sensoren einliest. Die anderen Metadaten werden in gleicher Art und Weise hinzugefügt. Für den Zeitstempel stehen verschiedene Formate zur Verfügung. Es sollte das Format gewählt werden, mit der die Daten richtig angezeigt werden. Anschließend wird im Feld Value angegeben, in welcher Zelle der erste Messwert steht. In diesem Beispiel ist es die Zehn in Spalte A. Zuletzt sollte erneut die Aktualisierung vorgenommen werden, um in der Vorschau zu überprüfen, ob alle Daten richtig eingelesen worden sind. Wenn alles bedarfsgerecht angezeigt wird, kann der Import beginnen. Dies kann je nach Größe der Datei einige Minuten dauern. Nach dem Import zeigt der Plot Pilot eine kurze Übersicht über den gesamten Importvorgang.



**Abbildung 10: Übersicht der hochgeladenen Sensoren**

Nun stehen alle Daten im Plot Pilot zur Verfügung. Im nächsten Anlauf wird aufgezeigt, wie durch die importierten Dateien verschiedene Grafiken erzeugt werden können.

Mit importierten Daten können verschiedene Plots bzw. Grafiken erstellt werden. Diese können im Bereich Plots erstellt werden.



**Abbildung 11: Erzeugungsbereich Bar-/Line Plot**



**LEUPHANA**  
UNIVERSITÄT LÜNEBURG

Dr. Oliver Opel  
Dipl.-Ing. Stefan Bielawa

## Bar-/Line Plot

Screenshot

Erzeugen Sie einen Bar / Line Plot für Testworkspace  
Bitte wählen Sie die gewünschte Menge an Sensoren aus und konfigurieren Sie diese, um einen Bar / Line Plot zu erzeugen.

Bar / Line Plot ⚙

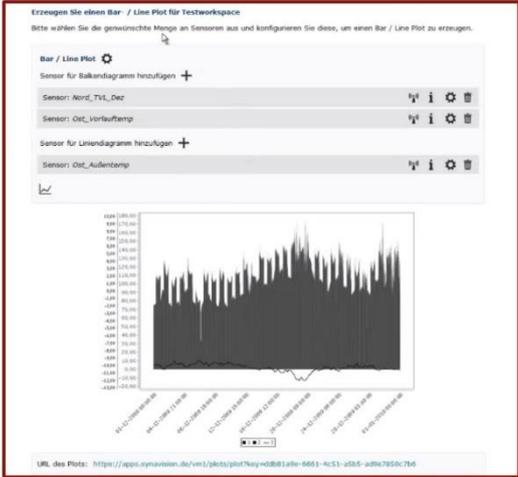
Sensor für Balkendiagramm hinzufügen +

Sensor: Aord\_Tvt\_Deiz i ⚙

Sensor: Ost\_Vorlauftemp i ⚙

Sensor für Liniendiagramm hinzufügen +

Sensor: Ost\_AuBentemp i ⚙



URL des Plots: <https://apps.synavision.de/vis/2/plot/pilot?my=080116b-6661-4c51-a856-4d9e7850c796>

29.03.2014 Bachelorthesis Wayaspathy/Rausch

**Abbildung 12: Bar-/Line Plot**

Bar/Line Plots können sowohl Balken als auch Linien Plots enthalten und kombiniert werden. Für einen Plot können die Nutzer aus der Liste der importierten Daten einige Sensoren für Balken und Linien auswählen.



**LEUPHANA**  
UNIVERSITÄT LÜNEBURG

Dr. Oliver Opel  
Dipl.-Ing. Stefan Bielawa

## Sensor auswählen

Screenshot

**Sensor auswählen**

Filter:

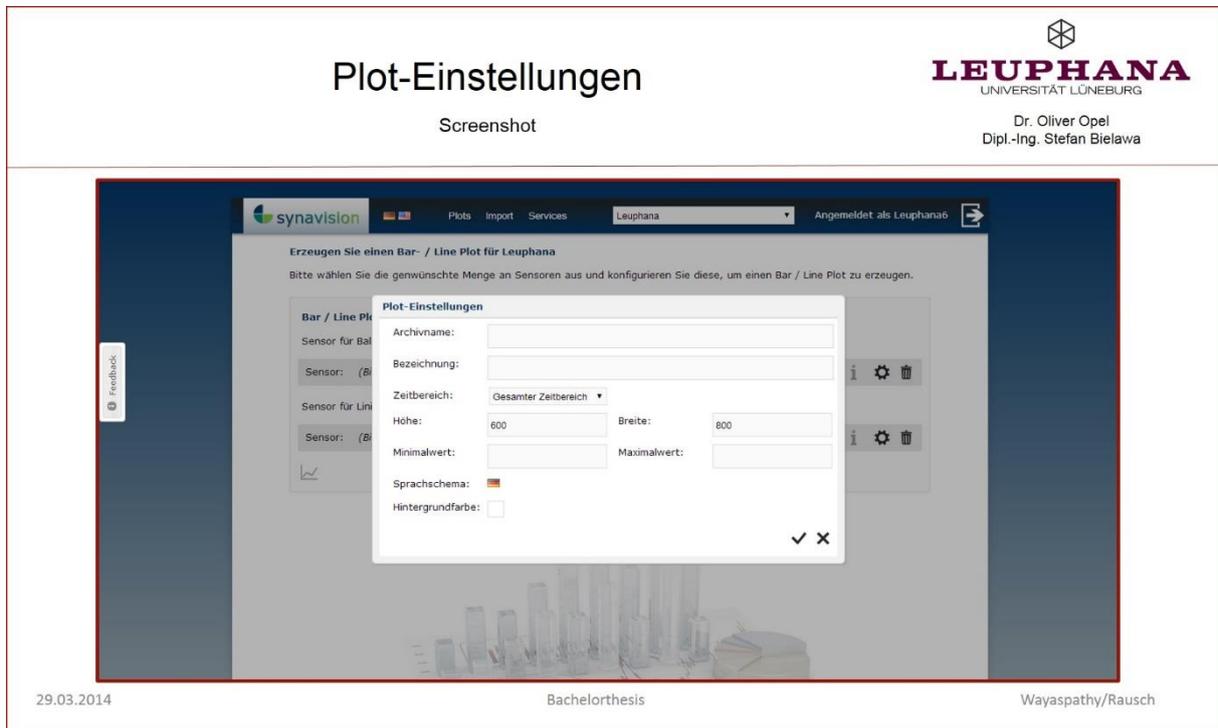
Gltd	ShortInfo	i	→
Demo_Heating_Valve_East_005	Ventilstellung	i	→
HK01/02 HYB Decke 1.OG GEH Wärmehähler 1.OG [kWh]		i	→
HK01/02 HYB Decke 1.OG GEK Kältezähler 1.OG [kWh]		i	→
HK01/02 HYB Decke 1.OG ME Leistung (Wärme und Kälte) 1.OG [kWh]		i	→
HK01/02 HYB Decke 1.OG RL [Celsius]		i	→
HK01/02 HYB Decke 1.OG VL [Celsius]		i	→
HK01/02 HYB Decke 2.OG GEH Wärmehähler 2.OG [kWh]		i	→
HK01/02 HYB Decke 2.OG GEK Kältezähler 2.OG [kWh]		i	→
HK01/02 HYB Decke 2.OG ME Leistung (Wärme und Kälte) 2.OG [kWh]		i	→
HK01/02 HYB Decke 2.OG RL [Celsius]		i	→
HK01/02 HYB Decke 2.OG VL [Celsius]		i	→
HK01/02 HYB Decke EG GEH Wärmehähler EG [kWh]		i	→
HK01/02 HYB Decke EG GEK Kältezähler EG [kWh]		i	→
HK01/02 HYB Decke EG ME Leistung (Wärme und Kälte) EG [W]		i	→
HK01/02 HYB Decke EG RL [Celsius]		i	→

16-30 of 54

29.03.2014 Bachelorthesis Wayaspathy/Rausch

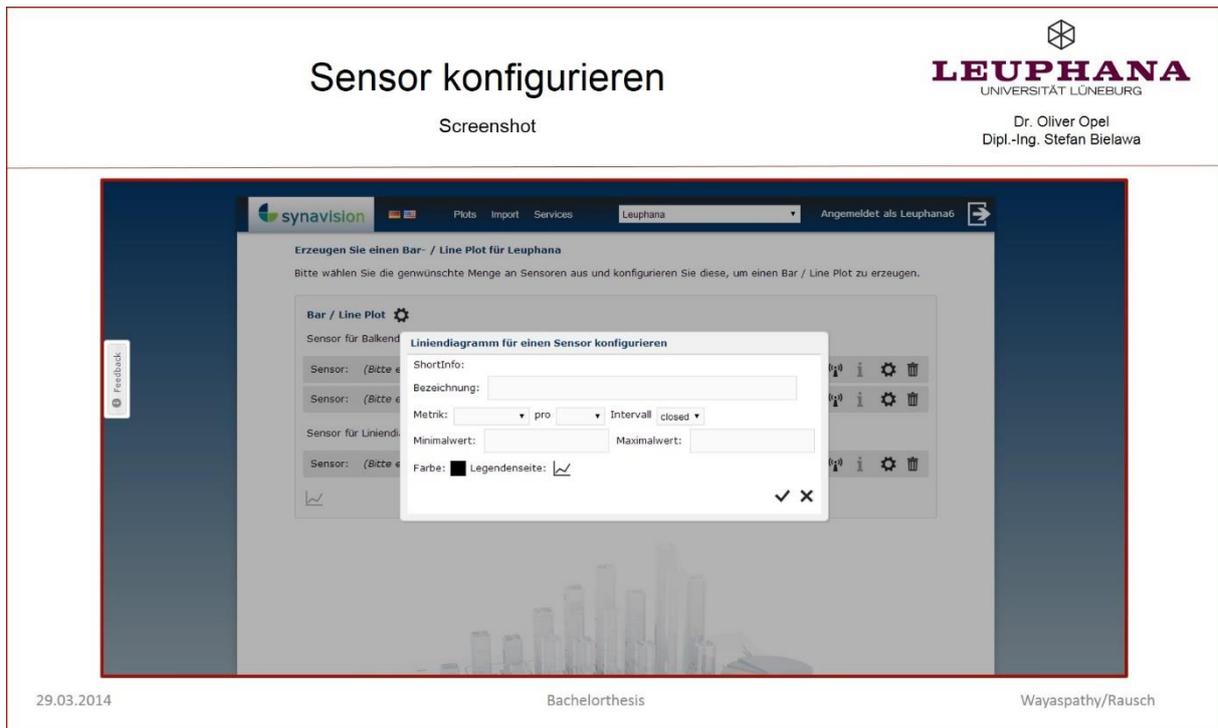
**Abbildung 13: Auswahl an Sensoren im Plot Pilot**

Sind alle Sensoren ausgewählt, kann der Nutzer den Plot erzeugen. Die erzeugten Plots sind im Archiv abgelegt und jederzeit bearbeitbar. Außerdem können verschiedene Einstellungen des gesamten Plots und für die einzelnen Sensoren vorgenommen werden.



**Abbildung 14: Plot-Einstellungen**

Hierbei kann ein Name angegeben werden, in dem der Plot im Archiv gespeichert wird und ein Name festgelegt werden, der im Plot angezeigt werden soll. Der Plot umfasst zunächst den gesamten Zeitraum, in dem Daten vorliegen. Mit dem Kalender kann ausgewählt werden, in welchem Zeitumfang der Plot Daten darstellen soll. Bei der Bearbeitung des Plots werden die aktuellen Einstellungen übernommen. Im folgenden Beispiel werden fünfzehnminütige Werte dargestellt.



**Abbildung 15: Konfigurationsmöglichkeiten im Plot Pilot**

Der Nutzer kann die Daten jedoch auch mit verschiedenen Metriken zeitlich aggregieren und so z.B. Tagesmittelwerte oder Monatssummen anzeigen lassen. Die Farbe der Balken und Linien kann aus der Farbskala ausgewählt werden. Des Weiteren können Balken nebeneinander oder auch gestapelt angezeigt werden. Die Anzahl der Sensoren kann beliebig erweitert oder aus dem Plot gelöscht werden. Nun kann der Nutzer den Plot als Grafik über die Zwischenablage in andere Dokumente einfügen oder auch die URL in Webseiten verwenden.

Die Konfigurationsmöglichkeiten sind für die Visualisierung besonders wichtig, um eine benutzerfreundliche Darstellung am Zentralgebäude zu gewährleisten. Interessant sind die Tagesmittelwerte, hierdurch kann der Nutzer über einen kurzen Zeitraum die verbrauchte Energie anzeigen lassen und Rückschlüsse aus dem Verhalten ziehen. Dieser Lerneffekt ist für eine optimale Nutzerinteraktion sehr aufschlussreich, allerdings gibt es in diesem Bereich Schwierigkeiten, welche im Abschnitt der Visualisierung noch ausführlich behandelt werden.

# Scatter Plot

Screenshot



**LEUPHANA**  
UNIVERSITÄT LÜNEBURG

Dr. Oliver Opel  
Dipl.-Ing. Stefan Bielawa

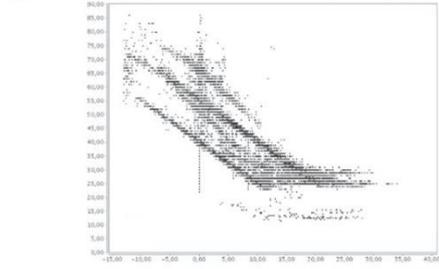
Erzeugen Sie einen Scatter Plot für Testworkspace  
Bitte wählen Sie die gewünschte Menge an Sensorpaaren aus und konfigurieren sie diese, um einen Scatter Plot zu erzeugen.

Scatter Plot ⚙

Sensorpaar hinzufügen +

Sensor auf X-Achse: HkWr/Ost\_Außentemp t i ⚙

Sensor auf Y-Achse: HkWr/Ost\_Vorlauftemp t i ⚙



URL des Plots: <https://apps.synavision.de/vml/plots/plot?key=ab24ee549-98a5-4513-9c7d-0e28d3745d5a>

29.03.2014
Bachelorthesis
Wayaspathy/Rausch

**Abbildung 16: Scatter Plot**

Ein Scatter Plot zeigt eine Punktwolke für ein oder mehrere Sensorpaare an. Im Prinzip ist die Vorgehensweise zur Erzeugung eines Plots dieselbe wie bei den anderen beiden. Der Unterschied ist, dass beim Scatter Plot jeweils für die x- und y-Achse ein Sensor ausgewählt werden muss. Sind alle Sensoren ausgewählt, kann der Plot erzeugt werden. Es können die üblichen Einstellungen wie auch beim Bar-/Line und Carpet Plot vorgenommen werden, wie beispielsweise die Farben für eines der Wertepaare wählen.

# Carpet Plot

Screenshot



**LEUPHANA**  
UNIVERSITÄT LÜNEBURG

Dr. Oliver Opel  
Dipl.-Ing. Stefan Bielawa

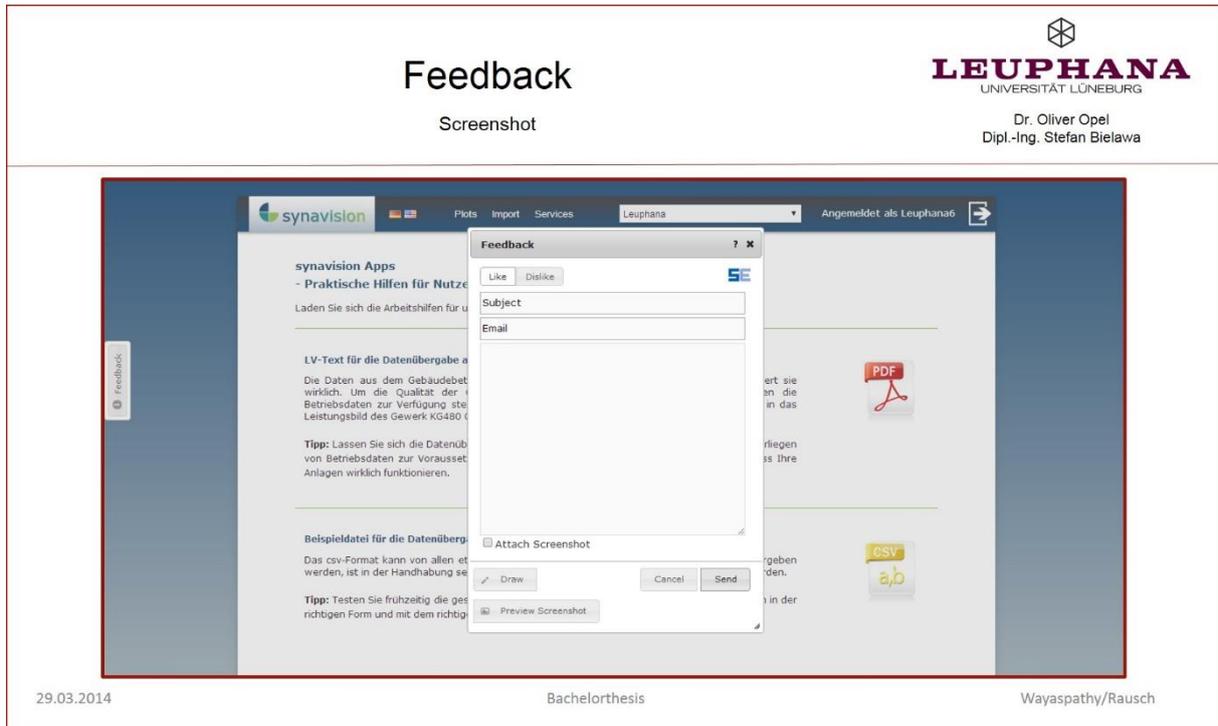


29.03.2014
Bachelorthesis
Wayaspathy/Rausch

**Abbildung 17: Carpet Plot**

Ein Carpet oder ein Rasterdiagramm stellt jeweils die Werte eines einzelnen Sensors da. Dabei werden einzelne Werte mit Farben entsprechend der Farbskala dargestellt. In der Voreinstellung werden die sechsendneunzig jeweils -fünfzehnminütigen Werte eines Tages in einer Spalte dargestellt. In der nächsten Spalte ist der nächste Tag dargestellt. Beim Carpet Plot können keine weiteren Sensoren hinzugefügt werden, aber es können mehrere Rasterdiagramme in einem Plot erzeugt werden. Ansonsten sind die Einstellungen wie auch beim Bar/Line und Scatter Plot möglich.

Es ist fraglich, inwiefern sich Rasterdiagramme oder Punktwolkendiagramme für die Nutzerinteraktion in Anbindung an das Ambient Intelligence am neuen Zentralgebäude eignen werden. Dies ist im Besonderen auf die schwierige Interpretation und Unkenntnis der Darstellung zurückzuführen. Im Abschnitt der Visualisierung wird diese Problematik durch Messwerte in Echtzeit intensiver aufgezeigt.



**Abbildung 18: Synavison Feedbackfunktion**

Sind Fragen oder Anregungen zum Plot Pilot aufgetaucht, können diese über die Feedbackfunktion geklärt werden. Alle Feedbackmeldungen werden überprüft und schnellstmöglich beantwortet. Zunächst wird angegeben, ob es sich um ein positives oder negatives Feedback handelt. Anschließend wird in der Betreffzeile in kurzen Stichpunkten die Situation geschildert. Die ausführliche Beschreibung folgt im Textfeld. Die E-Mail-Adresse ist nicht zwingend, aber für direkte Beantwortung der Frage erforderlich. Durch Anklicken des Menüpunktes „Attaché Screenshot“, kann ein Screenshot des Plot Pilot Fensters erstellt werden. Diesen kann der Nutzer mit der Draw Funktion bearbeiten. Mit den Zeichenwerkzeugen können auf Screenshot Rechtecke markiert, Linien gezeichnet und frei Hand gezeichnet werden. Jede Markierung kann vom Nutzer rückgängig gemacht werden als auch alle Markierungen gelöscht werden. Die Notizfunktion erlaubt es, kurze Texte auf dem Screenshot zu platzieren. Ist die Kommentierung des Screenshots abgeschlossen, kann die Bearbeitung geschlossen werden. Die Änderungen werden automatisch gespeichert. Im Preview Screenshot kann das Tool eine Vorschau des angehängten Screenshots mit Markierungen anzeigen. Anschließend kann das Feedback abgeschickt werden. Ist eine E-Mail-Adresse angegeben, erhält der Nutzer eine Kopie des Feedbacks an die angegebene Adresse. Alle Feedbackmeldungen werden im System gesammelt und systematisch bearbeitet. Die Feedbackfunktion ist für Konfliktlösungen innerhalb des Tools hervorragend geeignet, jedoch für die erwünschte Nutzerinteraktion am Zentralgebäude irrelevant, weil die

Feedbackfunktion im Ambient Intelligence System integriert ist und somit Teil des Ambient Intelligence Systems sein wird. Damit alle Funktionsmöglichkeiten des Plot Pilot betrachtet werden, wurde diese Alternative beschrieben.

### **5.3 Anwendungsbereiche**

Qualität ist ein wichtiger Erfolgsfaktor im Gebäudemanagement. Der Qualitätsbegriff wird jedoch in der Praxis oft vernachlässigt, obwohl die Anforderungen an Gebäuden in den letzten Jahrzehnten deutlich gestiegen und komplexer geworden sind. Selbst Experten verlieren bei den sich drastisch ändernden Normen den Überblick. Außerdem werden Ziele nicht erreicht, weil sich die meiste Aufmerksamkeit auf das Gebäudekonzept bezieht. Häufig auftretende Probleme sind unter anderem die unvollständigen Planungsleistungen, die mangelhafte Ausführung der Baukonstruktion, die fehlerhafte Betriebsführung, das sich negativ auswirkende Nutzerverhalten sowie die Komplexität von Automationstechniken und deren Bau und Benutzungskosten (vgl. Synavision<sup>1</sup>).

Um solche Schwierigkeiten zu bewältigen, entwickelt die Synavision GmbH Produkte für Bauherren, Fachplanern, Errichter und Qualitätssicherer, auch Universitäten, um eine optimale Performance an Gebäuden sicherzustellen. Der Schlüssel hierfür ist ein effektives Qualitätsmanagement. Dies berücksichtigen die Programmierer und Ingenieure der Synavision GmbH und ermöglichen durch die Software Tools die Gebäudequalität der Kunden zu verbessern. Mit dem Task Manager können beispielsweise Prozessabnahmen, Mangelanzeigen, Inspektionen, Bestandsaufnahmen, Qualitätssicherung etc. systematisch umgesetzt, archiviert und nachverfolgt werden. Des Weiteren kann das Betriebsverhalten von Anlagen durch die Visualisierung mit dem Plot Pilot analysiert werden. Der Energie Navigator ermöglicht zu dem die Planung und Überwachung von Automationsfunktionen (vgl. ebd.).

Alle Synavision Produkte sind SaaS -fähig, d.h. sie basieren auf dem Grundsatz, dass die Software und die IT-Infrastruktur bei einem externen IT-Dienstleister betrieben und vom Kunden als Service genutzt werden. Die unkomplizierte Anwendung vereinfacht die Bedienung des Tools. Das Ziel dieser Produkte ist vor allem die Nachhaltigkeit der Gebäude zu sichern.

Die Leuphana Universität möchte ebenfalls ein effektives und benutzerfreundliches Monitoring am neuen Zentralgebäude umsetzen. Derzeit werden die Produkte von der

Synavision GmbH zur möglichen Umsetzung am neuen Zentralgebäude überprüft. Die vorliegende Bachelorarbeit ist ein wesentlicher Bestandteil zur Überprüfung des Tools im Hinblick auf die Nutzerinteraktion und die Grenzen des Tools.

#### 5.4 Aufbereitung der Messdaten

Für die Überprüfung des Plot Pilot der Synavision GmbH sind diverse Messdaten zur Verfügung gestellt worden. In der ersten Phase wurde mit den Beispieldaten der Synavision GmbH gearbeitet. Die Beispieldaten dienten lediglich zum Zweck der Erlernung des Tools und hatten keinen direkten Bezug auf das Zentralgebäude.

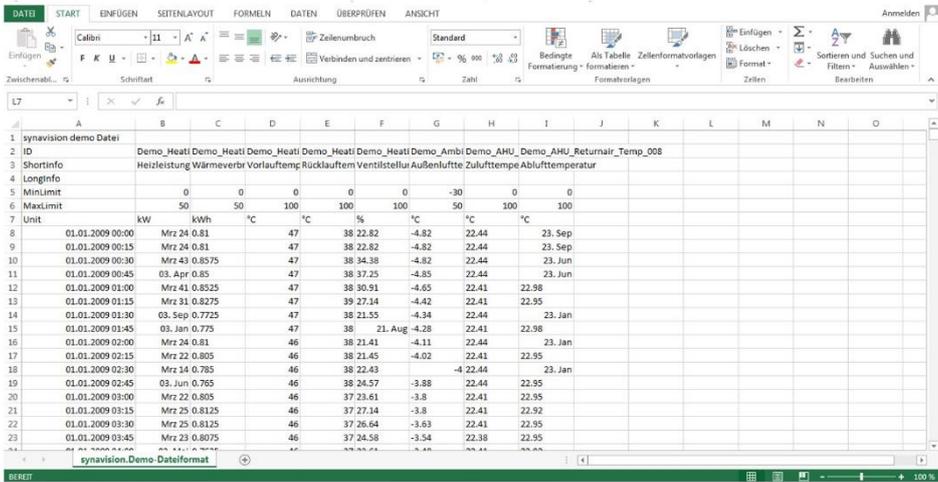
## Demodatei

Screenshot



**LEUPHANA**  
UNIVERSITÄT LÜNEBURG

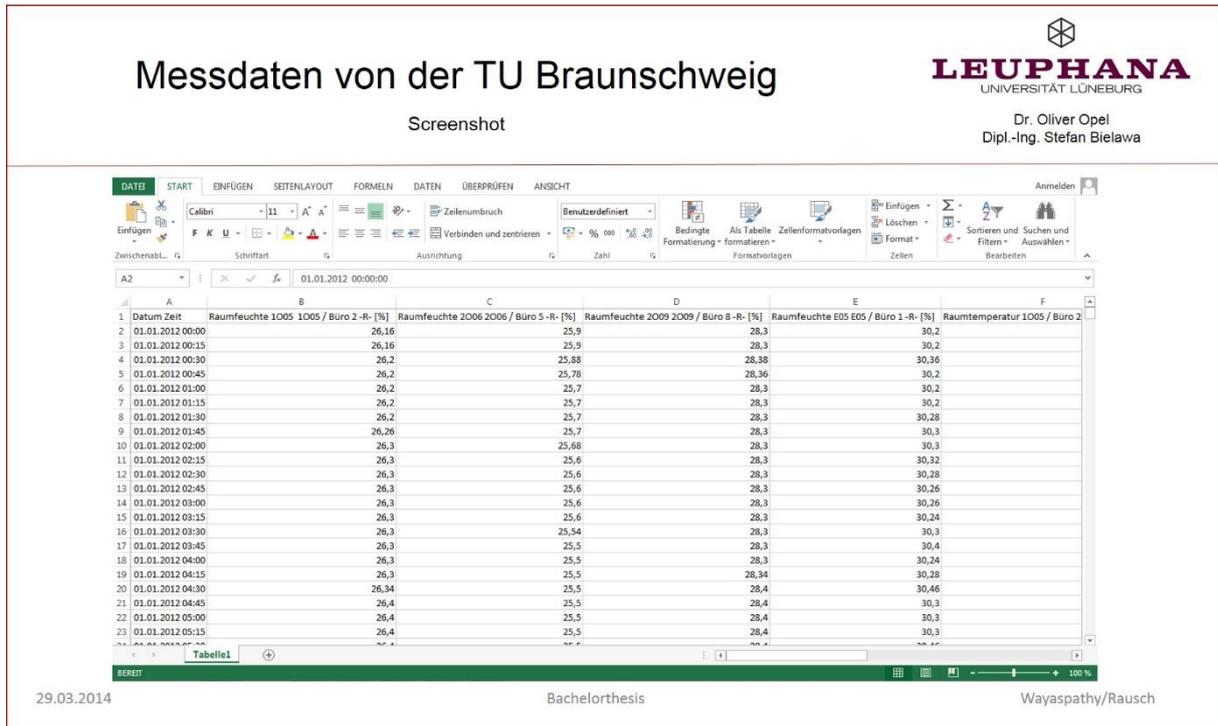
Dr. Oliver Opel  
Dipl.-Ing. Stefan Bielawa



29.03.2014
Bachelorthesis
Wayaspathy/Rausch

**Abbildung 19: Demodatensätze von der Synavision**

In der zweiten Phase sind Messwerte in Echtzeit von der TU Braunschweig zur Verfügung gestellt worden. Erhobene Messdaten waren die Raumfeuchte, die Raumtemperatur und allgemeine Heizkosten in diversen Büroräumen. Der Messzeitraum betrug ein Jahr, beginnend am 1. Januar 2012 bis zum 1. Januar 2013. Alle fünfzehn Minuten wurden Messwerte durch die verschiedenen Sensoren in den Büroräumen aufgenommen.



**Abbildung 20: Messdaten von der TU Braunschweig**

Diesen Daten wurden zur Verfügung gestellt, da die erforderlichen Daten für das Zentralgebäude derzeit nicht verfügbar bzw. vorhanden gewesen sind, sodass eine andere Alternative überlegt werden musste. Vorhanden waren keine originalen Messdaten, jedoch Daten zur Abstimmung für die Einzelraum- und Beleuchtungsregelung, somit konnte abgeleitet werden, welche Sensoren in welchen Räumen verbaut sind. Diese waren hilfreich, um den Untersuchungsbereich einzuschränken. Verbaut werden unter anderem Präsenzmelder, welche in den Seminarräumen durch Präsenztaster ersetzt werden, des Weiteren Temperatursensoren, Lichtstärke (in der Lampe eingebaut, ggf. nicht auslesbar oder über Stromverbrauch), ein CO<sub>2</sub> Sensor, Fensterkontakt (Sensor Fensteröffnung), ein Stromverbrauchszähler und ein Stellventil am Heizkörper. In den Musterräumen gibt es ggf. zusätzlich einen VOC-Sensor<sup>6</sup>, der die Schadstoffkonzentration in der Luft misst, Beleuchtungsstärke und weitere Temperatursensoren.

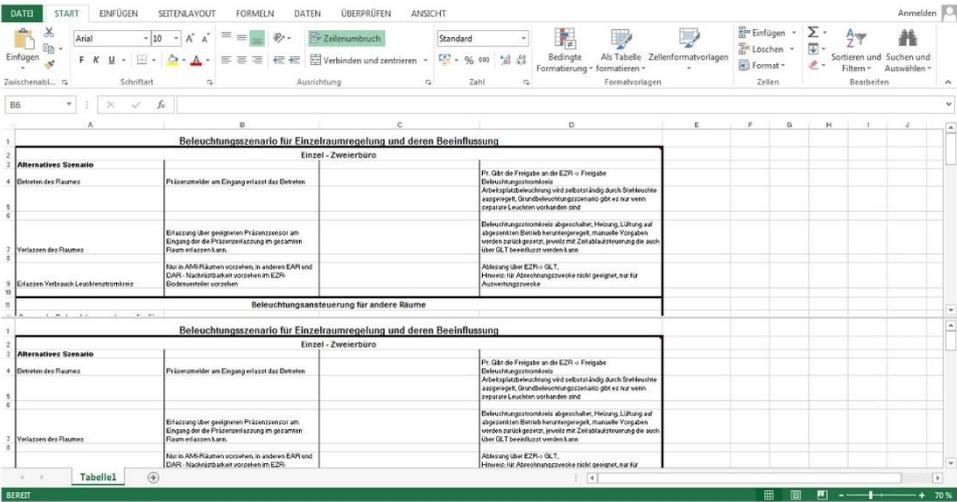
<sup>6</sup> Unter VOC (Volatile Organic Compounds) versteht man flüchtige organische Verbindungen, welche vorwiegend aus Kohlenstoff und Wasserstoff aufgebaut sind (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2014).

# Einzelraum- und Beleuchtungsregelung

Screenshot



Dr. Oliver Opel  
Dipl.-Ing. Stefan Bielawa



29.03.2014 Bachelorthesis Wayaspathy/Rausch

**Abbildung 21: Einzelraum- und Beleuchtungsregelung**

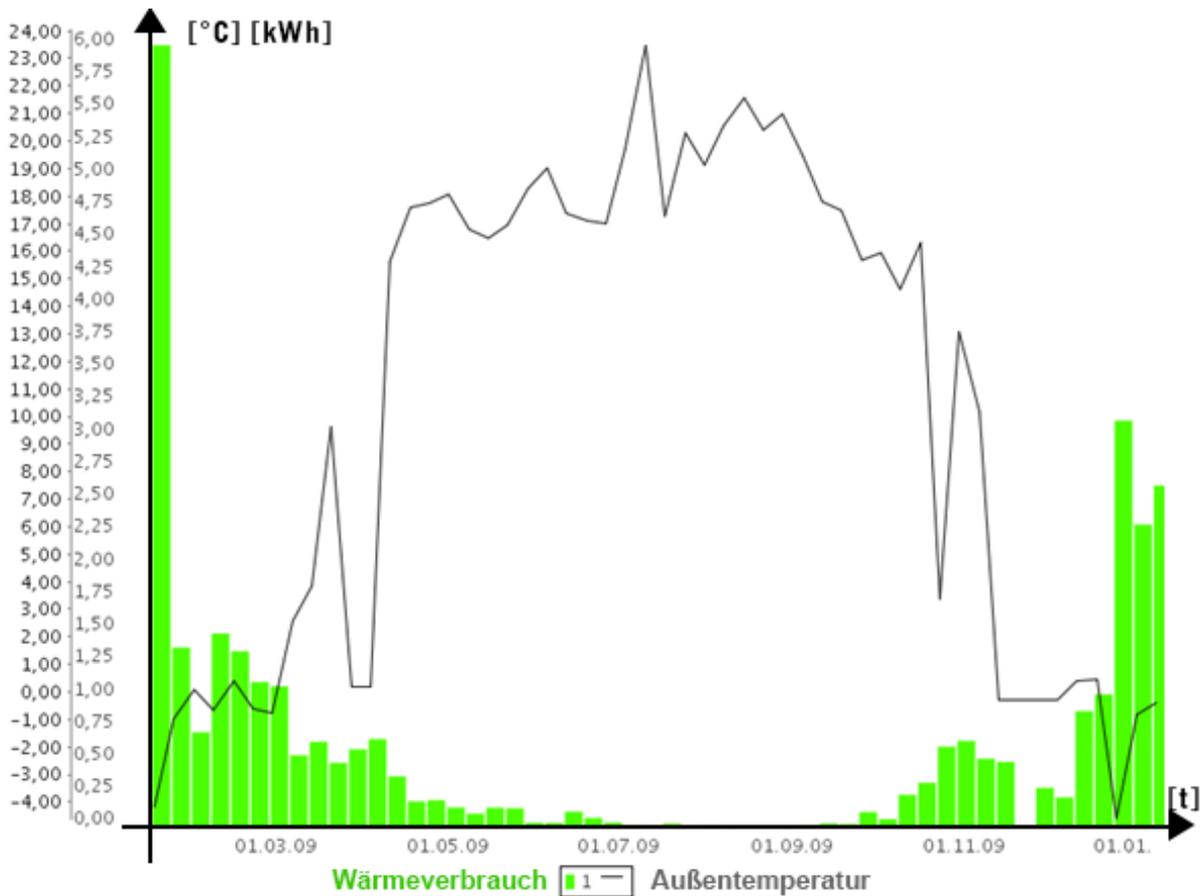
Zusammen mit den Messdaten von der TU Braunschweig wurden nun die Sensoren berücksichtigt, die für das Zentralgebäude relevant sind. Hierdurch konnten Visualisierungen vorgenommen und Entscheidungen getroffen werden, die für die mögliche Nutzerinteraktion sowie zur Planung am Zentralgebäude notwendig sind. In den nachfolgenden Kapiteln werden die Ergebnisse zu den Messdaten aufgezeigt.

## 5.5 Visualisierung des Energieverbrauchs

Im folgenden Kapitel werden die einzelnen Arbeitsabschnitte aufgezeigt. Die Arbeitsabschnitte lassen sich nach der Aussagefähigkeit der Messdaten und der Erkenntnis über genehmigte Sensoren für die Büroräume einteilen. Zuerst wurde mit Beispieldaten gearbeitet, mit denen grundlegende Einstellungen und die meisten möglichen Funktionen ausprobiert wurden. Zusätzlich wurde Wissen über Visualisierungsmethoden, Feedbackmethoden und die dazu gehörigen Verhaltensweisen angeeignet. Im zweiten Arbeitsschritt wurde mit realen Messdaten von der Technischen Universität Braunschweig gearbeitet, welche Echtzeitmessungen über einen Zeitraum von einem Jahr vorgenommen hat. Mit diesen aussagefähigen und vergleichbaren Daten wurden viele verschiedene Graphen erstellt, welche sich in der Auswahl der Sensoren, Diagrammform und Aussagefähigkeit unterscheiden. Unter der Berücksichtigung des theoretischen Wissens wurden geeignete

Darstellungsformen und aussagefähige Graphen ausgewählt. In dem letzten Arbeitsabschnitt wurden die Sensoren berücksichtigt, welche auch im neuen Zentralgebäude der Leuphana Universität eingesetzt werden. In diesem Schritt konnte letztendlich die Optimierung der Nutzerinteraktion durch Visualisierung für das Audimax Gebäude angestrebt werden. Aus Gründen des Gesamtverständnisses, der Beschaffung von realen und vergleichbaren Messdaten und der Genehmigung der Sensoren für das Audimax Gebäude konnten die einzelnen Arbeitsschritte nicht zusammengefasst werden.

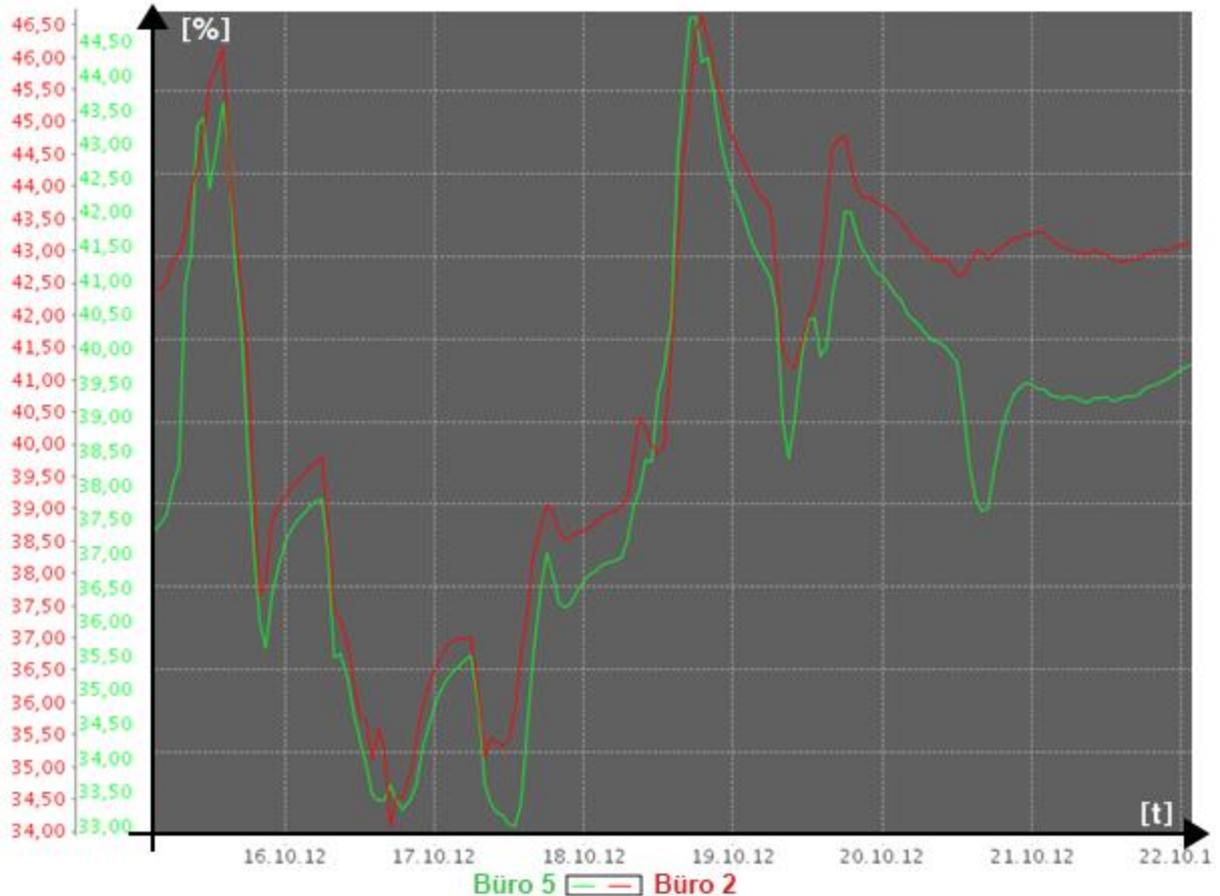
Erste Erfahrungen wurden mit den Beispielmessdaten von Synavision Plott Pilot gemacht. Graphen wurden in Form von Balken-, Linien-, Punktwolken- und Rasterdiagrammen erstellt. Anschließend wurde noch zu Übungszwecken die Farbe der Graphen oder Skalierung verändert und weitere Einstellungsmöglichkeiten ausprobiert. Bei der Visualisierung kann man die Durchschnittswerte oder nur die Maximalwerte der Messdaten anzeigen lassen. Ebenfalls kann man mehrere Messwerte von unterschiedlichen Sensoren in einem Graphen zusammenfügen, worin Übereinstimmungen oder Unterschiede in den Messdaten besonders schnell zu erkennen sind.



**Abbildung 22: Außentemperatur und Heizleistung**

**Diese Darstellung verdeutlicht den Zusammenhang zwischen der Außentemperatur (schwarzes Liniendiagramm) und der Heizleistung (grünes Säulendiagramm). Diese Graphen wurden mit Hilfe der Beispieldaten der Synavision GmbH erstellt und verdeutlichen die Visualisierung von verschiedenen Darstellungsarten mit unterschiedlichen Messwerten.**

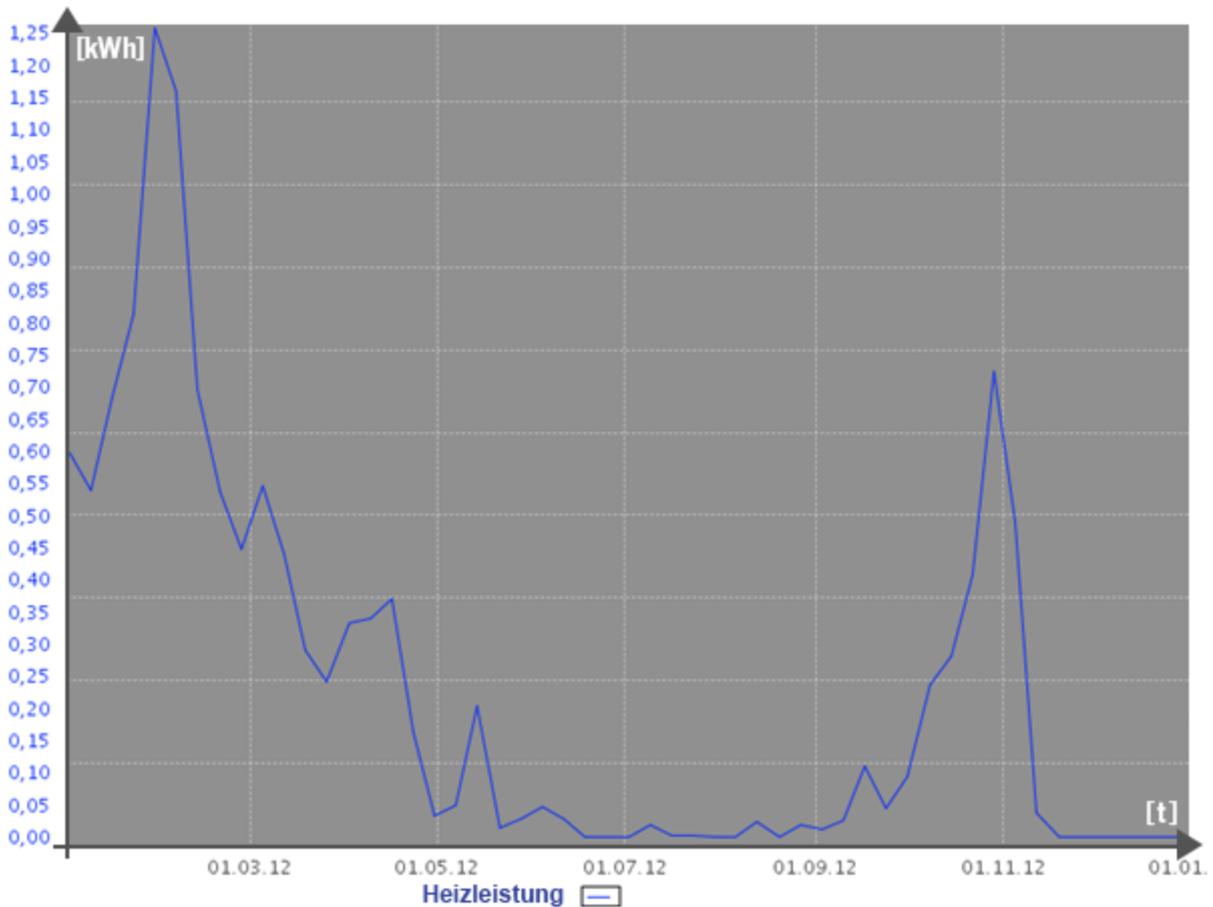
Schließlich wurden reale Messdaten von der TU Braunschweig zur Verfügung gestellt. Wie bereits angesprochen, handelt es sich hierbei um tatsächlich gemessene Werte, welche über einen Messzeitraum von einem Jahr aufgenommen wurden. Die Messungen wurden in mehreren durchschnittlichen Büroräumen durchgeführt und sind dadurch als Grundlage für eine beispielhafte Visualisierung der Energieverbräuche für die Audimax Büroräume.



**Abbildung 23: Vergleich der Raumfeuchte von zwei Büroräumen**

**In dem oben aufgeführten Graphen wurden zwei Büroräume miteinander verglichen, dazu wurde die Luftfeuchtigkeit in Prozent über einen Messzeitraum von sieben Tagen aufgezeichnet. Um den Verlauf der Liniendiagramme zu verdeutlichen, wurden diese farblich dargestellt. Zusätzlich wurde die Hintergrundfarbe verändert, um die Liniendiagramme noch deutlicher hervorzuheben.**

Zuletzt wurden erste Sensoren für das Zentralgebäude genehmigt und unter Berücksichtigung der in Zukunft verbauten Sensoren wurden tatsächlich mögliche Graphen mit Hilfe der Messdaten aus Braunschweig erstellt. Zur Veranschaulichung wurden zwei Graphen aus dem dritten Arbeitsschritt aufgeführt. Diese Graphen würden sich für eine Nutzerinteraktion eignen.



**Abbildung 24: Wärmeverbrauch über ein Jahr**

**Diese Grafik zeigt den Verlauf eines Liniendiagramms. Sensoren zeichneten über einen Zeitraum von einem Jahr den Wärmeverbrauch in Kilowatt/Stunde eines Heizkörpers auf. Diese Verlaufsdarstellung über einen längeren Zeitraum eignet sich als Feedbackmethode für das neue Zentralgebäude der Leuphana Universität Lüneburg (siehe Kapitel 4.3 Feedbacksystem).**

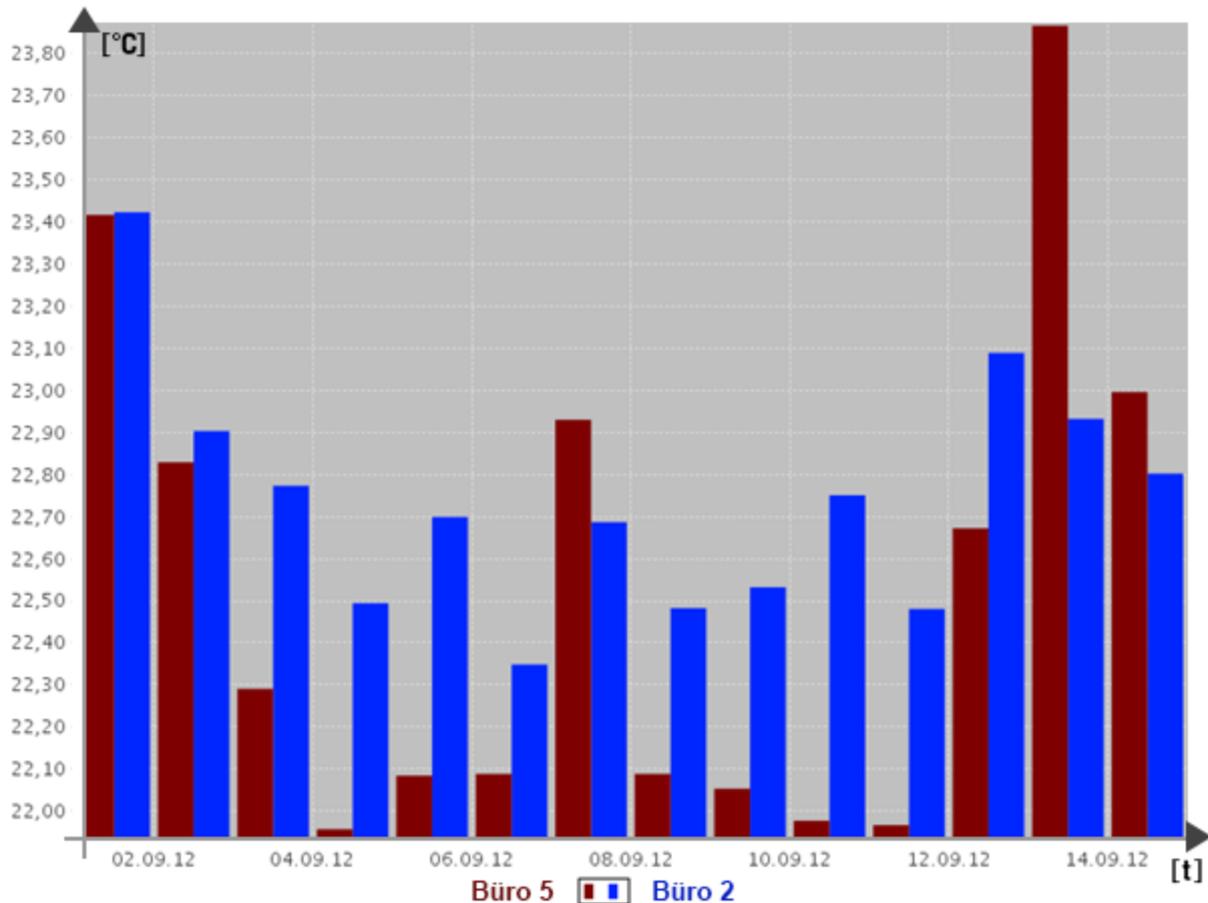


Abbildung 25: Messdaten in Grad Celsius

In der oben aufgeführten Darstellung wurden die Messdaten von Temperatursensoren in Grad Celsius grafisch dargestellt. Hierfür wurden Messungen in zwei Büroräumen durchgeführt und die Tagesmittelwerte wurden in Form von Säulendiagrammen visualisiert. Für eine bessere Unterscheidung der Büroräume wurden die Ergebnisse mithilfe der Farben blau und rot voneinander abgegrenzt. Ein Säulenpaar, bestehend aus einem roten und einem blauen Balken, bestehen aus den Tagesmittelwerten und der Messzeitraum für diese Abbildung beträgt vierzehn Tage.

### 5.6 Grenzen von Synavision

In dem folgenden Kapitel werden die Grenzen von Synavision Plott Pilot aufgezeigt. Hauptsächlich geht es dabei um zusätzliche Features und Einstellmöglichkeiten des Programms, welche für die nutzerfreundliche Visualisierung der Messdaten erforderlich sind. Dies sollte zu einer besseren Nutzerinteraktion mit dem Feedbacksystem führen. Um eine Betriebsoptimierung im neuen Audimax Gebäude erreichen zu können, muss das

Feedbacksystem an die Bedürfnisse der Nutzer angepasst werden und zusätzlich den Nutzern Einsparmöglichkeiten aufzeigen (siehe Kapitel 4.1).

Der Synavision Plott Pilot erfüllt nicht alle Anforderungen für ein Feedbacksystem, welche in Kapitel 4.3 aufgeführt wurden. Zu einem können keine Achsenbeschriftungen vorgenommen werden. Dies bedeutet, dass der Nutzer zwar ein tägliches Feedback über seinen Verbrauch erhalten kann. Jedoch kann die fehlende Achsenbeschriftung ein Verständnisdefizit beim Nutzer verursachen. Dadurch kann der Nutzer keinen direkten Bezug zu seinem Verhalten herstellen und Rückschlüsse über sein Verhalten können ebenfalls nicht erfolgen. Des Weiteren müssen die Graphen übersichtlich und verständlich sein, denn sie bilden die Grundlage für das Feedbacksystem. Werden die Graphen vom Nutzer nicht direkt verstanden und damit nicht akzeptiert, wird möglicherweise das gesamte Feedback abgelehnt. Zusätzlich wäre es von Vorteil, wenn sich die Farbe einzelner Balken bei der Überschreitung einer bestimmten Menge ändern würde. Dadurch könnte es gelingen, den Nutzer explizit auf Unregelmäßigkeiten oder negative Abweichungen in seinem Verhalten aufmerksam zu machen und ihm gleichzeitig Verbesserungsvorschläge auflisten. Eine weitere hilfreiche Einstellmöglichkeit wäre die Summierung des Verbrauches. Damit könnte der Nutzer einen Überblick über seinen gesamten Stromverbrauch erhalten und hätte eine ganze Zahl, an der er sich orientieren kann. Zur grafischen Visualisierung des Gesamtverbrauches würde sich ein Kreisdiagramm eignen, welcher nicht mit der Software von Synavision erstellt werden kann.

### **5.7 Bewertung**

Der Synavision Plot Pilot ist zur Visualisierung der Energieverbrauchsdaten für das neue Zentralgebäude geeignet. Mit dem Plot Pilot können Datensätze über einen Webbrowser in Echtzeit grafisch hinterlegt werden. Graphen können in mehreren Diagrammtypen dargestellt werden, wobei Säulen- und Liniendiagramme für eine Nutzerinteraktion am besten geeignet sind (siehe Kapitel 4.4 Visualisierung). Eine Visualisierung der Messdaten durch Punktwolken- oder Rasterdiagramme ist weniger sinnvoll, da diese nicht so weit verbreitet sind und die Datensätze weniger übersichtlich gestaltet werden. Um eine bessere Übersicht zu erhalten, können Messzeiträume verringert und die Messergebnisse als Mittelwerte angezeigt werden. Mithilfe der Verringerung von Messzeiträumen kann der Nutzer die Verbrauchswerte einzelner Tage aufrufen und Unregelmäßigkeiten in seinem Verhalten selbstständig analysieren. Diese Funktion ermöglicht dem Nutzer Rückschlüsse zu sein eigenes Verhalten zu ziehen und ist deswegen besonders wichtig. Zusätzlich können die einzelnen Graphen in

unterschiedlichen Farben angezeigt werden. Durch diese Funktion können Graphen voneinander abgegrenzt und durch den Einsatz von Signalfarben können einzelne Graphen hervorgehoben werden. Damit kann die Aufmerksamkeit der Nutzer auf bestimmte Bereiche gelenkt werden, um zu gewährleisten, dass das Feedback den Nutzer auch erreicht.

Sobald erste Messwerte aus dem neuen Zentralgebäude vorliegen, sollten diese zu Kontrolle mit dem Plot Pilot visualisiert werden. Die Messwerte aus dem Zentralgebäude werden ein wenig von den Messwerten aus Braunschweig abweichen, weil die verwendeten Sensoren nicht vollkommen identisch sind. Diese Kontrolle kann erst nach Fertigstellung des neuen Zentralgebäudes der Leuphana Universität durchgeführt werden.

### **6. Betriebsoptimierung**

Wie gut die Performance von Büro- und Verwaltungsgebäuden, die in der Planungsphase oft als „innovativ“, „ökologisch“ oder „intelligent“ bezeichnet werden, im realen Nutzungsalltag wirklich ist, wird in den meisten Fällen nicht kontrolliert oder veröffentlicht. Nicht jedes mit innovativen Konzepten oder neuen Technologien ausgestattete Gebäude hat zufriedene Nutzer. Und viele Gebäude bleiben im realen Betrieb weit hinter ihren energieeffizienten Potenzialen zurück. Diese Erkenntnis ist vielen Eigentümern nicht bekannt und Architekten und Ingenieure beschäftigen sich größtenteils nur in der Theorie mit der Performance ihrer Gebäude. Oftmals ist der Grund für die Differenz zwischen dem Soll-Ist Energieverbrauch von Gebäuden beim Nutzer zu finden, wie auch zuvor in dieser Arbeit mehrfach aufgeführt wurde (siehe Kapitel 4.1 Einbindung der Nutzer). Aus diesen Gründen kann eine Betriebsoptimierung von Gebäuden nicht alleine durch eine durchdachte Gebäudeplanung mit einhergehender Energiekonzeption erfolgen (vgl. Hahr/Geißler:295). Deswegen wurde bei dieser Arbeit der Fokus auf die Optimierung der Nutzerinteraktion gerichtet, um eine Betriebsoptimierung des neuen Zentralgebäudes der Leuphana Universität anzustreben.

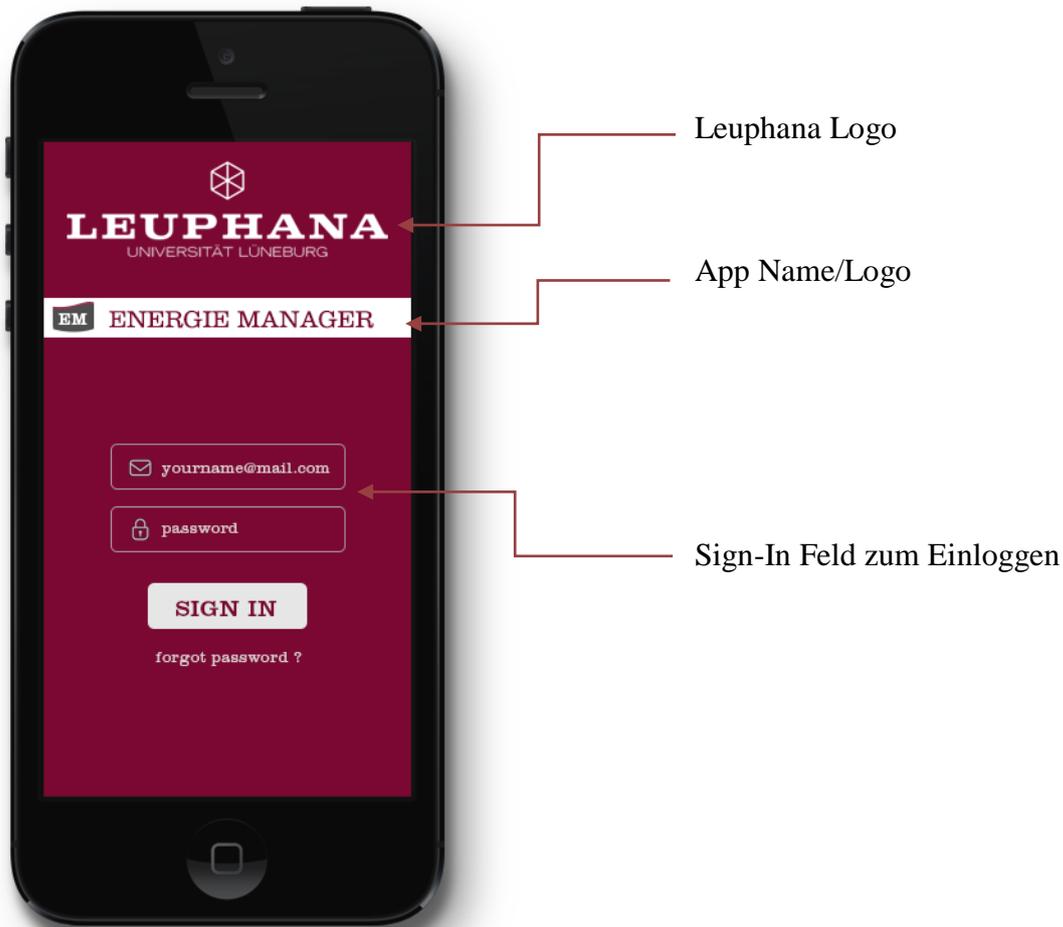
In dem folgenden Kapitel wird durch den Einsatz des erlernten Wissens wie z.B. der Feedbackmethode oder der Visualisierung und durch die praktische Erkenntnis durch Synavision eine Betriebsoptimierung des Audimax Gebäudes angestrebt. Diese Betriebsoptimierung kann nur durch eine optimale Nutzerinteraktion zwischen Nutzer und dem Ambient Intelligence System stattfinden. Durch eine App sollen dem Nutzer die Verbrauchswerte möglichst verständlich und übersichtlich angezeigt werden. Zusätzlich soll dieser durch Vergleiche oder effizientere Verhaltensweisen zum Energiesparen angeregt werden.

### **6.1 App zur Optimierung der Nutzerinteraktion durch das Aml**

Das Alltagsleben ist heute ohne mobiles Internet nicht mehr vorstellbar. Eine besondere Rolle kommt dabei den Handy-Applikationen (APP) zuteil. Durch diese Variante konnte sich das mobile Internet vom herkömmlichen Internet lösen. Die Apps ermöglichen die Fokussierung auf spezielle Inhalte und geben dem mobilen Internet eine Individualität. Der Erfolg der Apps hängt unmittelbar mit dem Design zusammen. Je einfacher und intuitiver die App gestaltet ist, desto beliebter ist sie bei den Anwendern.

Zukünftig sollen Energieverbräuche am Zentralgebäude auch durch Medien wie Smartphones kontrolliert und gesteuert werden (siehe Kapitel 4.4 Visualisierung). Durch ein integriertes Feedbacksystem soll der Nutzer einen direkten Bezug zu seinem Energieverbrauch bekommen und somit einen effizienteren Umgang mit dieser Ressource anstreben. Zusätzlich werden die handlungsunterstützenden mit den handlungsaktivierenden Maßnahmen verbunden (siehe Kapitel 4.2 Methoden und Maßnahmen). Durch die Verbindung der assistierenden technischen Geräte, mit dem angepassten Feedbacksystem kann eine Betriebsoptimierung für das neue Zentralgebäude erreicht werden. Der Nutzer würde durch die Interaktion mit der App zum Energiesparen angeregt werden. Außerdem sollte die bestmögliche Optimierung der Nutzerinteraktion negative Einflüsse wie das des substitutionsbezogenen Reboundeffektes verdrängen können.

Aus diesen Gründen soll im folgenden Abschnitt ein Layout/Design für eine App vorgestellt werden, die den Erwartungen einer optimalen Benutzeroberfläche entsprechen.

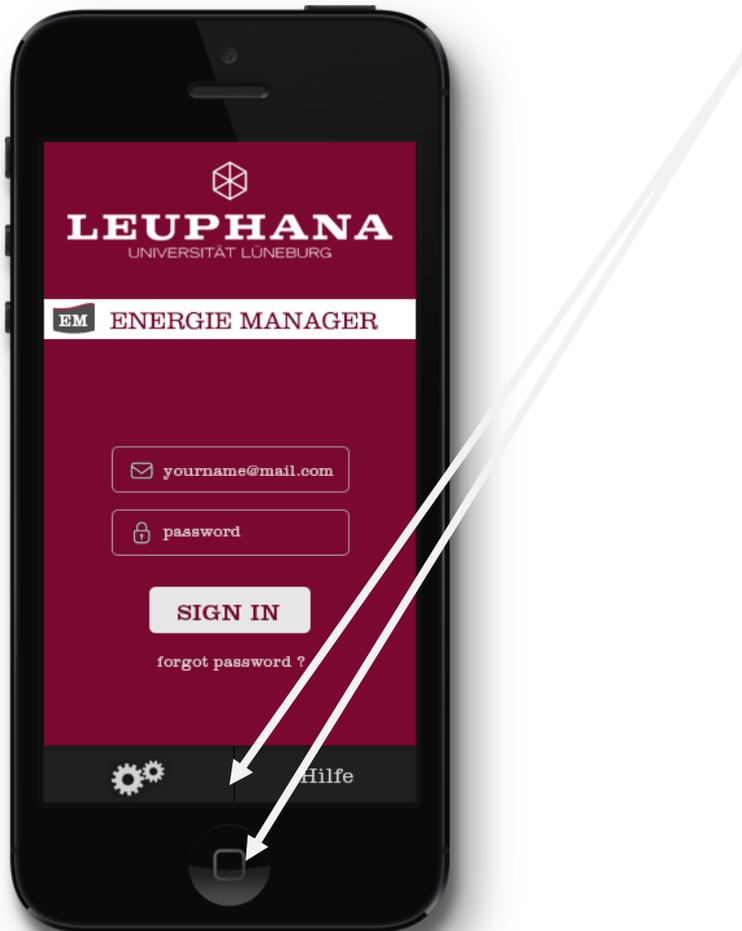


**Abbildung 26: App /Log-In**

Durch Öffnen der App hat der Anwender die Möglichkeit sich über ein Log-In Feld anzumelden. Die Anmeldung kann der Nutzer über die zugewiesene Lg-Nummer vollziehen. Jeder Mitarbeiter der Leuphana Universität Lüneburg ist im Besitz einer solchen Lg-Nummer. Diese personenbezogene Nummer sollte zusätzlich einem Büroraum zugeordnet werden und nur für diesen Büroraum sollte der Nutzer Einstellungen vornehmen können (siehe 4.4 Visualisierung). Dadurch soll die Nutzung der App aus falschen Absichten und von unbefugten dritten Personen geschützt werden. Falls die Anmeldedaten vergessen werden, kann eine automatische E-Mail an den Administrator geschickt werden. Innerhalb weniger Minuten wird dieser den Nutzer kontaktieren und unter einer Sicherheitsabfrage die notwendigen Anmeldedaten preisgeben.

Das Grundprinzip einer erfolgreichen App ist die Einfachheit. Bei dieser App wurden wenige, aber relevante Inhalte berücksichtigt. Die Funktionalität hat ebenfalls eine besondere Rolle bei der Gestaltung gespielt. Allgemein gebräuchliche Elemente sind für die Nutzer einfacher zu

verstehen und zu bedienen. Deshalb wurden bei dieser Konzipierung Standard-Icons wie Einstellungen oder Hilfen gesetzt, die durch die übliche Betätigung der Menü-Taste aktiviert werden.



**Abbildung 27: App /Einstellungen**

In den Einstellungen können ebenso Sprachen, Profiländerungen und andere diverse Konfigurationen vorgenommen werden.

Die interaktiven Elemente wurden großzügig gestaltet, damit diese leicht mit den Fingern zu bedienen sind. Auch die Schriftgröße wurde optimal angepasst, um die Lesbarkeit zu gewährleisten. Generell ist es sinnvoll die Funktionen analog zum Alltag zu gestalten, damit der Nutzer sie wieder erkennt. Es handelt sich um eine Leuphana-App, daher wurden bei der Gestaltung und Konzipierung das Logo sowie die Farben nach dem Corporate Design der Leuphana gestaltet. Der Nutzer kann sich somit mit der Leuphana Universität identifizieren. Wie nahezu jede App beinhaltet auch diese ein Icon zur Identifizierung der App. Es handelt

sich um eine App, die den Energieverbrauch regulieren kann. Aus diesem Grund heißt diese App „Energiemanager“. Zusätzlich wurde für diese App ein Logo entwickelt. Ein Logo hat einen höheren Wiedererkennungswert und hilft dem Nutzer sich mit dem Produkt zu identifizieren.

Nach erfolgreicher Anmeldung werden verschiedene Optionen angezeigt, die dem Nutzer zur Verfügung stehen. Außerdem wird der Benutzername als auch die Büroraumnummer bis zur Abmeldung angezeigt. Die Abmeldung kann unter Einstellungen vorgenommen werden.

Der Nutzer kann je nach Bedürfnis zwischen aktuellem Verbrauch, Verbrauch Vormonat, Verbrauch vergleichen und Raumkomfort auswählen.

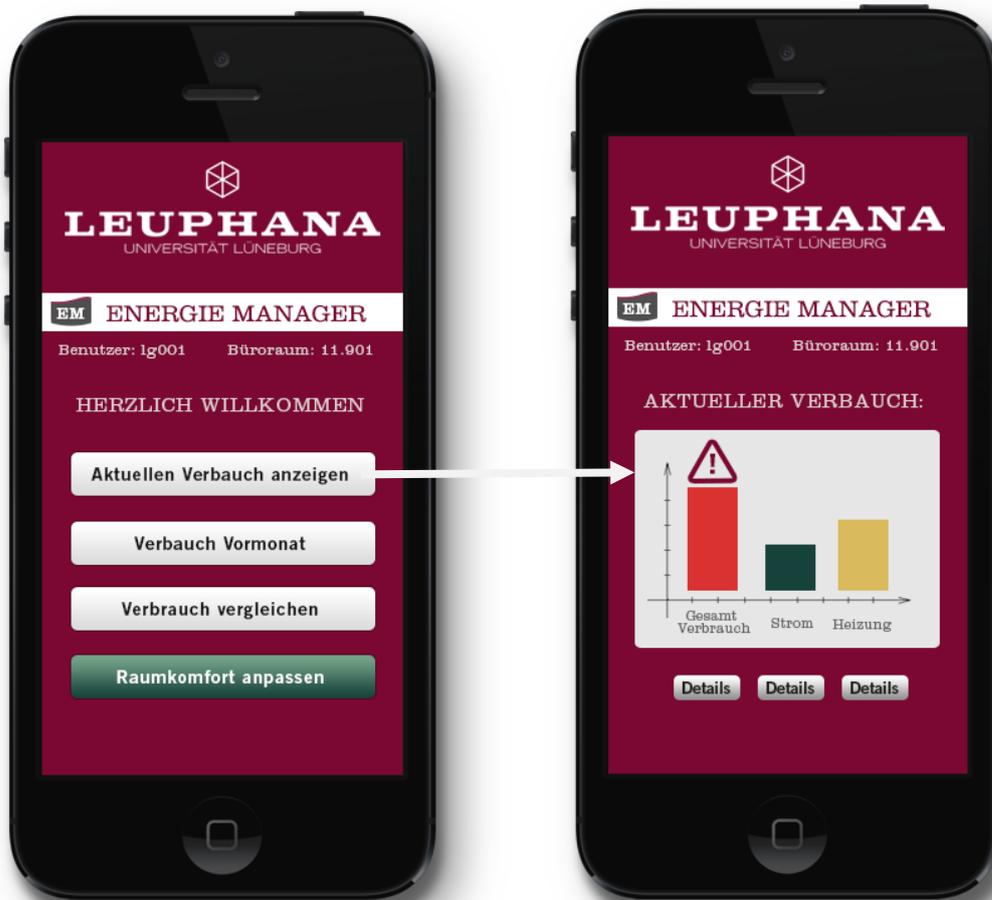


Abbildung 28: App/Funktionen

Abbildung 29: App/Aktueller Verbrauch

Im aktuellen Verbrauch wird ein Diagramm angezeigt, das zuvor durch die Monitoring Software Plot Pilot von Synavision generiert wurde. Je nach Messdaten können die Daten variieren. In dieser Darstellung wird der Gesamtverbrauch, Verbrauch für Strom und Verbrauch für Heizung in einem Balkendiagramm in unterschiedlichen Farben angezeigt. Balken- oder Liniendiagramme eignen sich besonders gut um Verbräuche zu visualisieren. Sie sind jedem bekannt und können von jedem Nutzer ohne Vorkenntnisse leicht interpretiert werden. Die Farben signalisieren jeweils den aktuellen Status und sollten sich bei Überschreitung einer festgelegten Menge anders färben. Die Farbe Rot ist dabei als Alarmsignal zu verstehen, die Farbe Grün steht für „alles im grünen Bereich“ und Gelb für ein aufkommendes Alarmsignal, wie sie auch in der Ampelregelung bekannt sind. Außerdem können zu den verschiedenen Messdaten die einzelnen Details aufgerufen werden, wobei der Nutzer den genauen Verlauf in Abhängigkeit der Zeit in Form eines Liniendiagramms angezeigt bekommt. Es können auch andere Formen von Diagrammen generiert werden. Dazu stehen im Synavision Plot Pilot vier Diagramme zu Verfügung, wobei für die Nutzerinteraktion Raster- oder Punktwolkendiagramme ungeeignet sind.



Abbildung 30: App /Mögliche Ursachen

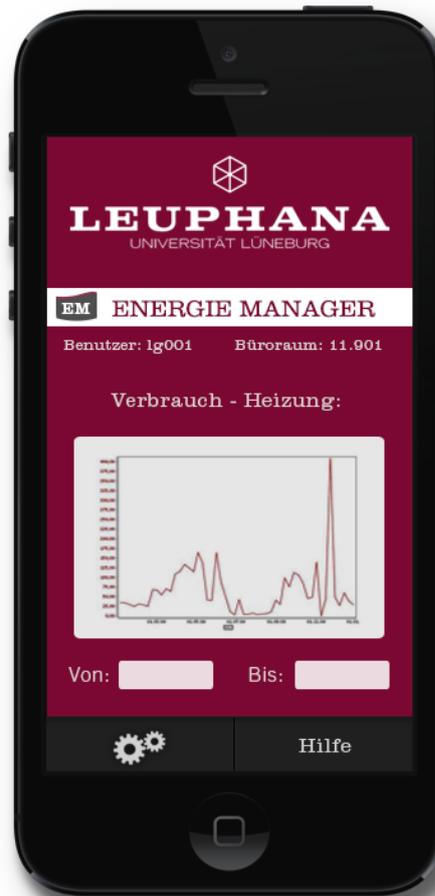


Abbildung 31: App / Verbrauch Vormonat

Zusätzlich zu der Farbregelung wird ein Gefahrenzeichen über den roten Balken angezeigt. Durch Betätigung des Zeichens werden die möglichen Ursachen und Optimierungsmöglichkeiten für den unzulässigen Verbrauch dargestellt. Diese werden ebenfalls in unterschiedlichen Farben angezeigt, um Prioritäten zuordnen zu können.

Als weitere Funktion können unter Verbrauch Vormonat (Siehe Abbildung 28) die Verbräuche für einen bestimmten Zeitraum ausgewählt und visualisiert werden. Es können Tagesmittelwerte oder Monatssummen angezeigt werden (Siehe auch Kapitel 5.2 Wie funktioniert Synavision). Durch diese Funktion kann der Nutzer sein Verbrauch zurückverfolgen und direkte Rückschlüsse zu seinem Verhalten ziehen.

Verbräuche können auch unter den einzelnen Büros verglichen werden. Dieser Vergleich kann im Menü unter der Funktion „Vergleich“ angesehen werden.



**Abbildung 32: App /Vergleich**

Der Nutzer bekommt dadurch die Möglichkeit seine Verhaltensweise und der seiner Arbeitskollegen miteinander zu vergleichen, Auffälligkeiten sowie Unstimmigkeiten zu analysieren und ggf. seine Verhaltensweise im Umgang mit der Ressource Energie anzupassen. Zudem könnte die Vergleichsmöglichkeit zur Anregung einer Diskussion unter Kollegen und dem daraus resultierenden Informationsaustausch beitragen. Außerdem sind Nutzer durch den Konformitätsdruck eher bereit die unbequeme Variante zu wählen (siehe Kapitel 4.3 Feedbacksystem).

In der oben aufgeführten Darstellung wurde die Raumfeuchte zweier Büros unter der Angabe in [%] beispielsweise verglichen (Siehe auch Kapitel 4). Allerdings sollten bei der Verwendung solcher Funktionen die datenschutzrechtlichen Aspekte berücksichtigt werden (Siehe auch Kapitel 3.2.6).

Der wichtigste Bestandteil dieser App ist die Feedbackfunktion. Die Funktion wird durch die Anwendung des Ambient Intelligence System gewährleistet. Im Bereich Raumkomfort können diese Einstellungen vorgenommen werden. Hier können Verhaltensweisen und

Präferenzen der Nutzer eingestellt werden, die im Ambient Intelligence System gespeichert werden.



**Abbildung 33: App /Feedbackfunktion**

Durch den Schieberegler können die verschiedenen Werte in das Eingabefeld übertragen und anschließend übernommen werden. Für die Anpassung des Raumkomforts an den Nutzer wurden bei dieser App nur zwei Sensoren berücksichtigt, jedoch können für das Zentralgebäude auch diverse andere Sensoren verwendet werden. Über den Schieberegler kann der Nutzer dem Ambient Intelligence System seine Zufriedenheit zur Raumtemperatur oder Helligkeit äußern. Hierfür wurde die Skalierung von -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3 erstellt, welche über den Schieberegler angepasst werden kann. Hierzu könnte die „0“ für Zufriedenheit stehen. Am Beispiel der Temperatur wäre die „+2“ zu warm und die „-1“ wäre etwas zu kalt. Um die Raumtemperatur an das persönliche Empfinden anzupassen bewegt der Nutzer den Regler zur Seite. Diese Werte könnten als Startwerte für ein angenehmes Raumklima dienen und würden die Nutzer nicht mit der Angabe von Sollwerten belasten. Damit sollten die Präferenzen der Nutzer kontextbezogen erfasst sein. Nach diesem Schritt ist

die Grundfunktionalität des Systems abgeschlossen und im zweiten Schritt sollte das AmI-System die Regelung der Raumtemperatur selbstständig übernehmen. Im dritten Schritt sollte der Nutzer auf mögliche Einsparungen hingewiesen werden und die vom Nutzer angeforderte Energie mit der bereitgestellten erneuerbaren Energie in Einklang gebracht werden. Zusätzlich kann die Option Hilfe, Hilfsanweisungen zur Anwendung der App geben.

Die App wurde als Prototyp erstellt und soll zur möglichen Umsetzung am Zentralgebäude dienen. Sie wurde intuitiv und einfach erstellt, damit die Nutzer mehr Freude bei der Anwendung haben.

### **7. Zusammenfassung/Fazit**

Bei steigenden Preisen für Energie werden Energiesparmaßnahmen immer wichtiger. Unternehmen und staatliche Einrichtungen mit großen Gebäuden sind oft von diesem Problem betroffen. Um die Kosten so gering wie möglich zu halten, werden kostspielige Gebäudeleitsysteme installiert, welche den Energieverbrauch optimieren sollen. Bei der Planung von Gebäuden werden neueste technologische Geräte eingesetzt und diese Gebäude werden anschließend als innovativ, intelligent oder ökologisch bezeichnet. Inwieweit diese Gebäude im Nutzungsalltag diese Anforderung wirklich erfüllen, wird oft nicht untersucht. Dabei kann sich erst in der Praxisphase zeigen, wie viel Energie ein Gebäude tatsächlich verbraucht. Eine aktuellere Studie der TU Braunschweig ergab eine durchschnittliche Abweichung von bis zu 70% zwischen dem theoretischen und praktischen Energiebedarf. Diese Abweichungen entstanden durch den Einfluss der Nutzer auf den Energieverbrauch (vgl. Fisch/Plesser 2007:154). Der Nutzer wird bei der Optimierung von Gebäuden oft nicht berücksichtigt, obwohl dieser im Alltag die Strom verbrauchende Geräte und Systeme steuern und bedienen muss. Durch ein ineffizientes Verhalten oder falsche Bedienung von komplizierten Geräten beeinflusst der Nutzer den Energieverbrauch negativ. Außerdem ist das Wohlbefinden der Nutzer für eine produktive Arbeit wichtig. Genau dieses Wohlbefinden kann nicht durch vollautomatische Gebäude hergestellt werden. Der Nutzer möchte die Umwelt an sein Gemütszustand anpassen und Einstellungen selbstständig vornehmen. Zudem ist es ebenfalls wichtig, dass der Nutzer den Bezug zu seinem Verbrauch nicht verliert und ihm die Folgen seines Verhaltens weiterhin bewusst bleiben.

Im Rahmen dieser Abschlussarbeit wurde das Energiemonitoringsystem des sich in Bau befindlichen Audimax Gebäudes der Leuphana Universität in Lüneburg betrachtet. Aus Projekten wie dem NaCaVI-Bericht, in dem zwölf Studierende über zwei Semester an der Reduzierung des Energieverbrauches im Campus-Viertel forschten, wurde die Wichtigkeit der Nutzerinteraktion beim Energiesparen ersichtlich. Um eine Betriebsoptimierung im Audimax Gebäude zu erreichen, müssen Energieverbräuche visualisiert und über ein geeignetes Medium den Verbraucher zu einem effizienten Umgang mit der Ressource bewegen.

Daher war es Ziel dieser Arbeit, die Nutzerinteraktion durch Visualisierung und Anwendung des Ambient Intelligence Systems zu optimieren. Hierfür wurden Messdaten mit dem Programm Synavision visualisiert und nutzergerecht dargestellt. Zusätzlich wurde ein App-Prototyp erarbeitet und diesen mitwirkenden und zuständigen Personen vorgestellt, um gemeinsam die beste Lösung für die Leuphana Universität zu finden.

In dem Kapitel Grundlagen und Stand der Forschung wurden wichtige Begrifflichkeiten vorgestellt, die für diese Abschlussarbeit von Bedeutung waren. Hierzu gehören die Begriffe Energiemonitoring und Ambient Intelligence System. Diese beiden Begriffe waren zugleich die Grundlage für das Verständnis des Synavision Plot Pilot, mit dem in der Projektphase gearbeitet wurde. Anschließend wurde die Nutzerinteraktion erläutert, dazu wurde erstmals auf die Dringlichkeit der Einbindung der Nutzer Bezug genommen. Um auf das Nutzerverhalten positiv einwirken zu können, wurden die Maßnahmen nach Gardner & Stern in handlungsaktivierende Maßnahmen und handlungsunterstützende Maßnahmen aufgeteilt. Im Folgenden wurden Feedbackkriterien und wichtige Gestaltungsmerkmale für eine Visualisierung aufgezeigt. Im anschließenden Kapitel Synavision wurde die Projektphase näher beschrieben. Zum allgemeinen Verständnis wurde zunächst das Unternehmen Synavision vorgestellt, welches den Synavision Plot Pilot entwickelt hat. Anschließend wurden die Funktionsweise des Plot Pilots und deren Anwendungsbereiche aufgeführt. Danach wurde das systematische Vorgehen bei der Aufbereitung der Messdaten erklärt und mögliche Graphen wurden mit dem Plot Pilot visualisiert, wobei die Letzteren unter Berücksichtigung der Gestaltungsmerkmale und der geplanten Sensoren für das Audimax Gebäude erstellt wurden. Darüber hinaus wurden die Grenzen der Software Plot Pilot aufgezeigt und im Hinblick auf die Eignung einer Visualisierung der Messwerte für eine Nutzerinteraktion bewertet. Der Synavision Plot Pilot ist für eine Visualisierung der Energiedaten und letztendlich für eine Nutzerinteraktion geeignet. Im letzten Kapitel wurde der App-Prototyp vorgestellt. Zu diesem Zweck wurden Graphen erstellt und die Bedienung

der App in mehreren Schritten erläutert. Bei der Erstellung der App wurden Grundlagen und Erkenntnisse wie Feedbackkriterien und Gestaltungsmerkmale für eine Visualisierung berücksichtigt.

Mithilfe des Synavision Plot Pilot konnten energetische Messdaten visualisiert werden. Unter Berücksichtigung des erlangten Wissens wurden die Graphen nutzergerecht visualisiert, welche in der Betriebsphase zur Nutzerinteraktion eingesetzt werden können. Als geeignetes Medium für eine Interaktion wurde das Smartphone vorgeschlagen. Smartphones sind weit verbreitet und ermöglichen dem Nutzer durchgehende und ortsunabhängige Kontrolle seiner Verbrauchsdaten. Zu diesem Zweck wurde ein übersichtlicher und verständnisvoller App-Prototyp mit dem Grafik-Programm Photoshop erstellt. Diese App bezieht sich hauptsächlich auf die Nutzer der Büroräume. Bei der Erstellung der App wurden ebenfalls die Gestaltungsmerkmale für eine nutzergerechte Visualisierung berücksichtigt. Verschiedene Visualisierungsarten sollen dem Nutzer seine Verbräuche grafisch erklären und ihm die Möglichkeit geben, sein Verhalten über einen längeren Zeitraum zurückzuverfolgen. Des Weiteren kann der Nutzer sein Verbrauch mit dem anderer Nutzer vergleichen, um eine Vergleichsmöglichkeit zu erhalten und eventuellen Informationsaustausch zwischen den Nutzern anzuregen. Der Nutzer kann zudem über die App die Zimmertemperatur oder die Lichtstärke steuern - daraus könnten Präferenzen der Nutzer abgelesen werden und ein auf den Nutzer abgestimmter Raumkomfort wäre damit möglich. Bevor der Nutzer sein Büro betritt, könnte sein bevorzugtes Klima automatisch eingestellt werden. Eine der wichtigsten Funktionen der App ist die Feedbackmöglichkeit. Durch die vielen geplanten Sensoren in den Büroräumen des Audimax Gebäudes können Verbesserungsvorschläge aus dem Verhalten der Nutzer erstellt und der Nutzer auf Unregelmäßigkeiten in seinem Verhalten hingewiesen werden. Durch diese Funktionen und besonders durch die Feedbackmöglichkeit der App kann der Nutzer zum effizienten Umgang mit der Ressource Energie geführt werden. Dabei muss erwähnt werden, dass ein effizientes Verhalten der Nutzer nicht sofort eintreten wird. Der Nutzer muss ständig auf Energieverschwendung hingewiesen werden und kann durch Rückschlüsse auf sein Handeln in Verbindung mit Verbesserungsvorschlägen zu energieeffizientem Verhalten geschult werden.

### **8. Ausblick**

In weiteren Untersuchungen könnte der Frage nachgegangen werden, inwieweit die Nutzer die Vorschläge des Feedbacksystems annehmen und wie groß die daraus entstehende

Energieeinsparung tatsächlich ist. Nach der Fertigstellung des Zentralgebäudes könnten zu diesem Zweck Befragungen der Nutzer durchgeführt werden. Verbesserungsvorschläge seitens der Nutzer sollten notiert und auf ihre Wirksamkeit kontrolliert werden. Gegebenenfalls könnten diese Verbesserungen in die App eingebunden werden. Durch ein App-Update könnte die überarbeitete Version dem Nutzer zur Verfügung stehen. Um die Energieeinsparung zu ermitteln, könnten Energieverbräuche vor und nach der Einführung der App miteinander verglichen werden. Diese Untersuchungen könnten durch Projekte unter wissenschaftlicher Begleitung an der Universität Lüneburg stattfinden und sollten in jährlichen Abständen wiederholt werden.

Abschließend ist festzuhalten, dass die vorliegende Arbeit ihre Zielsetzung erfüllt und sich kritisch mit den gewonnenen Erkenntnissen auseinandergesetzt hat. Damit stellt diese Arbeit eine Grundlage für Forschungen und Umsetzungen im Bereich des Energiemanagements.

## 9. Quellen

Abrahamse, W.; L. Steg, C. Vlek; T. Rothengatter (2005). "A Review of Intervention Studies Aimed at Household Energy Conservation." *Journal of Environmental Psychology* 25

Beck, Andreas; Volker, Drach; Jochen, Fricke (2001). *Innovative Systeme und Optimierte Techniken zur Energetischen Gebäudesanierung: Abschlussbericht zum Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsvorhaben ISOTEG*. Würzburg: ZAE Bayern.

BelAmI (2009). Project on Ambient Intelligent Systems. Budapest.

Berkhout, Peter H.G.; Jos C. Muskens; Jan W. Velthuisen (2000). *Defining the Rebound Effect*. New York: Institute for Policy Integrity

Bick, Markus und Tyge-F. Kummer (2008). *Ambient Intelligence and Ubiquitous Computing*. Beitrag im Sammelwerk.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2014). *VOC*. Berlin. Eingesehen am 30. März 2014 in <http://www.wecobis.de/service/lexikon/voc-lex.html>

Clemens, B. (1983). *Strategien zur Verhaltensbeeinussung bei privaten Energienachfragern*. Doktorarbeit. FU-Berlin.

Dietrich, Seibt; Hans- Georg Kemper; Georg Herzwurm; Dirk Stelzer und Detlef Schoder (2010). Akzeptanz von Ambient Intelligence in Krankenhäusern: Ein Ländervergleich zwischen Deutschland und Australien am Beispiel der Medikationsunterstützung. Köln.

Dipl. Ing. Melita Tuschinski (2014). *EnEV 2014: Was kommt wann?* Stuttgart. Eingesehen am 28.02.2014 in [http://service.enev-online.de/bestellen/EnEV\\_2012\\_Was\\_kommt\\_Novelle\\_Energieeinsparverordnung.pdf](http://service.enev-online.de/bestellen/EnEV_2012_Was_kommt_Novelle_Energieeinsparverordnung.pdf)

Donath, Andreas (2013). *Smartphone steuert das intelligente Heim*. Eingesehen am 12. April 2014 in <http://www.golem.de/specials/autor-andreas-donath/>

Encarnação, José Luis (2006). “Die Bunte Welt Der ‘Ambient Intelligence.’” In *Umhegt Oder Abhängig?: Der Mensch in Einer Digitalen Umgebung*, 3–35. Berlin ; New York: Springer.

Energie Schweiz (2002). *Grundlagen für die Betriebsoptimierung von komplexen Anlagen*. Bern. Eingesehen am 20.02.2014 in [http://neboplus.ch/cms/wp-content/uploads/2012/03/Grundlagen\\_BO\\_energieschweiz.pdf](http://neboplus.ch/cms/wp-content/uploads/2012/03/Grundlagen_BO_energieschweiz.pdf)

Fellner; Dieter W. (2010). *Ambient Intelligence*. Darmstadt

Fisch, Norbert; Plesser, Stefan (2007). *EVA – Evaluierung von Energiekonzepten für Bürogebäude*. Braunschweig: Technische Universität. Eingesehen am 17.02.2014 in [https://www.tubraunschweig.de/Medien-DB/igs/Projektarchiv/abschlussbericht\\_eva.pdf](https://www.tubraunschweig.de/Medien-DB/igs/Projektarchiv/abschlussbericht_eva.pdf).

Fischer, Corinna (2008). *Feedback on Household Electricity Consumption: A Tool for Saving Energy?* Energy Efficiency 1:79-104: Springer

Gardner, Gerald T.; Paul C. Stern (2002). *Environmental Problems and Human Behavior*. Boston, MA: Pearson Custom Pub.

Geffken, Jan (2013). *Ambient Intelligence & Nutzerverhalten: Erhebung energetischer Verbrauchsdaten zur Einbindung der Nutzer\*innen in das energetische Gebäudemanagement*. Lüneburg.

Gründerszene (2014). *App Lexikon*. Berlin. Eingesehen am 12. April 2014 in <http://www.gruenderszene.de/lexikon/begriffe/app>

Hahr, Dr. Henric; Geißler, Dipl. Ing. Marie-Christine (2013). *Zukunftspotential Bauwirtschaft*. Darmstadt. Eingesehen am 13.03.2014 in [http://www.bbb-professoren.eu/files/Tagungsband/20130905\\_Tagungsband.pdf](http://www.bbb-professoren.eu/files/Tagungsband/20130905_Tagungsband.pdf)

Klan, H., Kast, W. (1988). *Schwankungsbreiten beim Wärmeverbrauch*. HLH 39: Springer

Knorr; Krimmling; Preuß (2005). *Einzelraumregelungssysteme an Schulen- Mit dem Ziel von Energie- und Kosteneinsparungen*. Dresden. Eingesehen am 05. April 2014 in [http://www.fwuingenieurbuero.de/Ver%C3%B6ffentlichungenFWU/pdf/Einzelraumregelung\\_tab2\\_2005.pdf](http://www.fwuingenieurbuero.de/Ver%C3%B6ffentlichungenFWU/pdf/Einzelraumregelung_tab2_2005.pdf)

Kramer, Rainer (2001): *Messinformationstechnik für die liberalisierten Energiemärkte Elektrizität und Gas: Haus der Technik Fachbuch*. Essen.

Kuppler, Friedemann (1993). *Heizkosten richtig erfassen und verteilen: Geräteübersicht, Praxiserfahrungen, Kostenverteilung, Band 132 der Reihe Kontakt und Studium*. Ehningen bei Böblingen: expert Verlag.

Laskey, Alex (2013). „Verhaltensexperiment“ Eingesehen am 3.03.2014 in [http://www.ted.com/talks/alex\\_laskey\\_how\\_behavioral\\_science\\_can\\_lower\\_your\\_energy\\_bill/transcript?lang=en](http://www.ted.com/talks/alex_laskey_how_behavioral_science_can_lower_your_energy_bill/transcript?lang=en)

Leuphana 1 (2014). *Leuphana Universität Lüneburg: Themen*. Lüneburg. Eingesehen am 12. April 2014 in <http://www.leuphana.de/themen.html>

Leuphana 2 (2013). *Forschung Für Energieeffizienz: Projekt: EnEff:Campus: Klimaneutraler Campus Leuphana Universität Lüneburg*. Lüneburg. Eingesehen am 13. April 2014 in <http://www.eneffstadt.info/de/pilotprojekte/projekt/details/eneffcampus-klimaneutraler-campusleuphana-universitaet-lueneburg/>.

Lohmann-Haislah, Andrea (2012). *Stressreport Deutschland 2012: Psychische Anforderungen, Ressourcen und Befinden*. Dortmund. Psychische Anforderungen, Ressourcen und Befinden.

Lüdeke-Freund, Florian; Burandt, Simon (2010): *Universities as Learning Organizations for Sustainability? The Task of Climate Protection*. In: Filho, Walter Leal (Hrsg.): *Universities*

and Climate Change. Introducing Climate Change to University Programs. Heidelberg, S. 179-192.

McClelland, L. und S. Cook (1979). *Energy Conservation Effects of continuous in-home feedback in all-electric homes. Journal of Environmental Systems.*

Martiskainen, Mari (2007). *Affecting Consumer Behaviour on Energy Demand.* Sussex: SPRU–Science and Technology Policy Research. Eingesehen am 18.02.2014 in <http://www.sussex.ac.uk/sussexenergygroup/documents/seg-consumer-behaviour-finalreport.pdf>.

Meier, Andreas (2012). Vorläufige Zusammenfassung der Ergebnisse zum ambient intelligence-System im Zentralgebäude der Leuphana Universität. Lüneburg.

Münch;Gabel (2014). *Untersuchungen zur Energiegewinnung von AmI-Systeme: Berichte des Forschungsschwerpunkt Berlin, 1.* Kaiserslautern.

Mügge, Günter (1993): Vergleich verschiedener Heizkostenverteilsysteme: Simulationsuntersuchung ermittelt Verteilfehler unter verschiedenen Bedingungen. HLH.

OPC (2014). *OPC Allgemein?* Aachen. Eingesehen am 15.02.2014 in [http://infosys.beckhoff.de/index.php?content=../content/1031/tcopcserver/html/tcopcserver\\_opccommon.htm&id](http://infosys.beckhoff.de/index.php?content=../content/1031/tcopcserver/html/tcopcserver_opccommon.htm&id)

Opel, Oliver; Julia, Fisman; Jan, Geffken; Birte, Hensen; Friedrich, Laatz; Mario, Majic; Albert, Regenbrecht, et al. (2013). *NaCaVi Transdisziplinärer Projektbericht.* Lüneburg: Institut für Nachhaltige Chemie und Umweltchemie.

PEBBLE (2012). *OPC in der Praxis*. Eingesehen am 13.02.2014 in <http://www.pebble-fp7.eu/>

Rico Venzmer (2011). *Software für den Energieberater: Marktübersicht, Methoden, Anwendung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Sensorik 1 (2010). *Sensor Grundlagen*. Karlsruhe. Eingesehen am 28.03.2014 in <https://ces.karlsruhe.de/>

Sensorik 2 (2014). *Duden online: Bibliographisches Institut GmbH*. Berlin. Eingesehen am 28.03.2014 in <http://www.duden.de/suchen/dudenonline/wasserz%C3%A4hler>

Sensorik 3.2014. "Duden online". Bibliographisches Institut GmbH. Berlin. 02. April 2014 in <http://www.duden.de/suchen/dudenonline/Stromz%C3%A4hler>

Synavision 1( 2014). *Synavision GmbH*. Aachen. Eingesehen am 11. April 2014 in <https://www.synavision.de/>

Techem (2014): *Techem Assisto Website*. Eingesehen am 2. April 2014 in <http://www.assisto.de>, alternativ: <http://www.techem.de>

U. Hansmann; L. Merk; M. Nicklous; T. Stober (2001). *Pervasive Computing Handbook*. Springer-Verlag

Visualisierung (2013). *Anzahl der Smartphone-Nutzer in den Jahren 2009 bis 2013*. Eingesehen am 23.02.2014 in <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/198959/umfrage/anzahl-der-smartphonennutzer-in-deutschland-seit-2010/>

Wirtschaftslexikon. Spin-Off-Unternehmen (2013). *Spin-Off-Unternehmen*. Eingesehen am 26.02.2014 in <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/spin-off.html>

ZACH, ed. (2011). *An integrated architecture for energy systems and indoor climate monitoring in buildings*. TU Wien. Eingesehen am 17.02.2014 in [http://www.eeg.tuwien.ac.at/eeg.tuwien.ac.at\\_pages/events/iewt/iewt2011/uploads/fullpaper\\_iewt2011/P\\_272\\_Zach\\_Robert\\_25-Jan-2011,\\_10:28.pdf](http://www.eeg.tuwien.ac.at/eeg.tuwien.ac.at_pages/events/iewt/iewt2011/uploads/fullpaper_iewt2011/P_272_Zach_Robert_25-Jan-2011,_10:28.pdf)

Zagler, Wolfgang L. (2006). *AAL-Ambient Aissisted Living*. Wien.

## 10. Anhang

### Beispieldaten der Synavision GmbH

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	synavision Beispieldaten										
2	ID	Beispiel_He	Beispiel_He	Beispiel_He	Beispiel_He	Beispiel_He	Beispiel_Am	Beispiel_AH	Beispiel_AHU_Return	nair_Temp_008	
3	Shortinfo	Heizleistung W <sub>r</sub> rmeverbr Vorlauftemp Rcklauftemp Ventilstellur Außenufthe Zulufttempe Ablufttemperatur									
4	LongInfo										
5	MinLimit	0	0	0	0	0	-30	0	0		
6	MaxLimit	50	50	100	100	100	50	100	100		
7	Unit	kW	kWh	øC	øC	%	øC	øC	øC		
8	01.01.2009 00:00	Mrz 24	0.81	47	38	22.82	-4.82	22.44	23. Sep		
9	01.01.2009 00:15	Mrz 24	0.81	47	38	22.82	-4.82	22.44	23. Sep		
10	01.01.2009 00:30	Mrz 43	0.8575	47	38	34.38	-4.82	22.44	23. Jun		
11	01.01.2009 00:45	03. Apr	0.85	47	38	37.25	-4.85	22.44	23. Jun		
12	01.01.2009 01:00	Mrz 41	0.8525	47	38	30.91	-4.65	22.41	22.98		
13	01.01.2009 01:15	Mrz 31	0.8275	47	39	27.14	-4.42	22.41	22.95		
14	01.01.2009 01:30	03. Sep	0.7725	47	38	21.55	-4.34	22.44	23. Jan		
15	01.01.2009 01:45	03. Jan	0.775	47	38	21. Aug	-4.28	22.41	22.98		
16	01.01.2009 02:00	Mrz 24	0.81	46	38	21.41	-4.11	22.44	23. Jan		
17	01.01.2009 02:15	Mrz 22	0.805	46	38	21.45	-4.02	22.41	22.95		
18	01.01.2009 02:30	Mrz 14	0.785	46	38	22.43	-4	22.44	23. Jan		
19	01.01.2009 02:45	03. Jun	0.765	46	38	24.57	-3.88	22.44	22.95		
20	01.01.2009 03:00	Mrz 22	0.805	46	37	23.61	-3.8	22.41	22.95		
21	01.01.2009 03:15	Mrz 25	0.8125	46	37	27.14	-3.8	22.41	22.92		
22	01.01.2009 03:30	Mrz 25	0.8125	46	37	26.64	-3.63	22.41	22.95		
23	01.01.2009 03:45	Mrz 23	0.8075	46	37	24.58	-3.54	22.38	22.95		
24	01.01.2009 04:00	03. Mrz	0.765	46	37	22.64	-3.48	22.44	22.95		

## Daten von der TU Braunschweig

A	B	C	D	E	F
1 Datum Zeit	Raumfeuchte 1005 1005 / Büro 2 -R- [%]	Raumfeuchte 2006 2006 / Büro 5 -R- [%]	Raumfeuchte 2009 2009 / Büro 8 -R- [%]	Raumfeuchte E05 E05 / Büro 1-R- [%]	Raumtemperatur 1005 / Büro 2
2 01.01.2012 00:00	26,16	25,9	28,3	30,2	
3 01.01.2012 00:15	26,16	25,9	28,3	30,2	
4 01.01.2012 00:30	26,2	25,88	28,38	30,36	
5 01.01.2012 00:45	26,2	25,78	28,36	30,2	
6 01.01.2012 01:00	26,2	25,7	28,3	30,2	
7 01.01.2012 01:15	26,2	25,7	28,3	30,2	
8 01.01.2012 01:30	26,2	25,7	28,3	30,28	
9 01.01.2012 01:45	26,26	25,7	28,3	30,3	
10 01.01.2012 02:00	26,3	25,68	28,3	30,3	
11 01.01.2012 02:15	26,3	25,6	28,3	30,32	
12 01.01.2012 02:30	26,3	25,6	28,3	30,28	
13 01.01.2012 02:45	26,3	25,6	28,3	30,26	
14 01.01.2012 03:00	26,3	25,6	28,3	30,26	
15 01.01.2012 03:15	26,3	25,6	28,3	30,24	
16 01.01.2012 03:30	26,3	25,54	28,3	30,3	
17 01.01.2012 03:45	26,3	25,5	28,3	30,4	
18 01.01.2012 04:00	26,3	25,5	28,3	30,24	
19 01.01.2012 04:15	26,3	25,5	28,34	30,28	
20 01.01.2012 04:30	26,34	25,5	28,4	30,46	
21 01.01.2012 04:45	26,4	25,5	28,4	30,3	
22 01.01.2012 05:00	26,4	25,5	28,4	30,3	
23 01.01.2012 05:15	26,4	25,5	28,4	30,3	
24 01.01.2012 05:30	26,4	25,5	28,4	30,3	

## Beleuchtungsszenario für Einzelraumregelung und deren Beeinflussung

Beleuchtungsszenario für Einzelraumregelung und deren Beeinflussung			
Einzel - Zweierbüro			
Alternatives Szenario			
Betreteten des Raumes	Präsenzmelder am Eingang erfasst das Betreten		Pr. Gibt die Freigabe an die EZR -> Freigabe Beleuchtungsstromkreis
			Arbeitsplatzbeleuchtung wird selbstständig durch Stehleuchte ausgeregelt, Grundbeleuchtungsszenario gibt es nur wenn separate Leuchten vorhanden sind
Verlassen des Raumes	Erfassung über geeigneten Präsenzsensoren am Eingang der die Präsenzerfassung im gesamten Raum erfassen kann.		Beleuchtungsstromkreis abgeschaltet, Heizung, Lüftung auf abgesenkten Betrieb heruntergeregelt, manuelle Vorgaben werden zurückgesetzt, jeweils mit Zeitablaufsteuerung die auch über GLT beeinflusst werden kann
Erfassen Verbrauch Leuchtenstromkreis	Nur in AML-Räumen vorsehen, in anderen EAR und DAR - Nachrüstbarkeit vorsehen im EZR-Bodenverteiler vorsehen		Ablesung über EZR-> GLT, Hinweis: für Abrechnungszwecke nicht geeignet, nur für Auswertungszwecke

Beleuchtungsansteuerung für andere Räume			
notwendig für:			
	a) - Besprechungsräume		
	b) - Seminarräume		
	c) Gruppenarbeitsräume/Projekträu		
	d) - VF (nur Flure)		
	e) - Technikräume/PuMi		
	- VF mit Denkerinseln einschl.		
	f) Kopierbereiche		
	g) - Auditorium		
	h) - Foyer		
	i) - Multifunktionsflächen		
	j) - Sanitärbereiche		
	k) - Cafeteria		
	l) - Küche/Ausgabe/Geschirrspüle		

## 10. Anhang

Aktion			Regelung
<b>Betreten des Bereichs</b>			
	Präsenztaster wird betätigt, Licht wird am Bedienelement aktiv eingeschaltet.	Beleuchtungsstromkreise werden durch EZR angesteuert.	Signal über EZR an GLT-> Licht ist an oder aus, keine tageslichtabhängige Regelung, da hauptsächlich innenliegend
	a) wie a)	wie a) jedoch 2 Beleuchtungsstromkreise und zusätzlich die Mediensteuerung	wie a)
	c) Präsenzerfassung raumdeckend	wie EAR/DAR	wie EAR/DAR
	d) Bewegungsmelder		keine Erfassung, keine Einzelraumregelung
	e) Lichtschalter		keine Erfassung, keine Einzelraumregelung
	f) wie d) plus Präsenzmelder im Bereich der Denkerinseln		keine Erfassung, keine Einzelraumregelung
	g) Betätigung der Medienbedienelemente	alle Medien- Beleuchtungs- und Raumkonditionierungsfunktionen	Szenariensteuerung, Energieverbräuche sollen für Bauteil Auditorium separat erfasst und auf GLT angezeigt werden, exklusive Technikräume
	h) nicht relevant - Dauerbetrieb	Beleuchtungsfunktionen, Umschaltung	Beleuchtungsszenarien
	i) wie h)	wie h)	wie h)
	j) 2-Kanal-Präsenzmelder	BeleuchtungANAUS, Lüftung ANAUS jedoch mit Nachlaufzeit und Anlaufverzögerung	keine Erfassung, keine Einzelraumregelung
	k) Nutzungszeitenkatalog hinterlegen, Nutzungszeitverlängerung über BedienTableau im Küchenbereich	selbsttätige Tageskonstantlichtsteuerung über mehrere Stromkreise und Lichtsensoren, Sollwert übersteuerbar durch Bedientableau im Küchenbereich	
	l) klassische Ausstattung (Lichtschalter, Bedientableau Lüftung, Heizung, Kälte, Bedientableau Küchengeräte, Anzeigetableau Kühlzellen)		separate Medienerfassung für diesen Bereich erforderlich (Abrechnungszwecke) und auf GLT angezeigt
<b>Verlassen des Bereichs</b>			
	Präsenztaster wird erneut betätigt. Falls nicht betätigt - Zeitprogramm ist dem Präsenztaster hinterlegt, und über GLT veränderbar.		Licht aus, Heizung, Lüftung, Kälte aus bzw Grundlast
	a) wie a)		
	c) Präsenzerfassung raumdeckend	Beleuchtungsstromkreise werden freigegeben	jede Stehleuchte regelt für sich
	d) Bewegungserfassung raumdeckend		
	e) Betätigen Lichtschalter		keine Erfassung, keine Einzelraumregelung
	f) wie d) plus Präsenzmelder im Bereich der Denkerinseln		
	g) Betätigen der Medienbedienelemente		Meldung an GLT "Licht ist an", Weiterverarbeitung bspw. Weiterleitung an Schliessdienst oder ähnlich klärt LEU intern.
	h) nicht relevant - Dauerbetrieb		Rückmeldung an GLT "aktives Lichtszenario", Weiterverarbeitung bspw. Weiterleitung an Schliessdienst oder ähnlich klärt LEU intern
	i) nicht relevant - Dauerbetrieb		Rückmeldung an GLT "aktives Lichtszenario", Weiterverarbeitung bspw. Weiterleitung an Schliessdienst oder ähnlich klärt LEU intern
	j) Präsenzmelder		keine Erfassung, keine Einzelraumregelung
	k) Nutzungszeitenkatalog hinterlegen, Nutzungszeitverlängerung über BedienTableau im Küchenbereich		keine Erfassung Lichtzustand an GLT
	l) klassische Ausstattung (Lichtschalter, Bedientableau Lüftung, Heizung, Kälte, Bedientableau Küchengeräte, Anzeigetableau Kühlzellen)		keine Erfassung Lichtzustand an GLT

## Screenshots Plot Pilot

## Anmeldeplattform

https://apps.synavision.de/vm1/plotpilot/

**synavision** Nutzer:  Passwort:

### synavision plot pilot

**- Ihr Werkzeug für die Datenanalyse**

- Importieren Sie Ihre Daten über Ihren Webbrowser oder konfigurieren Sie einen automatisierten Datenimport
- Erzeugen und gestalten Sie Linien-/Balkendiagramme und aggregieren Sie Ihre Monats- und Jahresverbräuche
- Erzeugen Sie Carpet Plots und integrieren Sie die Plots in Word-Berichte, Websites etc. und halten Sie somit Ihre Berichte stets aktuell
- Analysieren Sie Wirkzusammenhänge mit aussagekräftigen Punktwolken
- Unser Online-Service: Ihr Feedback geht direkt an unsere Entwickler und Berater

**Testen Sie den plot pilot jetzt!**  
weitere Informationen  
[gratis Testen](#)

synavision GmbH > plot pilot

energie navigator & plot pilot 2.3.1  
13.2.2014 12:39:07  
Die Produkte synavision energie navigator und plot pilot sind ab sofort in der Version 2.3.1 verfügbar. Wir wünschen Ihnen viel ...

energie navigator & plot pilot 2.3.0  
7.2.2014 13:40:35  
Die Produkte synavision energie navigator und plot pilot sind ab sofort in der Version 2.3.0 verfügbar. Wir wünschen Ihnen viel ...

energie navigator & plot pilot 2.2.0  
13.12.2013 09:30:28  
Die Produkte synavision energie navigator und plot pilot sind ab sofort in der Version 2.2.0 verfügbar. Wir wünschen Ihnen viel ...

energie navigator & plot pilot 2.1.0  
22.11.2013 15:06:38  
Die Produkte synavision energie navigator und plot pilot sind ab sofort in der Version 2.1.0 verfügbar. Wir wünschen Ihnen viel ...

energie navigator & plot pilot 2.0.0  
5.11.2013 18:14:38  
Die Produkte synavision energie navigator und plot pilot sind ab sofort in der Version 2.0.0 verfügbar. Wir wünschen Ihnen viel ...

plot pilot update  
5.8.2013 12:10:01  
Der synavision plot pilot ist ab sofort in der Version

## Importbereich

https://apps.synavision.de/vm1/plotpilot/

**synavision** Plots Import Services Leuphana Angemeldet als Leuphana6

### Daten in Leuphana importieren

Über diese Seite können Sie Daten in das System importieren. Die Daten können entweder auf Ihrer lokalen Maschine oder auf einem Server gespeichert sein. Falls die Daten auf einem Server gespeichert sind, kann das System diese Daten regelmäßig automatisch für Sie importieren.

**Import-Strategie** Speicherort der Daten Parser-Eigenschaften Übersicht

Speicherort: lokaler Rechner ?

Weiter

## Parser-Eigenschaften

Über diese Seite können Sie Daten in das System importieren. Die Daten können entweder auf Ihrer lokalen Maschine oder auf einem Server gespeichert sein. Falls die Daten auf einem Server gespeichert sind, kann das System diese Daten regelmäßig automatisch für Sie importieren.

Import-Strategie Speicherort der Daten **Parser-Eigenschaften** Übersicht

Parser: Default Parser

A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	Datum Zeit	Raumfeuchte 1005 / 1005 / Büro 2 -R- [%]	Raumfeuchte 2006 / 2006 / Büro 5 -R- [%]	Raumfeuchte 2009 / 2009 / Büro 8 -R- [%]	Raumfeuchte E05 / E05 / Büro 1 -R- [%]	Raumtemperatur 1005 / Büro 2 - R- [Celsius]	Raumtemperatur 2006 / Büro 5 - R- [Celsius]	Raumtemperatur 2009 / Büro 8 - R- [Celsius]	Raumt E05 / [Celsi
2	01.01.2012	25.45	25.0	28.9	20.2	24.04	25.95	24.0	24.05

Template:  Neues Template

Encoding: UTF-8 ? Trennzeichen: ; (Semikolon) ?

Format: vertikal ? Blocklänge: 1 ?

Dezimal-Trennzeichen: automatisch ?

Sensor-Metadaten

Gl. Id:  ? Min Value:  ? Datum:  ? dd.MM.yyyy ?

Gl. Id  ? Max Value:  ? Uhrzeit:  ? HH:mm:ss ?

Präfix:

## Erzeugungsbereich für ein Bar-/Line Plot

synavision Plots Import Services Leuphana Angemeldet als Leuphana6

Erzeugen Sie einen Bar- / Line Plot für Leuphana

Bitte wählen Sie die gewünschte Menge an Sensoren aus und konfigurieren Sie diese, um einen Bar / Line Plot zu erzeugen.

**Bar / Line Plot** ⚙️

Sensor für Balkendiagramm hinzufügen +

Sensor: (Bitte einen Sensor wählen) ⓘ ⓘ ⚙️ 🗑️

Sensor für Liniendiagramm hinzufügen +

Sensor: (Bitte einen Sensor wählen) ⓘ ⓘ ⚙️ 🗑️



## Auswahl der Sensoren

Filter:

GlTid	ShortInfo	
Demo_Heating_Valve_East_005	Ventilstellung	i →
HK01/02 HYB Decke 1.OG GEH Wärmezähler 1.OG [kWh]		i →
HK01/02 HYB Decke 1.OG GEK Kältezähler 1.OG [kWh]		i →
HK01/02 HYB Decke 1.OG ME Leistung (Wärme und Kälte) 1.OG [kWh]		i →
HK01/02 HYB Decke 1.OG RL [Celsius]		i →
HK01/02 HYB Decke 1.OG VL [Celsius]		i →
HK01/02 HYB Decke 2.OG GEH Wärmezähler 2.OG [kWh]		i →
HK01/02 HYB Decke 2.OG GEK Kältezähler 2.OG [kWh]		i →
HK01/02 HYB Decke 2.OG ME Leistung (Wärme und Kälte) 2.OG [kWh]		i →
HK01/02 HYB Decke 2.OG RL [Celsius]		i →
HK01/02 HYB Decke 2.OG VL [Celsius]		i →
HK01/02 HYB Decke EG GEH Wärmezähler EG [kWh]		i →
HK01/02 HYB Decke EG GEK Kältezähler EG [kWh]		i →
HK01/02 HYB Decke EG ME Leistung (Wärme und Kälte) EG [W]		i →
HK01/02 HYB Decke EG RL [Celsius]		i →

16:30 of 54

## Bar-/Line Plot

synavision Plots Import Services Leuphana Angemeldet als Leuphana6

Erzeugen Sie einen Bar- / Line Plot für Leuphana

Bitte wählen Sie die gewünschte Menge an Sensoren aus und konfigurieren Sie diese, um einen Bar / Line Plot zu erzeugen.

Bar / Line Plot ⚙️

Sensor für Balkendiagramm hinzufügen +

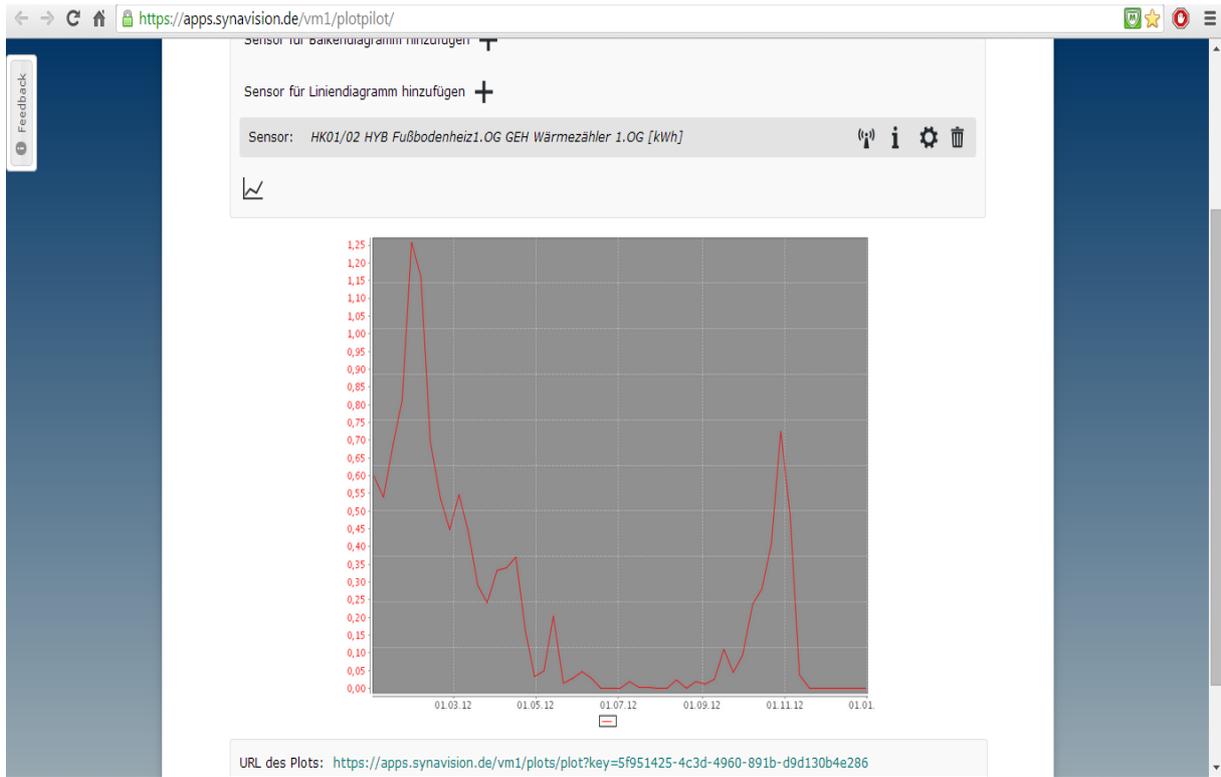
Sensor: (Bitte einen Sensor wählen) 🔍 i ⚙️ 🗑️

Sensor für Liniendiagramm hinzufügen +

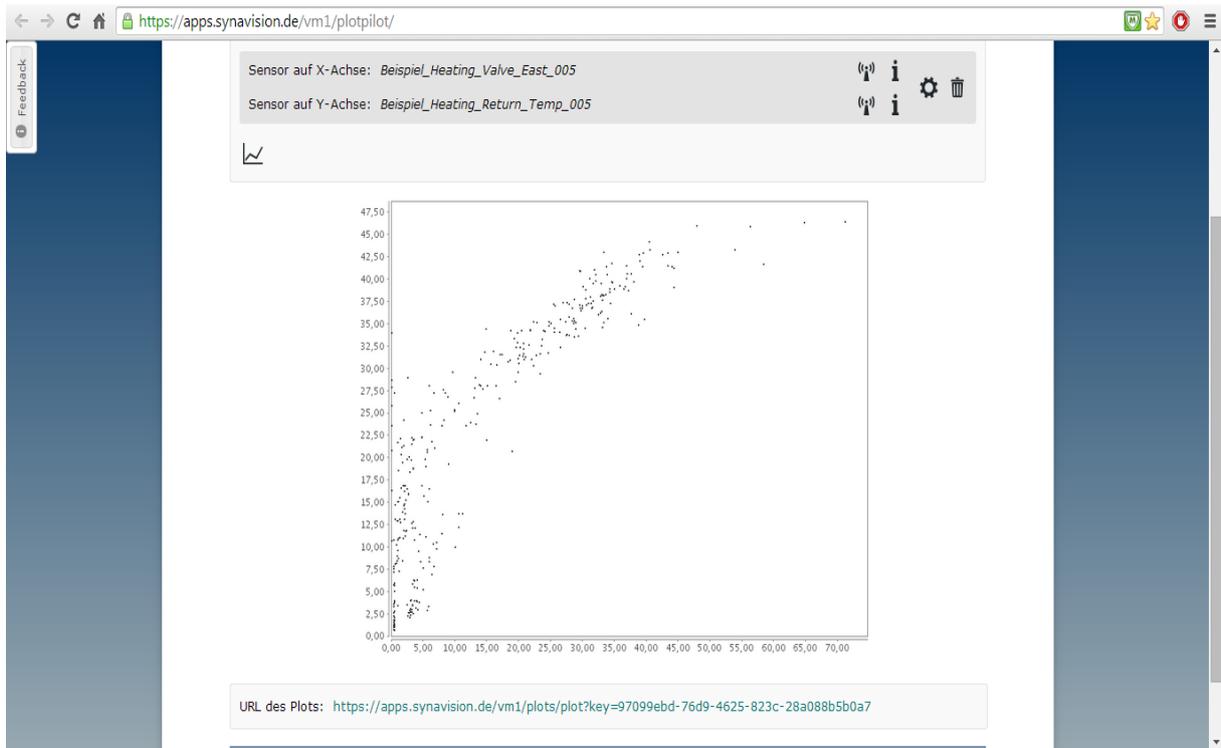
Sensor: (Bitte einen Sensor wählen) 🔍 i ⚙️ 🗑️

📈

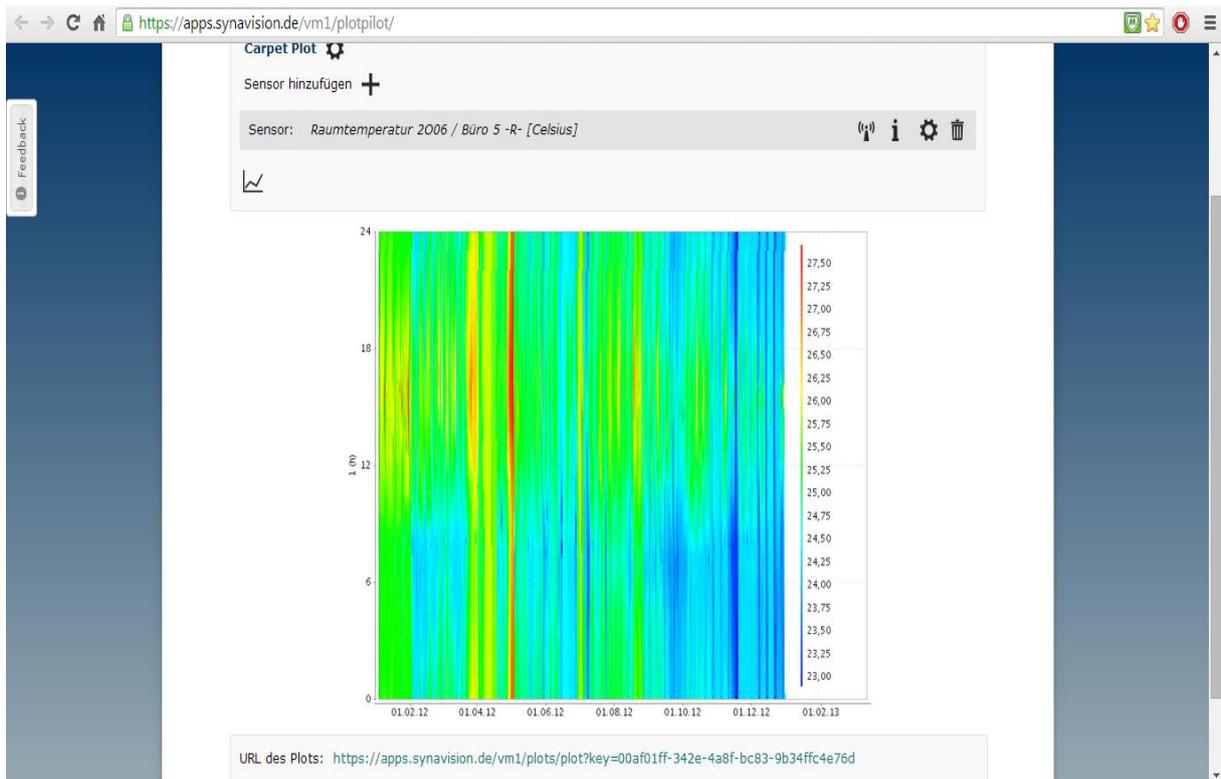
## Liniendiagramm



## Scatter Plot



## Carpet Plot



## Zwischenpräsentation



# SYNAVISION

Eine Präsentation von Vigithan Wayaspathy und David Rausch



## Inhaltsverzeichnis

- Was ist Synavision?
- Wie funktioniert Synavision?
- Anwendungsbereiche
- Aufbereitung unserer Messdaten
- Visualisierung der Energieverbräuche
- Einzelraumregelung im Zentralgebäude
- Beispiel für App Design/Visualisierung
- Grenzen von Synavision



16.04.2014

Von Wayaspathy und Rausch

3



## Was ist Synavision?

- Software-Tool für Monitoring
- Management von Messdaten
- Unternehmenssitz in Aachen
- Spin-Off-Unternehmen
- Synavision Plot Pilot



16.04.2014

Von Wayaspathy und Rausch

5



## Wie funktioniert Synavision?

- Import der Daten über Webbrowser
- Verknüpfung von verschiedenen Messdaten
- Darstellung in Form von Linien-, Balken-, Punktwolken- und Rasterdiagramme
- Einfügen in externe Berichte und Webseiten



16.04.2014

Von Wayaspathy und Rausch

7



## Anwendungsbereiche

- Qualitätssicherung im Gebäudebetrieb
- Optimierung der Anlagen und Gebäuden
- Überwachung individueller Energieverbräuche



16.04.2014 Von Wayaspathy und Rausch 9

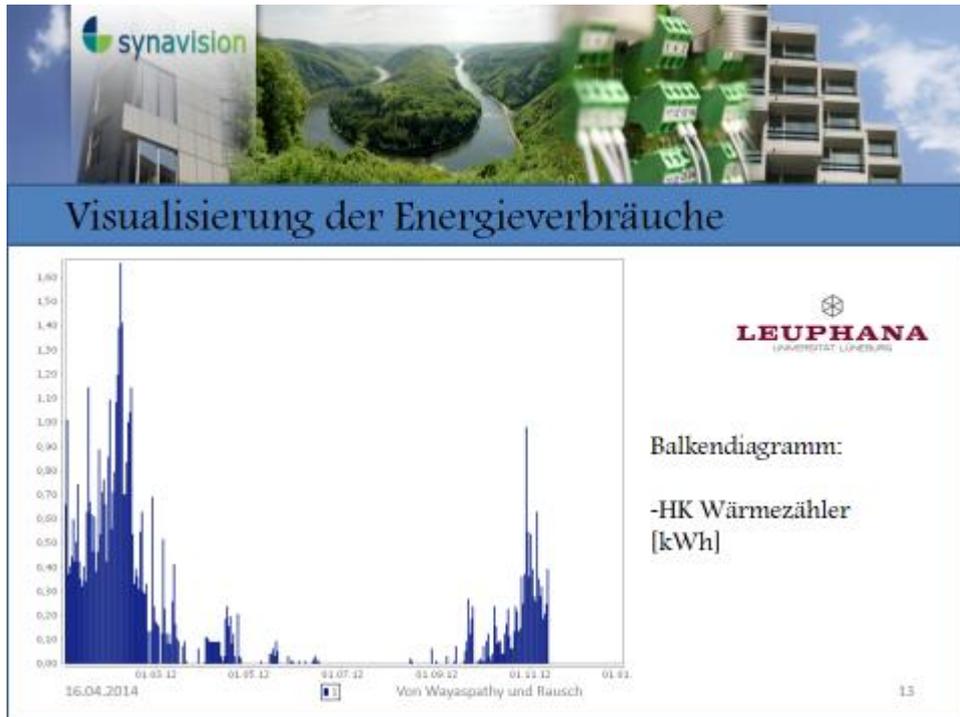


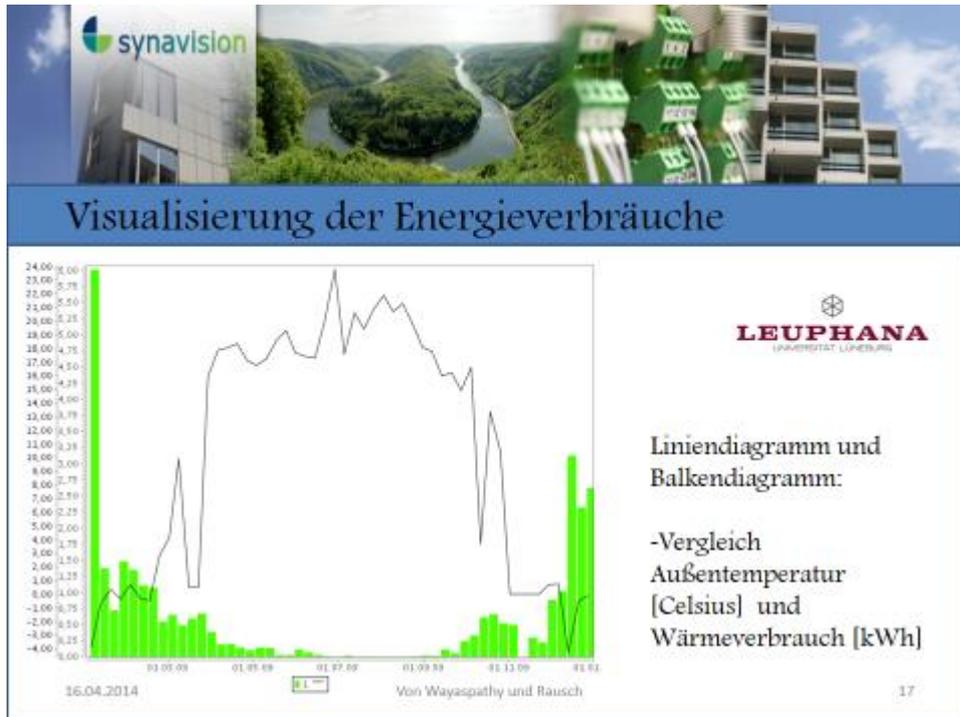
## Aufbereitung unserer Messdaten

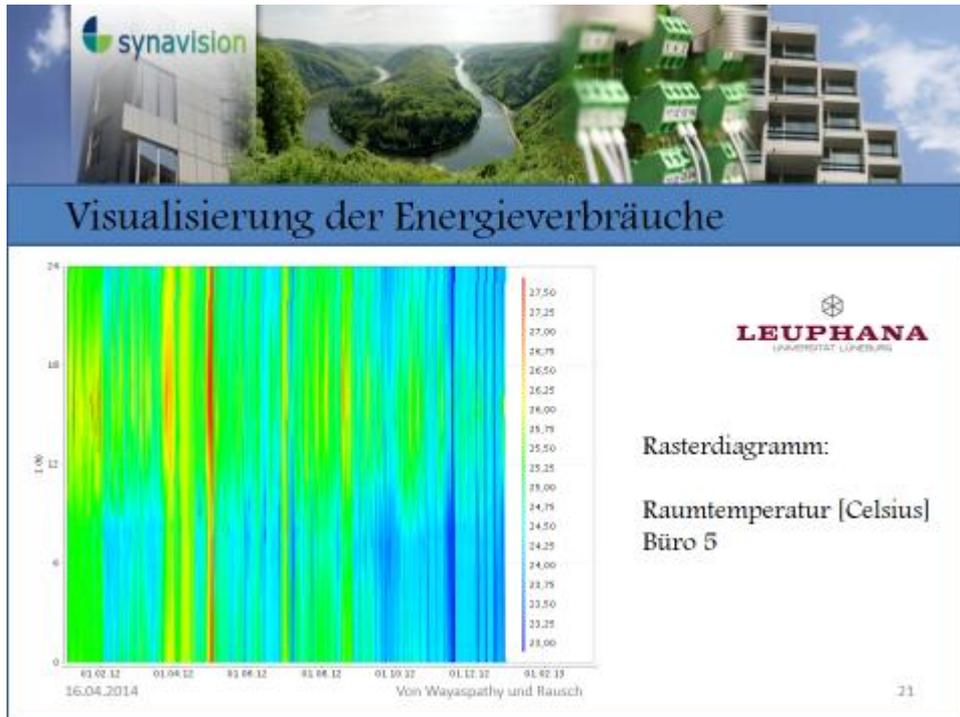
- Messdaten von der TU Braunschweig
- Erhobene Messdaten:
  - Raumfeuchte
  - Raumtemperatur
  - Allgemeine Heizkosten
- Messzeitraum: 1. Jahr



16.04.2014 Von Wayaspathy und Rausch 11








## Einzelraumregelung im Zentralgebäude

Verbaut sind:

- Präsenzmelder/Präsenztaster
- Temperatursensoren
- Lichtstärke
- CO<sub>2</sub> Sensor
- Fensterkontakt
- Stromverbrauchszähler
- Stellventil Heizkörper
- VOC Sensor (Volatile Organic Compounds)

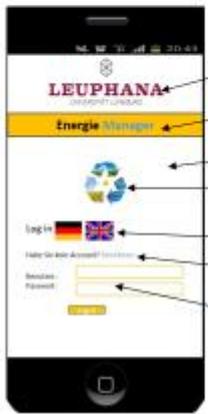


16.04.2014
Von Wayaspathy und Rausch
23



**synavision**

## Beispiel für App Design/Visualisierung



- Leuphana Logo
- App Name
- Hintergrund beliebig gestaltbar
- Bild/Logo für App
- Sprache Auswahl
- Benutzer-Account Einrichten
- Log in Feld zum Anmelden

16.04.2014 Von Wayaspathy und Rausch 25



**synavision**

## Beispiel für App Design/Visualisierung



- Benutzername/Büroraumnr.
- Profilanzeige/änderung
- Datum/Uhrzeit
- Diverse Verbräuche anzeigen lassen mit OK Taste
- Ggf. CO<sub>2</sub> Taste mit Rot/Grün
- Raumkomfort anpassen mit Ok Taste
- Diverse Icons für Einstellungen /Chat/Notizen/Sprache/Abmeldung

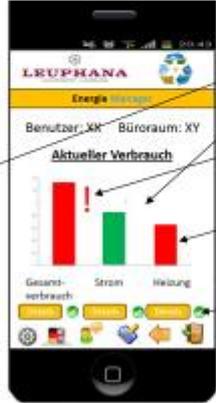
16.04.2014 Von Wayaspathy und Rausch 27



### Beispiel für App Design/Visualisierung



16.04.2014



Von Waysspathy und Rausch

Aktueller Verbrauch angezeigt in einem Diagramm

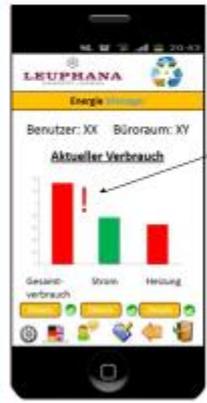
Ausrufezeichen als Gefahrenzeichen

Verschiedene Farben zur Signalisierung

Details um einzelne Verbräuche für die jeweiligen Variablen anzeigen zu können



### Beispiel für App Design/Visualisierung



16.04.2014

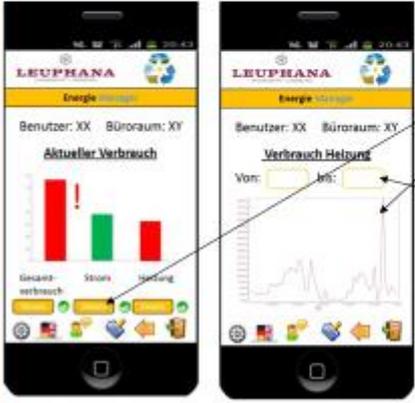


Von Waysspathy und Rausch

Klickt man auf das Ausrufezeichen, werden die möglichen Ursachen für die Alarmierung angezeigt



### Beispiel für App Design/Visualisierung



Klickt man auf Details, werden Diagramme für die Variablen anzeigt

Zusätzlich kann der Zeitraum gewählt werden

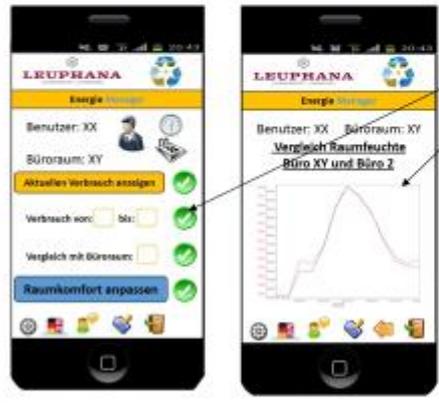
16.04.2014

Von Waysspathy und Rausch

33



### Beispiel für App Design/Visualisierung



Klickt man auf Vergleich, kann der Verbrauch von 2 Büros dargestellt werden

16.04.2014

Von Waysspathy und Rausch

35



### Beispiel für App Design/Visualisierung



Hier können Verhaltensweisen und Präferenzen der Nutzer\*innen eingestellt werden

Zufriedenheitsskala von -3 bis +3

16.04.2014

Von Wayaspathy und Rausch

37



### Grenzen von Synavision

- Keine Achsenbeschriftungen möglich
- Farbwechsel bei Erreichung einer bestimmten Menge nicht möglich

16.04.2014

Von Wayaspathy und Rausch

39



## Quellenverzeichnis

- [www.Synavision.de](http://www.Synavision.de)
- [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a3/Handshake\\_\(Workshop\\_Cologne\\_%2706\).jpeg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a3/Handshake_(Workshop_Cologne_%2706).jpeg)(23.02.14).
- <http://www.moebus-umweltschutz.de/wp-content/bilder/messdaten.jpg>(23.02.14).
- [http://www.sergio-soft.com/image/cache\\_2423335357.png](http://www.sergio-soft.com/image/cache_2423335357.png)(23.02.14).
- <http://www.taz.de/uploads/images/684x342/leuphana.jpg>(23.02.14)

16.04.2014

Von Wayaspathy und Bausch

41



Wir bedanken uns bei Ihnen für die gute  
Zusammenarbeit und Ihre freundliche  
Unterstützung!



16.04.2014

Von Wayaspathy und Bausch

43

**ABGRENZUNG DER ZU BEARBEITENDEN AUFGABEN**

<b>1. ABSTRACT .....</b>	<b>WAYASPATHY</b>
<b>2. EINLEITUNG .....</b>	<b>WAYASPATHY</b>
2.1 MOTIVATION UND ZIELSETZUNG .....	WAYASPATHY
2.2 AUFBAU UND VORGEHENSWEISE .....	WAYASPATHY
<b>3. GRUNDLAGEN UND STAND DER FORSCHUNG .....</b>	<b>WAYASPATHY</b>
3.1 ENERGIEMONITORING .....	WAYASPATHY
3.1.1 Begriffserklärung .....	Wayaspathy
3.1.2 Aufbau eines Energiemonitoringsystem .....	Wayaspathy
3.1.3 Sensoren .....	Wayaspathy
3.1.4 Einsparpotenziale .....	Wayaspathy
3.1.5 Anbindung an das AmI .....	Rausch
3.2 AMBIENT INTELLIGENCE .....	WAYASPATHY
3.2.1 Begriffserklärung .....	Wayaspathy
3.2.2 Aufbau eines Ambient Intelligence System .....	Wayaspathy
3.2.3 Einzelraumregelung .....	Wayaspathy
3.2.4 Anwendungsbereiche des AmI .....	Wayaspathy
3.2.5 Vision und Anforderungen an das Ambient Intelligence System .....	Wayaspathy
3.2.6 Recht und Privatsphäre .....	Wayaspathy
<b>4. NUTZERINTERAKTION DURCH AMBIENT INTELLIGENCE SYSTEM .....</b>	<b>RAUSCH</b>
4.1 EINBINDUNG DER NUTZER .....	RAUSCH
4.2 METHODEN UND MAßNAHMEN .....	RAUSCH
4.2.1 Handlungsaktivierende Maßnahmen und handlungsunterstützende Maßnahmen .....	Rausch
4.3 FEEDBACKSYSTEM .....	RAUSCH
4.4 VISUALISIERUNG .....	RAUSCH
<b>5 SYNAVISION .....</b>	<b>RAUSCH</b>
5.1 WAS IST SYNAVISION? .....	RAUSCH
5.2 WIE FUNKTIONIERT SYNAVISION PLOT PILOT .....	WAYASPATHY
5.3 ANWENDUNGSBEREICHE .....	WAYASPATHY
5.4 AUFBEREITUNG DER MESSDATEN .....	WAYASPATHY
5.5 VISUALISIERUNG DES ENERGIEVERBRAUCHS .....	RAUSCH
5.6 GRENZEN VON SYNAVISION .....	RAUSCH
5.7 BEWERTUNG .....	RAUSCH
<b>6. BETRIEBSOPTIMIERUNG .....</b>	<b>RAUSCH</b>
6.1 APP ZUR OPTIMIERUNG DER NUTZERINTERAKTION DURCH DAS AMI .....	WAYASPATHY
<b>7. ZUSAMMENFASSUNG/FAZIT .....</b>	<b>RAUSCH</b>
<b>8. Ausblick .....</b>	Rausch



## **Zentrales Prüfungsamt**

### **Eidesstaatliche Erklärung**

Ich versichere, dass ich diese Arbeit – bei einer Gruppenarbeit den entsprechend gekennzeichneten Teil der Arbeit – selbständig verfasst und keine andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Ich versichere alle Stellen der Arbeit, die wortwörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommen wurden, als solche kenntlich gemacht und die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegt zu haben.

Lüneburg, den \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(Vigithan Wayaspathy)

\_\_\_\_\_  
(David Rausch)



**LEUPHANA**  
UNIVERSITÄT LÜNEBURG

**Wahrscheinlichkeitsbasierte Energiesystem-  
und Wirtschaftlichkeitsanalyse eines  
Energieverbundsystems unter Einbindung  
eines Aquiferwärmespeichers**

**Verbesserung der Investitionsplanung durch Erhöhung der  
Prognosefähigkeit und Prognosegenauigkeit**

Von der Fakultät Nachhaltigkeit der Leuphana Universität zur Erlangung der  
Würde eines Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.) genehmigte  
Abhandlung

**Nikolai Strodel, geb. am 07.02.1986 in Lindau (B.)**

Betreuer und Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang K. L. Ruck

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Niemeyer

Gutachter: Prof. Dr. rer. pol. Heinrich Degenhart

Tag der Disputation: 08.08.2018



# Vorwort

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Leuphana Universität Lüneburg im Bereich der *Nachhaltigkeitsforschung Energie*.

Zunächst möchte ich mich herzlichst bei Professor Wolfgang Ruck bedanken. Ohne ihn wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen, genauer gesagt erst gar nicht entstanden. Herr Ruck, Ihr Charakter in Zusammenhang mit einem großen Vertrauen in meine Eigeninitiative, der Bereitstellung sämtlicher Mittel und das zum Promotionsvorhaben passende Projekt trugen dazu bei, dass diese Arbeit entstehen konnte. Ein aufrichtiges Dankeschön dafür, dass Sie diese Promotion ermöglicht und begleitet haben!

Bei meinem ehemaligen Arbeitsgruppenleiter, Professor Oliver Opel, bedanke ich mich für die inhaltliche und persönlich-freundschaftliche Begleitung während der Promotion sowie für die vielen Freiheiten, die mir innerhalb des Projektes gewährt wurden.

Weiterhin möchte ich mich bei Professor Bernd Niemeyer und Professor Heinrich Degenhart für die Übernahme des Zweit- und Drittgutachtens bedanken.

Professor Tobias Koch möchte ich für die Einbringung seiner Expertise und die Hilfestellung im Bereich der quantitativen Methoden danken. Professor Thomas Osterland danke ich für die persönlichen Gespräche im Vorfeld der Promotion. Stefan Kranz vom Deutschen GeoForschungsZentrum in Potsdam danke ich für die Bereitstellung seines Basis-Modells sowie die fachliche Unterstützung und Beratung aus praktischer Perspektive während des gesamten Promotionsvorhabens.

An dieser Stelle möchte ich allen Danke sagen, die auf ganz unterschiedliche Art und Weise dazu beigetragen haben, dass diese Promotion so verlaufen konnte, wie sie verlief. Ein persönliches Dankeschön an meine Freundin Lisa, an meine Familie und an meine Freunde, die durch hilfreiche Gespräche positiv auf mich einwirkten und mir Halt gaben.

# Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
abs	Absolutwert einer Größe
AfA	Absetzung für Abnutzung
ATES	Aquifer Thermal Energy Storage
BergG	Bundesberggesetz
BHKW	Blockheizkraftwerk
CDF	Cumulative Distribution Function
COP	Coefficient of Performance
CPC	Compound Parabolic Concentrator
DFL	Dynamic Fluid Level
ECES	Energy Conversion through Energy Storage
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EEWärmeG	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
EPEX	European Power Exchange
ESP	Electrical Submersible Pump
FMEA	Fehler-, Möglichkeits-, Einfluss-Analyse
HRF	Heat Recovery Factor
HT	Hochtemperatur
IAM	Incident Angle Modifier
IEA	Internationale Energie Agentur
JAZ	Jahresarbeitszahl
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
KWKK	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung
LCOE	Levelized Cost of Energy

LCOH	Levelized Cost of Heat
LK	Leistungsklasse
LPG	Lastprofilgenerator
LSP	Lineshaft Pump
max	maximal
MCMC	Markov Chain Monte Carlo
min	minimal
MLE	Maximum Likelihood Estimator
MSR	Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik
NT	Niedertemperatur
peb	Parameter Estimation Bias
pH	potentia Hydrogenii
PLZST	Pufferladezustand
RW	Restwert
SAZ	Systemarbeitszahl
SCC	Storage Capacity Costs
SD	Standard Deviation
seb	Standard Error Bias
SF	Saisonalitätsfaktor
SFL	Static Fluid Level
SWOT	Strength Weakness Opportunities Threats (-Analysis)
TDH	Total Dynamic Height
TRNSYS	Transient System Simulation
TRY	Test Reference Year
ÜS	Übergabestation
VAR	Varianz
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WuI	Wartung und Instandhaltung
WVR	Wärmeverlustrate

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1.	Die Entwicklung von netzgebundenen Wärmesystemen über vier Generationen, eigene Darstellung, zusammengetragen aus [1–4] . . . . .	8
Abb. 2.2.	Erhöhung der Prognosegenauigkeit . . . . .	16
Abb. 3.1.	Porositäts- und Permeabilitätswerte von 4380 Datenpaaren aus der Box 1 (links) aus dem Verbreitungsgebiet des Valangin (rechts) in logarithmischer Darstellung. Das rote Kreuz stellt die Mittelwerte aller Porositäts- und Permeabilitätsdaten mit Standardabweichung dar, die lila Box symbolisiert den Bereich, in dem die Mindest-randbedingungen erfüllt sind. Entnommen und aufbereitet aus [5] . . . . .	19
Abb. 3.2.	Prinzipskizze und Druckverhältnisse am Beispiel einer <i>Electrical Submersible Pump</i> mit Bohrlochperipherie, eigene Darstellung in Anlehnung an [6] . . . . .	28
Abb. 3.3.	Pumpenleistung in Abhängigkeit des geförderten Volumenstromes für verschiedene Produktivitäten, entnommen aus [6] . . . . .	30
Abb. 3.4.	Übersicht von möglichen Konfigurationen der Wärmespeicherung zwischen Wärmeerzeugern und Wärmeverbrauchern . . . . .	31
Abb. 3.5.	Zusammenhang zwischen Pumpenleistung und Transmissivität für Volumenströme von $0,01 - 0,08 \frac{m^3}{s}$ , entnommen aus [7] . . . . .	35
Abb. 3.6.	Überblick über die relevanten Rechtsfragen auf verschiedenen rechtlichen und zeitlichen Ebenen, eigene Darstellung, angelehnt an [8] . . . . .	36
Abb. 4.1.	Informationsstruktur eines Komponentenmodells (Type) in TRNSYS .	41
Abb. 4.2.	Modellierung eines Blockheizkraftwerkes mit Wärmeübertragungskaskade, Zieltemperaturregelung und Förderpumpe . . . . .	43

Abb. 4.3.	Aufbau und Funktionsweise des Knotenmodells des Pufferspeichers und Berechnung der Schichtung im Multiport-Modell ( <i>Type 340</i> ) . . .	45
Abb. 4.4.	Exemplarisches TRNAST-Gitternetz des Untergrundes zur Berechnung der Wärmespeicherung um ein in z-Richtung liegenden Injektionsstrang mit drei überlagernden Schichten der Gesamt-Mächtigkeit $D$ und zwei den Aquifer unterlagernden Schichten. Der Mittelpunkt der Bohrung und die Radialsymmetrie sind durch die gestrichelte Linie parallel zur z-Achse angedeutet. . . . .	47
Abb. 4.5.	Modellierung eines Abnehmersystems mit Netzpumpen, Übergabestation und Wärmetrasse . . . . .	52
Abb. 4.6.	Petri-Netzstruktur der regelungstechnischen Folgeschaltung der Wärmeerzeuger mit beispielhaften Regelhysteresen in den Wintermonaten	56
Abb. 4.7.	Verlauf der Temperaturführungsgrößen über das Jahr in einer exemplarischen Simulation der Bestandsanlage . . . . .	57
Abb. 4.8.	Prinzipschema des obertägigen Thermalwasserkreislaufes im Sommerbetrieb (links) und im Winterbetrieb (rechts) mit Druckhaltung, Schutzgasbeaufschlagung und Filterstrecken, entnommen aus [9] . . .	58
Abb. 4.9.	Hydraulische Einbindung des Aquiferwärmespeichers während der Beladung (links) und Entladung (rechts) . . . . .	61
Abb. 4.10.	Jährlicher Verlauf der HT-Speichertemperaturen ( $100\text{ m}^3$ ) exemplarisch für eine Simulation des Gesamtsystems ohne Solarthermie im 1. Simulationsjahr . . . . .	62
Abb. 4.11.	Jährlicher Verlauf der NT-Speichertemperaturen ( $50\text{ m}^3$ ) über das Jahr exemplarisch für eine Simulation des Gesamtsystems ohne Solarthermie im 1. Simulationsjahr . . . . .	63
Abb. 4.12.	Regelungstechnische Einbindung des Aquiferwärmespeichers in der Simulationsumgebung . . . . .	64
Abb. 4.13.	Beispielbild . . . . .	68
Abb. 4.14.	Regelungstechnische Einbindung der Solarthermie in der Simulationsumgebung . . . . .	69
Abb. 4.15.	In TRNSYS simulierte spezifische Kollektorerträge von drei unterschiedlichen Kollektortypen in einer Systemsimulation mit $2000\text{ m}^2$ Kollektoraperturfläche mit Glykol als Wärmeträgermedium . . . . .	71

Abb. 4.16.	Einfluss der regelungstechnischen Vorgabe der Einspeicherdauer auf die Speichereffizienz für das Gesamtsystem ohne (links) und mit Solarthermie (rechts) . . . . .	73
Abb. 4.17.	Einfluss der Einspeichertemperaturen auf die Speichereffizienz des Aquifers ausgewertet für das 10. Simulationsjahr . . . . .	78
Abb. 4.18.	Einfluss der Rücklauftemperaturen des Low-Ex-Netzes auf die Speichereffizienz des Aquifers ausgewertet für das 10. Simulationsjahr . . . . .	79
Abb. 4.19.	Einfluss des Speichervolumens und des Schichtungsvermögens des Hochtemperatur-Pufferspeichers auf die Speichereffizienz des Aquifers . . . . .	82
Abb. 4.20.	Solarthermische Erträge aus den Kollektoren (Arcon Sunmark) für unterschiedliche Kollektorfeldgrößen [Bezugsfläche: Aperturfläche] . . . . .	85
Abb. 5.1.	Aufbau des Lastprofilgenerators . . . . .	89
Abb. 5.2.	Korrelation zwischen Wärmeleistung und Außentemperatur, dargestellt für das Wärmenetz <i>Campus</i> mit einer polynomischen Ausgleichsfunktion 6. Grades und dem Konfidenzintervall von 95 % . . . . .	95
Abb. 5.3.	Korrelation zwischen Wärmeleistung und Außentemperatur, dargestellt für das Wärmenetz <i>Bockelsberg</i> mit einer polynomischen Ausgleichsfunktion 5. Grades und dem Konfidenzintervall von 95 % . . . . .	97
Abb. 5.4.	Vergleich der gemessenen Vorlauftemperatur in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur mit der Heiznetzkurve für die Berechnung der Vorlauftemperatur . . . . .	100
Abb. 5.5.	Vergleich der kumulierten Wahrscheinlichkeitsverteilung (a) und absolute Häufigkeit der Temperaturen (b) zwischen den Messdaten und einer synthetischen Temperaturreihe . . . . .	105
Abb. 5.6.	Vergleich der historischen Daten mit einer synthetisch erstellten Temperaturreihe über 12 Jahre unter Verwendung eines Saisonalitätsfaktors von $SF = 1$ . . . . .	108
Abb. 5.7.	Vergleich der historischen Daten mit einer synthetisch erstellten Temperaturreihe über 12 Jahre unter Verwendung eines Saisonalitätsfaktors von $SF = 4$ . . . . .	109
Abb. 5.8.	Vergleich der historischen Daten mit einer synthetisch erstellten Temperaturreihe über 12 Jahre unter Verwendung eines Saisonalitätsfaktors von $SF = 12$ . . . . .	110

Abb. 5.9.	Vergleich der historischen Daten mit einer synthetisch erstellten Temperaturreihe über 12 Jahre unter Verwendung eines Saisonalitätsfaktors von $SF = 52$ . . . . .	111
Abb. 5.10.	Vergleich der Standardabweichung der Messdaten mit einer synthetisch erstellten Temperaturreihe über 12 Jahre unter Verwendung eines Saisonalitätsfaktors von $SF = 12$ . . . . .	112
Abb. 5.11.	Vergleich der geordneten Jahresdauerlinien von 2012 mit den über die Ausgleichsfunktionen erstellten Jahresdauerlinien für die beiden Teilnetze . . . . .	114
Abb. 5.12.	Vergleich des Temperaturverlaufs unter Verwendung von jährlich gleichen Lastprofilen (a) und unter Verwendung von jährlich variierenden Profilen (b) . . . . .	118
Abb. 5.13.	Vergleich der Speichereffizienz unter Verwendung von jährlich gleichen Lastprofilen (a) und unter Verwendung von jährlich variierenden Profilen (b) . . . . .	121
Abb. 6.1.	Methodik und Parameter der ganzheitlichen Energiesystem- und Wirtschaftlichkeitsanalyse in TRNSYS . . . . .	141
Abb. 6.2.	Konzeptspezifische Verteilung der Kapitalwerte in Abhängigkeit des Kalkulationszinssatzes . . . . .	147
Abb. 6.3.	Konzeptspezifische Verteilung der spezifischen Speicherkosten in Abhängigkeit des Kalkulationszinssatzes . . . . .	149
Abb. 6.4.	Konzeptspezifische Sensitivität der Gaspreise auf die Wirtschaftlichkeit	158
Abb. 6.5.	Konzeptspezifische Sensitivität der Einspeisevergütung auf die Wirtschaftlichkeit . . . . .	160
Abb. A.1.	Übersicht von sensiblen thermischen Saisonal Speichern, entnommen aus [10] . . . . .	195
Abb. A.2.	Beschreibung einer <i>Line Shaft Pump</i> (LSP) mit geschlossener, öl-geschmierter Welle, entnommen aus [11] . . . . .	197
Abb. A.3.	Beschreibung einer <i>Electrical Submersible Pump</i> (ESP) mit elektrischem Versorgungskabel, entnommen aus [11] . . . . .	198
Abb. A.4.	Informationsstruktur des TRNAST-Modells . . . . .	199

Abb. A.5. Elektrischer und thermischer Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Brennstoffzufuhr . . . . .	199
Abb. A.6. Einfluss der Wärmeleistung der BHKW-Module auf die Be- und Entlademenge, den KWK-Deckungsanteil an der Wärmeversorgung sowie auf die Speichereffizienz (Verhältnis von Entladung zu Beladung), graphische Aufbereitung der Tabelle 4.5 . . . . .	200
Abb. A.7. Einfluss der Einspeicherdauer auf das Energiesystem . . . . .	201
Abb. A.8. Spezifischer Leistungsverlauf von drei Hochleistungs-Kollektoren für steigende Temperaturdifferenzen bei einer konstanten Globalstrahlung von $1000 \frac{W}{m^2}$ , zusammengetragen aus den jeweiligen Kollektorzertifikaten des Solar Keymark: <a href="http://www.solarkeymark.dk/CollectorCertificates">http://www.solarkeymark.dk/CollectorCertificates</a> SP SC0842-14 (magenta), 011-7S1890 F (blau), 011-7S2425 R (schwarz)	202
Abb. A.9. Beurteilung der statistischen Güte des MCMC-Temperaturschätzers .	206
Abb. A.8. Verteilung der Kapitalwerte in Abhängigkeit des Kalkulationszinssatzes	213

# Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1. Kategorisierung von Aquiferspeichern in Anlehnung an [12] . . . . .	13
Tab. 3.1. Geohydraulische Mindestanforderungen an wichtige, die Wirtschaftlichkeit ermöglichende Parameter eines Poren-Aquifers zur Nutzung als saisonaler Wärmespeicher . . . . .	23
Tab. 4.1. Vergleich der Simulationsergebnisse unter Verwendung der verschiedenen Kollektormodelle für ein exemplarisches Gesamtsystem mit $2000\text{ m}^2$ Kollektorfläche ausgewertet für das 1. Simulationsjahr . . . . .	48
Tab. 4.2. Momentaufnahme einer exemplarischen Pufferladezustandsberechnung bei gleicher mittlerer Speichertemperatur in den Wintermonaten und in den Sommermonaten . . . . .	55
Tab. 4.3. Hydraulische Komponenten der Simulationsumgebung in Konzeptvariante I . . . . .	60
Tab. 4.4. Hydraulische Komponenten der Simulationsumgebung in Konzeptvariante II . . . . .	67
Tab. 4.5. Einfluss der BHKW-Erzeugerleistung auf die Effizienz des Aquiferwärmespeichers und den KWK-Deckungsanteil ausgewertet für das 10. Simulationsjahr . . . . .	81
Tab. 4.6. Einfluss der eingeregelter Kollektorzieltemperatur auf spezifische Kollektorkennzahlen [Bezug: Aperturfläche] und auf das Effizienzverhalten des Aquifers ausgewertet für das 10. Simulationsjahr . . . . .	84
Tab. 4.7. Einfluss der Kollektorfeldgröße auf spezifische Kollektorkennzahlen [Bezug: Aperturfläche] und auf das Effizienzverhalten des Aquifers ausgewertet für das 10. Simulationsjahr . . . . .	86

Tab. 5.1.	Auswertung der statistischen Kenngrößen für die Temperaturen von Lüneburg im Zeitraum zwischen 2004 und 2015 . . . . .	103
Tab. 5.2.	Validierung der synthetischen Temperaturreihen und Einfluss der Anzahl an Simulationsjahren und Einfluss der Zeitschrittweite auf den jährlichen <i>parameter estimation bias</i> und den <i>standard error bias</i> . . . . .	107
Tab. 5.3.	Vergleich der Lastprofile aus dem Lastprofilgenerator mit den Wärmeverkaufszahlen des Energieversorgers . . . . .	113
Tab. 6.1.	Energetische Auswertung der Simulation der Bestandsanlage unter Verwendung der Lastprofile der Machbarkeitsstudie [9] . . . . .	124
Tab. 6.2.	Energetische Auswertung der Simulation des Gesamtsystems mit Aquifer unter Verwendung der Lastprofile der Machbarkeitsstudie [9] . . . . .	125
Tab. 6.3.	Energetische Auswertung der Simulation des Gesamtsystems mit Aquifer und 2000 m <sup>2</sup> Flachkollektoren unter Verwendung der Lastprofile der Machbarkeitsstudie . . . . .	127
Tab. 6.4.	Kostenstruktur und Zusammenfassung der Investitionen: Die Aufschlüsselung der Investitionen in Ausrüstungskategorien entstammt der Machbarkeitsstudie [9], die Rechsätze für Wartung ( $f_W$ ) und Instandhaltung ( $f_I$ ) orientieren sich an der VDI 2067 [13]. . . . .	131
Tab. 6.5.	Referenzenergiepreise (exklusive Mehrwertsteuer) für die Untersuchung des Einflusses des Kalkulationszinssatzes und die Berechnung der aggregierten Losgrößen [9, 14–20] . . . . .	135
Tab. 6.6.	Exemplarische Punktprognose einer Energiesystem- und Wirtschaftlichkeitsanalyse unter Verwendung von zwei Standardlastprofilen aus der Machbarkeitsstudie [9] für einen Kalkulationszinssatz von $i_K = 2\%$ . . . . .	142
Tab. 6.7.	Bandbreite der Simulationsergebnisse für verschiedene Auswertungsgrößen für den Kalkulationszins $i_K = 2\%$ . . . . .	144
Tab. 6.8.	Nachweis der Normalverteilung der Kapitalwerte für ein Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ in Abhängigkeit des Kalkulationszinssatzes . . . . .	152
Tab. A.1.	Relevante <i>Scaling</i> und Korrosion verursachende Fluideigenschaften und Parameter, entnommen aus [6] . . . . .	196

Tab. A.2. Thermische und elektrische Leistungen der BHKW-Module für die Simulationsstudie im Nennlastpunkt (100 % Brennstoffzufuhr) und in Summe installierte Leistung beider Module . . . . .	200
Tab. A.3. Monatsgemittelte Temperaturen der Messstation Wendisch-Evern (Stations-ID 6093) im Zeitraum zwischen 2004 und 2015 in Grad Celsius, aufbereitete Darstellung getrennt nach Monaten und Jahren . . . . .	203
Tab. A.4. Monatsgemittelte Standardabweichung der Temperaturen der Messstation Wendisch-Evern (Stations ID 6093) im Zeitraum zwischen 2004 und 2015, aufbereitete Darstellung getrennt nach Monaten und Jahren . . . . .	204
Tab. A.5. Prozentualer Standardfehler der Temperaturen der Messstation Wendisch-Evern (Stations ID 6093) im Zeitraum zwischen 2004 und 2015, aufbereitete Darstellung getrennt nach Monaten und Jahren . . . . .	205
Tab. A.6. Berechnete Zahlungsströme für das Anlagenkonzept I (mit Aquifer) in Euro: Kalkulationszins $i_K = 2\%$ , Standardlastprofil aus der Machbarkeitsstudie [9], Referenzenergiepreise aus Tabelle 6.5 . . . . .	207
Tab. A.7. Berechnete Zahlungsströme für das Anlagenkonzept II (mit Aquifer und Solarthermie) in Euro: Kalkulationszins $i_K = 2\%$ , Standardlastprofil aus der Machbarkeitsstudie [9], Referenzenergiepreise aus Tabelle 6.5, 2000 $m^2$ Flachkollektoren, spez. Investitionskosten Solarthermie $332 \frac{\text{€}}{m^2_{AP}}$ . . . . .	208
Tab. A.8. Aggregierte Zahlungsströme für das wahrscheinlichste Eintrittsszenario des Anlagenkonzeptes I (mit Aquifer) in Euro: Kalkulationszins $i_K = 2\%$ , Referenzenergiepreise aus Tabelle 6.5 . . . . .	209
Tab. A.9. Aggregierte Zahlungsströme für das wahrscheinlichste Eintrittsszenario des Anlagenkonzeptes II (mit Aquifer und Solarthermie) in Euro: Kalkulationszins $i_K = 2\%$ , Referenzenergiepreise aus Tabelle 6.5, 2000 $m^2$ Flachkollektoren, spez. Investitionskosten Solarthermie $332 \frac{\text{€}}{m^2_{AP}}$ . . . . .	210

# Nomenklatur

## Lateinische Buchstaben

Symbol	Bedeutung	Einheit
$a$	Jahr	[-]
$a$	Losgröße der zusätzlichen Stromeinspeisung	[MWh]
$a_D$	Abstand der Bohrungen (Dublette)	m
$A$	Querschnittsfläche des porösen Körpers	$m^2$
$A_a$	Summe der Auszahlungen in Periode a	[€]
$A_B$	Bruttofläche des Kollektors (Außenmaße)	$m^2$
$A_{n,1-\alpha}^2$	Teststatistik des Anderson-Darling-Tests	[-]
$A^*$	Modifikation der Teststatistik $A_{n,1-\alpha}^2$	[-]
$B_a$	Barwert des Betrachtungsjahres a	
$B$	Bestimmtheitsmaß	[-]
$b$	Losgröße des vermiedenen Erdgasbezugs	[MWh]
$b_1 \dots b_7$	Polynomkoeffizienten	[-]
$\cos(\phi)$	Wirkleistungsanteil	
$c$	Losgröße des zusätzlichen Biogasverbrauchs	[MWh]
$c_A$	Kompressibilität des Aquifers	$[\frac{m^2}{N}]$
$c_f$	Kompressibilität des Fluides	$[\frac{m^2}{N}]$
$c_p$	spezifische isobare Wärmekapazität	$\frac{kJ}{kg \cdot K}$
$c_{IR}$	Kollektor	
$C_{eff,col}$	effektive Wärmekapazität des Solarkollektors	$\frac{kJ}{kg \cdot K}$
$C_0$	Kapitalwert einer Investition	[€]
$D$	Durchmesser	m
$EE$	Endenergie	[MWh]
$eH$	Redoxpotential	[V]

$E$	Globalstrahlung der Hemisphäre	W
$E_a$	Summe der Einzahlungen in Periode a	[€]
$f_D$	Rohrreibungszahl nach Darcy	[-]
$f_{EM}$	Spezifischer Emissionsfaktor	$[\frac{g}{kWh}]$
$f_I$	Aufwandsfaktor für die Instandhaltung	[%]
$f_P$	Primärenergiefaktor eines Versorgungssystems	[-]
$f_{P,cr}$	Primärenergiefaktor eines Energieträgers cr	[-]
$f_W$	Aufwandsfaktor für die Wartung	[%]
$F'$	Faktor Kollektor	[-]
$F(r)$	Faktor zur Bestimmung der Anzahl an Monte-Carlo-Replikaten	[-]
$F_n(X)$	Stichprobe zur Bestimmung der Normalverteilung	[-]
$F_X(x; \theta)$	Hypothetische Normalverteilungsfunktion	[-]
$g$	Gravitationskonstante (Erdbeschleunigung)	$\frac{m}{s^2}$
$g_{cr}$	Mengenanteil eines Energieträgers cr an der bereitgestellten Endenergie	[-]
$G_b$	auf Anstellfläche treffende Direktstrahlung	W
$G_d$	auf Anstellfläche treffende Diffusstrahlung	W
$G_g$	auf Anstellfläche treffende reflektierte Strahlung	W
$H$	Höhe	m
$H_0$	Nullhypothese	[-]
$H_A$	Alternativhypothese	[-]
$H_F$	Verlust-Höhe	m
$H_{WH}$	Bohrkopf-Druckhöhe	m
$i$	Zustand in der Übergangsmatrix	[-]
$i_K$	Kalkulationszinssatz	[%]
$i_{st}$	Isotherme im Speicher (Knoten)	[-]
$I_0$	Investitionsausgabe zu Beginn der Betrachtung	[€]
$I_1 \dots I_y$	Eingangsgrößen einer Modellkomponente	[divers]
$I_b$	Direktstrahlung	W
$I_d$	Diffusstrahlung	W
$I_g$	reflektierte Strahlung	W
$j$	Zustand in der Übergangsmatrix	[-]

$k_f$	hydraulische Leitfähigkeit	$\frac{m}{s}$
$K$	Permeabilität	mD
$L$	durchströmte Länge des porösen Mediums	m
$LE$	Liquiditätserlös	[€]
$\dot{m}$	Massenstrom	$\frac{kg}{h}$
$M$	Mächtigkeit des Speicherhorizontes	m
$n$	Anzahl an Monte-Carlo-Replikationen	[-]
$N$	Dimension des Zustandsraums	[-]
$O_1...O_z$	Ausgangsgrößen einer Modellkomponente	[divers]
$p$	Signifikanzwert	[-]
$P$	Übergangsmatrix	[-]
$P_w$	hydrothermale Brunnenleistung	kW
$P_p$	elektrische Leistung der Tiefenpumpe	kW
$P_1...P_x$	Parameter einer Modellkomponente	[divers]
$p_{WH}$	Brunnenkopfdruck	bar, MPa
$p_r$	statischer Reservoirdruck	bar, MPa
$p_{w,f}$	dynamischer Brunnendruck	bar, MPa
$\Delta p$	Druckdifferenz	bar, MPa
$p_{ij}$	Übergangswahrscheinlichkeit des Matrixelementes der Zeile i und Spalte j	[-]
$p_{ijs}$	Übergangswahrscheinlichkeit des Matrixelementes der Zeile i und der Spalte j in der Sequenz s	[-]
$p_1...p_7$	Polynomkoeffizienten	[-]
$PI$	Produktivitätsindex	$\frac{m^3}{h \cdot MPa}$
$\hat{q}_{lat}$	latente Wärmeverluste/-gewinne des Kollektors	$\frac{W}{m^2}$
$Q$	Förderrate	$\frac{m^3}{h}$
$\dot{Q}$	Wärmeleistung	kW
$r_B$	Bohrlochradius	m
$r_f$	Sky Radiation Factor	[-]
$r_K$	Korrelationskoeffizient	[-]
$r_{LP}$	zeitliche Auflösung des Lastprofils	min
$R$	Reichweite des Absenktrichters	m
$s$	Sequenz	[-]

$s^2$	aus der Stichprobe geschätzte Standardabweichung	[-]
$S$	absorbierte Solarstrahlung	$\frac{W}{m^2}$
$SF$	Saisonalitätsfaktor	[-]
$t$	Zeitpunkt	[-]
$t_B$	thermische Durchbruchzeit	s
$T$	Transmissibilität	$\frac{m^2}{s}$
$T_B$	Betrachtungszeitraum	[Jahre]
$T_N$	rechnerische Nutzungsdauer für Abschreibung	[Jahre]
$v$	durchschnittliche Fluidgeschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
$v_w$	Windgeschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
$V$	Volumen	$m^3$
$W$	Arbeit	kWh
$x$	Zufallsvariable im Intervall zwischen 0 und 1	[-]
$\bar{x}$	Stichprobenmittelwert	[divers]
$X_t$	diskrete Zufallsgröße zum Zeitpunkt t	[-]
$Y$	Simulationsjahre	[-]

## Griechische Buchstaben

Symbol	Bedeutung	Einheit
$\alpha$	Signifikanzniveau	[-]
$\alpha_1$	linearer Korrekturfaktor	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
$\alpha_2$	quadratischer Korrekturfaktor	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
$\alpha_w$	windabhängiger Korrekturfaktor	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
$\alpha_r$	allgemeiner Korrekturfaktor	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
$\tau\alpha$	Korrekturprodukt des Absorbers	[-]
$\theta_p$	tatsächlicher Populationswert	[-]
$\theta$	Vektor mit Parametern zur Bestimmung der Verteilungsfunktion	[-]
$\hat{\theta}_p$	Anwendung eines Schätzers auf einen Parameter	[-]
$\hat{\theta}_{p,t}$	Parameterschätzung zum Zeitpunkt t	[-]
$\Omega$	Zustandsraum	[-]

$\rho$	Dichte des Fluides	$\frac{kg}{m^3}$
$\Pi$	Produktivitätsindex	$\frac{m^3}{h \cdot MPa}$
$\pi$	Kreiszahl	[-]
$\Phi$	Porosität	%
$\eta$	dynamische Viskosität	$Pa \cdot s$
$\eta_p$	(Gesamt-) Wirkungsgrad der Pumpe	[-]
$\sigma$	Standardabweichung	[-]
$\vartheta_m$	mittlere Temperatur des Fluides im Kollektor	$^{\circ}C$

## Indizes

Index	Bedeutung
add	additional
A	Aquifer
AP	Apertur
amb	Ambient
B	Brutto
BG	Biogas
BHKW	Blockheizkraftwerk
coll	Kollektor
cr	Energieträger (engl. energy carrier)
EE	Erneuerbare Energie
el	elektrisch
f	Fluid
F	Formationswasser
max	Maximum
mean	Durchschnitt
mess	Messwert
min	Minimum
N	Nutz
NG	Natural Gas
p	Parameter
P	Primär

PS	Pufferspeicher
rep	Replikation
RE	Renewable Electricity
RK	Rückkühlung
RL	Rücklauf
sol	solar
spez	spezifisch
sto	Storage
sub	subtractive
T	Temperatur
th	thermisch
VL	Vorlauf
w	well
we	water equivalent
WH	well head

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>i</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>i</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>iv</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>Symbole und Formelzeichen</b>	<b>xii</b>
<b>Kurzzusammenfassung und Abstract</b>	<b>xxii</b>
<b>1. Einführung</b>	<b>1</b>
1.1. Forschungshistorie und Einbettung in den Gesamtkontext . . . . .	2
1.2. Zielsetzung und Struktur der Arbeit . . . . .	3
<b>2. Stand des Wissens</b>	<b>5</b>
2.1. Netzgebundene Wärmesysteme und Quartierslösungen . . . . .	6
2.1.1. Historische Entwicklung von netzgebundenen Wärmesystemen .	6
2.1.2. Zukünftige Entwicklung von netzgebundenen Wärmesystemen .	7
2.2. Saisonale Wärmespeicher . . . . .	9
2.2.1. Behälter-Wärmespeicher . . . . .	9
2.2.2. Erdbecken-Wärmespeicher . . . . .	10
2.2.3. Erdsonden-Wärmespeicher . . . . .	11
2.2.4. Aquifer-Wärmespeicher . . . . .	11
2.3. Problematik der Investitionsplanung von ATEs-Systemen und Verbesserung der Prognosefähigkeit und -genauigkeit . . . . .	15

<b>3. Integrale Planungsaspekte für die Realisierung eines Aquiferwärmespeichers</b>	<b>17</b>
3.1. Geohydraulische und wasserchemische Dimension . . . . .	18
3.1.1. Geologische Formationen in Norddeutschland . . . . .	18
3.1.2. Geohydraulische Eigenschaften des Speicherhorizontes . . . . .	20
3.1.3. Veränderung der Hydrochemie im Formationswasser . . . . .	23
3.2. Technische Dimension . . . . .	25
3.2.1. Bohrtechnik und Geothermiepumpen . . . . .	26
3.2.2. Obertägige Anlagenstruktur und anlagenseitiger Technologieverbund . . . . .	31
3.3. Wirtschaftliche Dimension und Risikomanagement . . . . .	32
3.3.1. Risikomanagement . . . . .	33
3.3.2. Fündigkeits- und Querschnittsrisiken . . . . .	34
3.4. Rechtliche Dimension . . . . .	36
3.5. Gesellschaftliche Dimension . . . . .	38
<b>4. Modellierung und Aufbau einer Simulationsumgebung zur Durchführung von Energiesystemanalysen</b>	<b>39</b>
4.1. Aufbau der Simulationsumgebung in TRNSYS . . . . .	39
4.1.1. Beschreibung der Simulationssoftware . . . . .	40
4.1.2. Beschreibung des Modellaufbaus und der Anlagenkonzepte . . . . .	40
4.2. Modellierung der Systemkomponenten . . . . .	41
4.2.1. Blockheizkraftwerke . . . . .	42
4.2.2. Spitzenlastkessel . . . . .	44
4.2.3. Pufferspeicher (Multiport-Modell) . . . . .	44
4.2.4. Aquiferspeicher (TRNAST-Modell) . . . . .	46
4.2.5. Solarkollektoren . . . . .	48
4.2.6. Tiefenpumpen (Type 742) . . . . .	50
4.2.7. Erdvergrabene Wärmetrassen (Type 313) . . . . .	51
4.2.8. Wärmeübertrager mit Zieltemperaturregelung (Type 810) . . . . .	51
4.2.9. Abnehmersysteme . . . . .	52
4.2.10. Umwälzpumpen, Ventile und andere Hydraulikkomponenten . . . . .	53
4.3. Grundlegendes Regelungskonzept und Systemführung . . . . .	53
4.3.1. Speicherladezustand als Systemführungsgröße . . . . .	53
4.3.2. Folgeschaltung der Wärmeerzeuger . . . . .	55

4.4.	Hydraulische und regelungstechnische Erweiterung der Bestandsanlage	57
4.4.1.	Einbindung des Aquiferwärmespeichers . . . . .	58
4.4.2.	Einbindung der Solarthermie . . . . .	65
4.5.	Regelungstechnische Einflussgrößen auf die Speichereffizienz . . . . .	72
4.5.1.	Einfluss der Einspeicherdauer . . . . .	72
4.5.2.	Einfluss der regenerativen Erzeugerhierarchie auf die Speichereffizienz . . . . .	74
4.5.3.	Einfluss der Rückkühlhysterese auf die Speichereffizienz . . . . .	75
4.6.	Anlagentechnische Einflussgrößen auf die Speichereffizienz . . . . .	76
4.6.1.	Einfluss der Einspeichertemperatur . . . . .	76
4.6.2.	Einfluss der Rücklaufemperatur . . . . .	79
4.6.3.	Einfluss der Wärmeleistung der Blockheizkraftwerke . . . . .	80
4.6.4.	Einfluss des Pufferspeichervolumens und des Schichtungsvermögens	81
4.6.5.	Einfluss des Temperaturniveaus der Kollektoren . . . . .	83
4.6.6.	Einfluss der Kollektorfeldgröße . . . . .	85
<b>5.</b>	<b>Erhöhung der Prognosegenauigkeit durch die Entwicklung eines wahrscheinlichkeitsbasierten Lastprofilgenerators</b>	<b>88</b>
5.1.	Aufbau und Funktionsweise des Lastprofilgenerators . . . . .	89
5.1.1.	Datengrundlage und Datenaufbereitung . . . . .	90
5.1.2.	Markov-Chain-Monte-Carlo-Verfahren . . . . .	91
5.1.3.	Erstellung einer synthetischen Temperatur-Zeit-Reihe . . . . .	93
5.1.4.	Berechnung von Wärmelastprofilen . . . . .	93
5.2.	Validierung des Lastprofilgenerators . . . . .	101
5.2.1.	Statistische Kenngrößen zur Validierung der synthetischen Temperaturreihe . . . . .	101
5.2.2.	Wärmeverkaufszahlen und Jahresdauerlinie zur Validierung der generierten Lastprofile . . . . .	113
5.3.	Globale Parameter und Transformationsmöglichkeiten . . . . .	114
5.4.	Einfluss der Lastprofile auf das Langzeitverhalten des Aquiferwärmespeichers . . . . .	117

<b>6. Holistische Energiesystem- und Wirtschaftlichkeitsanalyse</b>	<b>122</b>
6.1. Energiesystemanalyse . . . . .	123
6.1.1. Energetische Bilanzierung der Bestandsanlage (Referenzanlage) .	123
6.1.2. Nahwärmesystem mit Aquifer (Konzept I) . . . . .	124
6.1.3. Nahwärmesystem mit Aquifer und Solarthermie (Konzept II) . .	126
6.1.4. Berechnung des Primärenergiefaktors und der Emissionsbilanz des Wärmeversorgungssystems . . . . .	128
6.2. Randbedingungen der Wirtschaftlichkeitsbewertung und Kostenpositionen	129
6.2.1. Investitions- und kapitalgebundene Kosten . . . . .	130
6.2.2. Verbrauchsgebundene Kosten und Erlöse . . . . .	134
6.2.3. Sonstige Kosten . . . . .	136
6.2.4. Berechnung der Zahlungsfolgen und Kennzahlen als Indikatoren der Wirtschaftlichkeit . . . . .	136
6.3. Implementierung der Zahlungsströme in TRNSYS - Vom Lastprofil zum Kapitalwert . . . . .	139
6.4. Wahrscheinlichkeitsbasierte Energiesystem- und Wirtschaftlichkeitsanalyse	143
6.4.1. Ergebnisse und Auswertung der Simulationsstudie . . . . .	144
6.4.2. Nachweis der Normalverteilung und Bestimmung der Verteilungs- funktion . . . . .	150
6.4.3. Aggregation und kritische Werte der Energiepreise . . . . .	154
6.5. Forschungsergebnisse aus energetischer und finanzieller Perspektive . .	161
<b>7. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>165</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>170</b>
<b>Anhang</b>	<b>194</b>
<b>A. Ergänzungen zu den Kapiteln</b>	<b>195</b>
A.1. Ergänzungen zu Kapitel 2 . . . . .	195
A.2. Ergänzungen zu Kapitel 3 . . . . .	195
A.3. Ergänzungen zu Kapitel 4 . . . . .	199
A.4. Ergänzungen zu Kapitel 5 . . . . .	203
A.5. Ergänzungen zu Kapitel 6 . . . . .	207

# Kurzzusammenfassung

Hochtemperatur-Aquiferwärmespeicher erleichtern Wärmesystemen durch eine saisonale Lastverschiebung die Erschließung und Integration von erneuerbaren Wärmequellen. Ein mittleres Temperaturniveau von  $> 50^{\circ}\text{C}$  ermöglicht zumeist eine direkte Entladung ohne einen anschließenden Temperaturhub über eine Wärmepumpe.

Aufgrund der thermischen Trägheit von ATES-Systemen ist die Berücksichtigung von Lastfalländerungen durch jährlich variierende Lastprofile besonders in der Einschwingphase sinnvoll. Da es bis zu 20 Jahre dauern kann, bis der Aquifer einen quasistationären Zustand erreicht, konnte in Langzeitstudien ein großer Einfluss von unterschiedlichen Lastprofilen auf energetische und finanzielle Simulationsergebnisse nachgewiesen werden.

Zur Verbesserung der Investitionsplanung wurde ein Verfahren entwickelt, das sowohl die Prognosefähigkeit als auch die Prognosegenauigkeit von Energiesystem- und Wirtschaftlichkeitsanalysen erhöht, indem über einen wahrscheinlichkeitsbasierten Ansatz (Monte-Carlo-Temperaturschätzung) Normalverteilungsfunktionen für gewünschte Auswertungsgrößen (z.B. Kapitalwert) abgeleitet werden können. Aus 2000 Simulationsjahren wurde über konzeptspezifische Verteilungsfunktionen der wahrscheinlichste Eintrittsfall abgeleitet und zu einem repräsentativen Szenario aggregiert. Das aggregierte Szenario mündet in ein konzeptspezifisches Gleichungssystem, das mit den Freiheitsgraden *Energiepreise*, *Kalkulationszinssatz* und *Förderanteil* gelöst wird.

Im Gegensatz zu der etablierten Methode, die Wirtschaftlichkeitsberechnung im Anschluss an eine energetische Systemsimulation anzuhängen, wurde in dieser Arbeit ein holistisches Modell in TRNSYS entwickelt, das für jeden Simulationszeitschritt simultan Energie- und Zahlungsströme berechnet. In dem Modell konnten Verbesserungen in der Prognosegenauigkeit um den Faktor 20 nachgewiesen werden. Mit dem neuen Verfahren kann die Frage der Wirtschaftlichkeit nicht nur mit ja oder nein beantwortet werden, sondern zusätzlich mit der jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeit belegt werden.

# Abstract

High-temperature aquifer thermal energy storage (ATES) enables district heating systems to exploit and integrate renewable heat sources by shifting the heat load seasonally. Due to an average temperature level above 50°C, no heat pump is required, but the stored heat can be directly used.

It is important to consider varying load profiles within a long period simulation as thermal inertia of HT-ATES leads to an oscillating behaviour of the system. It takes up to 20 years for the system to settle in a quasi-stationary state, even if the same load profile is used every year. This is why different load profiles have a major influence on energetic and financial simulation results.

To improve both, the ability and accuracy of energy and economic simulation analysis, a likelihood based procedure was developed. Using the Monte-Carlo method, temperatures and furthermore load profiles are estimated for every simulation time step. As a consequence, normal distribution functions can be derived from numerous simulations, e.g. for the net present value.

Having defined normal distribution functions out of 2000 simulation years, the results were aggregated to a scenario with the highest probability of occurrence. The Maximum Likelihood Estimation (MLE) is used to devise a system of equations, which is solved with 3 degrees of freedom: *energy prices*, *interest rate* and *share of funding*.

In contrast to the standard method of separating energetic from economic analysis, the author of this thesis developed a holistic model in TRNSYS, calculating energy and cash flows. Compared to the probability of occurrence calculated for scenarios using standard-load profiles with no statistical element, the probability of occurrence of scenarios calculated based on the Monte-Carlo method was up to 20 times higher. This is proof of a significant increase in forecasting ability. With this new procedure, energy-system and profitability analysis gains a new dimension: Instead of a point forecast, it delivers a distribution function including probability of occurrence.

# 1. Einführung

*global denken - lokal handeln*  
(Club of Rome)

Auf einem Planeten mit endlichen Ressourcen liegt es in der Natur der Sache, dass ein anthropologisches Wachstum begrenzt ist. Die Energiewandlung ist eine grundlegende Notwendigkeit menschlicher Existenz. Vor dem Hintergrund des Klimawandels, der zunehmenden globalen Bevölkerungsdichte und wachsenden Wohlstandsansprüchen, ist die nachhaltige Bereitstellung von Energie eine der größten zukünftigen Herausforderungen der Menschheit. Die heutigen Energiesysteme stehen vor einem Paradigmenwechsel. Systeme, die auf konstante Bereitstellung durch fossile Energieträger ausgerichtet sind, werden durch eine umfangreiche Integration erneuerbarer Energien eine nachhaltige Energieversorgung gewährleisten müssen.

Die Herausforderung des Systemwechsels macht sich gegenwärtig in der Stromversorgung am deutlichsten bemerkbar, obwohl mehr als die Hälfte des deutschen Endenergieverbrauchs auf Wärmeanwendungen zurückzuführen ist [21]. Extrapoliert man die Verbrauchsentwicklungen elektrischer Energie in die Zukunft, können die anvisierten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2050 nur dann erreicht werden, wenn neben der im Fokus befindlichen Stromversorgung auch die Wärmeversorgung entsprechend dekarbonisiert wird [22–25]. Der notwendige energetische Paradigmenwechsel aus dem Zeitalter der fossilen Energieträger zur nachhaltigen und regenerativen Energieversorgung ist weitestgehend unbestritten und *common sense*.

## 1.1. Forschungshistorie und Einbettung in den Gesamtkontext

Die möglichen Maßnahmen zur Transformation von Energiesystemen sind vielfältig und nicht zuletzt abhängig von den Systemgrenzen und der angestrebten Reichweite. Unter die eingangs aufgeführte Prämisse *global denken - lokal handeln* fällt das 1992 von den Vereinten Nationen verabschiedete Aktionsprogramm *Agenda 21* [26] zur nachhaltigen Bewirtschaftung von Ressourcen im 21. Jahrhundert. In Kapitel 28 ist eine *lokale Agenda 21* formuliert, die Ziele und Initiativen im Kontext der Nachhaltigkeit auf kommunaler Ebene anvisiert.

Vor diesem Hintergrund gaben der Landkreis und die Hansestadt Lüneburg 2011 eine Studie in Auftrag, um festzustellen, ob und unter welchen Voraussetzungen eine vollständige Versorgung mit erneuerbarer Energie (elektrische Energie und Wärme) für die Region möglich ist. Im Landkreis Lüneburg waren im Jahr 2011 insgesamt 163 MW installierte Leistung von erneuerbaren Energien am Netz. Mit einem rechnerischen Ertrag von 367 GWh entspricht der Anteil erneuerbarer Energien am Gesamtstromverbrauch des Landkreises und der Hansestadt etwa 48 % [27], der Anteil an der Wärmeversorgung weniger als 10 % [28].

In die Bemühungen eingebunden, den Anteil an erneuerbaren Energien zu erhöhen und die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren, verfolgt die Leuphana Universität Lüneburg einen integralen Ansatz über die Handlungsstränge Verkehr, Energie und Campuserwicklung [29]. Hierzu wird das Energiesystem ganzheitlich mit der Sanierung der Bestandsgebäude in einem innovativem Prozess geplant, um eine klimaneutrale Energieversorgung des Campus an der Scharnhorstraße und des angrenzenden Stadtgebietes Bockelsberg zu erreichen. Dieser Ansatz einer Quartierslösung im Rahmen der Förderprogramme *Forschung für die Energieeffiziente Stadt* (EnEff: Stadt) und *Forschung für Energieoptimiertes Bauen* (EnOB) ermöglicht eine wechselseitige Abstimmung und Optimierung der Energieerzeugungseinheiten mit den lokalen baulichen Gegebenheiten. Kernelement der energetischen Sanierung ist die geplante Integration eines Aquiferwärmespeichers in das Energiesystem der Universität.

Eine Übersicht über die Forschungsaktivitäten zur Erreichung der bilanziellen Klimaneutralität der Universität ist in [30] veröffentlicht.

## 1.2. Zielsetzung und Struktur der Arbeit

Im Gegensatz zu den Niederlanden, wo bereits über 2000 Projekte mit Aquiferwärme- und -kältespeichern existieren [31], liegt die Inbetriebnahme des letzten Aquiferspeichers in Deutschland mehr als 10 Jahre zurück. Die Zielsetzung dieser Arbeit ist die genauere Analyse von energetischen und wirtschaftlichen Faktoren, die eine erfolgreiche Umsetzung eines Aquiferwärmespeichers am Standort Deutschland begünstigen. Die in dieser Arbeit anvisierten Forschungsergebnisse sollen genutzt werden können, die wechselseitig voneinander abhängenden energetischen und wirtschaftlichen Mechanismen eines Aquiferwärmespeichers besser prognostizieren zu können, um die Technologiediffusion zu beschleunigen.

Im Rahmen der Arbeit werden konkrete Vorteile und Hemmnisse untersucht, die für oder gegen den erfolgreichen Betrieb eines saisonalen Hochtemperatur-Aquiferwärmespeichers am Standort Lüneburg sprechen. Dazu wurde ein methodisch neuer Ansatz verfolgt, mit dem die Prognosegenauigkeit erhöht wird, indem energetische, finanzielle und ökologische Erwartungswerte über die Aggregation von Häufigkeitsverteilungen mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit belegt werden können. Durch eine integrale Betrachtung aller für die Umsetzung notwendigen Planungsaspekte soll der Frage nachgegangen werden, welche Hemmnisse der Realisierung eines Aquiferwärmespeichers in Deutschland derzeit entgegenstehen.

Die Zielsetzung der Arbeit erforderte das erfolgreiche Durchlaufen folgender Meilensteine:

1. Eruieren zukünftiger Wärmespeicherpotentiale
2. Identifikation integraler Planungsaspekte für die erfolgreiche Umsetzung und Betriebsweise eines saisonalen Aquiferwärmespeichers
3. Konzeptdefinition der zu untersuchenden Energiesysteme (Festlegung auf zwei Varianten)
4. Aufbau einer detaillierten Simulationsumgebung in TRNSYS
5. Erarbeiten einer robusten Regelungsstrategie im Spannungsfeld von energetischer und finanzieller Optimierung
6. Analyse von regelungstechnischen, anlagentechnischen und exogenen Einfluss-

größen auf die Speichereffizienz

7. Integration von Zahlungsströmen in die Simulationsumgebung zur holistischen Energiesystem- und Wirtschaftlichkeitsanalyse in TRNSYS
8. Programmierung und Validierung eines wahrscheinlichkeitsbasierten Lastprofilgenerators zur Erhöhung der Prognosegenauigkeit des Simulationsmodells
9. Anwendung des Lastprofilgenerators auf die Konzepte in der Simulationsumgebung
10. Konzeptspezifische Auswertung der Simulationsstudie anhand energetischer und wirtschaftlicher Indikatoren
11. Nachweis der Normalverteilung der Kapitalwerte (Anderson-Darling-Test)
12. Nachweis der Erhöhung der Prognosegenauigkeit
13. Aggregation der konzeptspezifischen Ergebnisse zu einem repräsentativen Szenario mit der wahrscheinlichsten Eintrittswahrscheinlichkeit
14. Aufstellen eines Gleichungssystems zur Berechnung von konzeptspezifischen kritischen Energiepreiskonstellationen
15. Diskussion der Forschungsergebnisse: Inwiefern ist die saisonale Wärmespeicherung in einem Aquifer ohne Förderung konkurrenzfähig?
16. Ausblick: Welche Randbedingungen begünstigen die wirtschaftliche Betriebsweise von zukunftsfähigen Energiesystemen, die einen HT-Aquiferwärmespeicher beinhalten?

## 2. Stand des Wissens

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit dem Stand des Wissens und der zukünftigen Entwicklung von Wärmesystemen. Auf Komponentenebene wird im Speziellen auf saisonale Wärmespeicher eingegangen, die den Wärmesystemen im Hinblick auf die zunehmende Sektorkopplung (z.B. *power-to-heat* oder *peak-shaving*) zusätzliche Freiheitsgrade und Flexibilitätsoptionen bieten und die Effizienz von beispielsweise solarthermischen Anlagen erhöhen können.

Im Jahr 2016 betrug der Endenergieverbrauch in Deutschland für die Bereitstellung von Prozess- und Raumwärme etwa 1250 TWh [21]. Damit war der Endenergieverbrauch für Wärmeanwendungen etwa doppelt so hoch wie die Bruttostromerzeugung [32]. Dennoch wird der Wärmesektor im heutigen Diskurs der Energiewende nach dem Strom- oder Verkehrssektor zweit- bzw. drittrangig behandelt, obwohl er den größten Anteil des Endenergieverbrauchs ausmacht und der Anteil an erneuerbarer Bereitstellung bei nur etwa 13 % liegt [21].

Die dezentrale, netzgebundene Wärmeversorgung ermöglicht eine energieeffiziente Energieversorgung auf Quartiersebene. Durch die Zentralität der Wärmeerzeugung in einer Heizzentrale haben derartige Wärmesysteme den Vorteil, dass der Austausch oder die Erschließung zusätzlicher Wärmequellen deutlich einfacher möglich ist, als das bei vielen dezentralen Erzeugern auf Objektebene der Fall ist. Speziell in dichter besiedelten Strukturen mit eingeschränkten Sanierungsmöglichkeiten (z.B. Denkmalschutz) und einem Mangel an gebäudenahen und erneuerbaren Wärmepotentialen, gewinnen netzgebundene (Nah-) Wärmesysteme an Bedeutung.

## 2.1. Netzgebundene Wärmesysteme und Quartierslösungen

Begriffsdefinition: In dieser Arbeit verstehen sich *netzgebundene Wärmesysteme* als ein in sich abgeschlossenes Wärmeversorgungssysteme für ein städtisches- oder kommunales Quartier. Die Systemgrenzen beinhalten die Komponenten der Wärmeerzeugung, -speicherung, -verteilung, -übergabe und -abnahme mit einer Gesamtwärmeabnahme im Bereich von mehreren Gigawattstunden.

In Anbetracht der Zielsetzung eines klimaneutralen Gebäudebestandes bis zum Jahr 2050 [33], müssen im Hinblick auf Bestand und Neubauten zahlreiche Veränderungen auf kommunaler Ebene umgesetzt werden. Meist sind es Pilot- und Demonstrationsprojekte, in denen die technologische Machbarkeit zur Energieeinsparung überprüft und in einer Begleitforschung validiert werden. Die Skalierung und Umsetzung in die Breite muss letztlich auch auf Stadtquartiersebene stattfinden. Das Potential zur Effizienzsteigerung von städtischen Versorgungssystemen ist groß und die erforderlichen Maßnahmen sind technologisch mehrheitlich entwickelt [34].

Der kontinuierlich sinkende Gebäudeenergiebedarf bei Neubauten und die verbesserten Dämmstandards von Gebäuden erlauben im Kontext dezentraler Wärmeversorgungssysteme eine Absenkung des Druck- und Temperaturniveaus. Man spricht in Anlehnung an das sinkende Druck- und Temperaturniveau bei gleichzeitig zunehmender Energieeffizienz von Wärmesystemen verschiedener Generation [1, 2, 35, 36]. Die Kategorisierung in Generationen erfolgt dabei nicht trennscharf, sondern verläuft als evolutionärer Technologie-Diffusionsprozess, der über mehrere Jahrzehnte pro Generation andauert.

### 2.1.1. Historische Entwicklung von netzgebundenen Wärmesystemen

Ein netzgebundenes Wärmesystem ist bereits im 14. Jahrhundert in Chaudes-Aigues, einem Dorf im Département Cantal in Frankreich dokumentiert und noch heute in Betrieb. Damals wurde heißes Wasser mit einer Temperatur von 82 °C aus einer Geothermiequelle genutzt und an einige Häuser des Dorfes verteilt [37].

Die ersten kommerziell genutzten Wärmesysteme entstanden Ende des 19. Jahrhunderts in Städten wie Lockport und New York [38]. Diese Wärmenetze der ersten Generation waren bis etwa 1930 die technologisch dominante Art von Wärmenetzen. Sie nutzen überhitzten Dampf als Wärmeträgermedium auf einem druckbeaufschlagten Temperatur-

niveau zwischen 100–200 °C. Das Rohrleitungssystem aus Dampf- und Kondensatstrang wird dabei in Beton-Kanälen geführt. Der Dampf wurde vornehmlich in Dampfkesseln erzeugt, die Kohle verfeuerten. Die Dampfnetze der ersten Generation hatten aufgrund der hohen Systemtemperaturen von bis zu 200 °C und ihrer Verteiltopologie große Wärmeverluste. Des Weiteren waren sie mit dem Risiko von Dampfexplosionen und Korrosion des Kondensatstrangs behaftet.

Die zweite Generation von Wärmenetzen dominierte ab etwa 1930. Diese Generation nutzt unter Druck stehendes Heißwasser als Wärmeträgermedium. Die Temperaturen liegen oftmals über 100 °C. Typische Systemkomponenten sind Betonrohre, große Rohrbündelwärmeübertrager sowie materialintensive und schwere Ventile. Die Wärmequellen waren Kohle- und Öl-befeuerte Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen sowie reine Heizkessel.

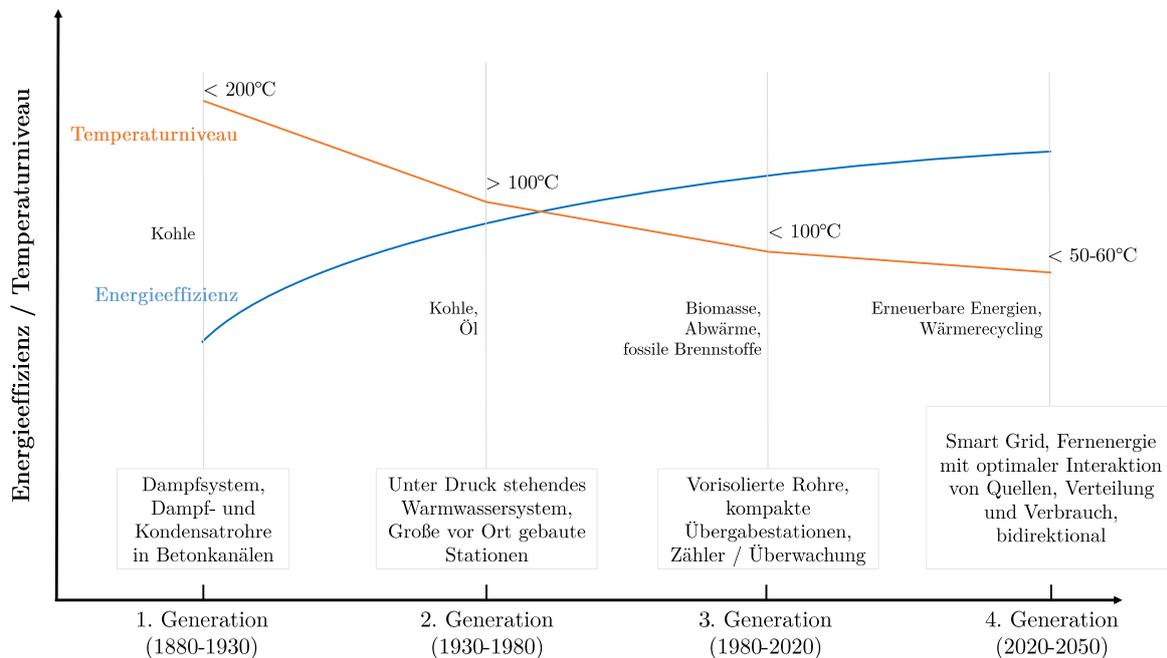
Die dritte Generation von Wärmenetzen, auch als *Skandinavische Wärmesysteme* bekannt, wurden in den 1970er eingeführt und waren ab etwa 1980 technologisch dominant. Diese Wärmesysteme nutzen unter Druck stehendes Wasser, zumeist unter 100 °C. Viele Systemkomponenten sind vorgefertigt (z.B. vorisolierte Verteilrohre), kompakt (z.B. Wärmeübergabestationen mit Plattenwärmeübertragern) und materialeffizient hergestellt. Im Allgemeinen ist diese Art von Wärmesystemen gekennzeichnet durch eine hohe Versorgungssicherheit mit einem Fokus auf Energieeffizienz in Bezug auf die Kraft-Wärme-Kopplung sowie der Konversion von Öl-befeuerten Verbrennungsanlagen zu lokalen und billigeren Brennstoffen wie Kohle, Biomasse und Abwärme [1–4].

### 2.1.2. Zukünftige Entwicklung von netzgebundenen Wärmesystemen

Welche Entwicklung zukünftige Wärme- bzw. Energiesysteme in den nächsten Jahrzehnten nehmen werden ist zu einem gewissen Grad mit Spekulationen verbunden und abhängig von vielen Faktoren [2]. Dennoch verläuft über die drei Generationen hinweg ein Trend in Richtung niedrigerer Systemtemperaturen, schlankeren Komponenten mit höheren Vorfertigungsgraden sowie einer höheren Energieeffizienz (siehe Abbildung 2.1).

Zukünftige Wärmenetze werden in intersektorale Smart-Grids mit bidirektionaler Erzeuger- und Verbraucherstruktur übergehen, in der eine optimale Interaktion zwischen Quellen und Verbrauchern sowie deren Verteilung stattfindet. Zukünftig könnte

man in diesem Zusammenhang durch das intersektorale Zusammenwirken von elektrischen und thermischen Energiesystemen von *Fernenergie* sprechen [39].



**Abb. 2.1.:** Die Entwicklung von netzgebundenen Wärmesystemen über vier Generationen, eigene Darstellung, zusammengetragen aus [1–4]

Die Wettbewerbsfähigkeit netzgebundener Wärmesysteme ergibt sich letztlich aus den Konditionen der Wärmeversorgung und der Wärmeverteilung [1]. Die Wärmeabnehmer sollten möglichst konzentriert sein, um die Netzverluste zu minimieren. Eine geringe Anschlussdichte der Abnehmer führt zu höheren spezifischen Kosten für die Wärmeverteilung und zu höheren relativen Verlusten [40, 41]. Ungeachtet eines sinkenden spezifischen Wärmeverbrauchs ermöglichen dichtbesiedelte Gebiete mit passender Wärmebedarfsstruktur (z.B. europäische Großstädte) auch in Zukunft die Wettbewerbsfähigkeit von Wärmesystemen [42].

Um ihre Rolle in zukünftigen, nachhaltigen Energiesystemen einnehmen zu können, müssen Wärmesysteme auf ihrem Entwicklungspfad verschiedene Leitfragen durchlaufen [4] und grundlegenden Herausforderungen begegnen [1]:

- *structure identification* - Wie sieht ein ideales zukünftiges Energiesystem aus?

- *technology identification* - Welche Technologien können Bestandteil dieses Energiesystems sein?
- *adaption* - Welche Transformations- und Adaptionspfade gibt es?

Die nächste Generation von Wärmenetzen wird zunehmend erneuerbare Energiequellen erschließen und integrieren. Dazu zählen beispielsweise die Solarthermie, die Geothermie oder die Biomasse-Konversion. Mit der Erschließung erneuerbarer Wärmequellen muss zunehmend auf eine fluktuierende Verfügbarkeit reagiert werden. Eine Möglichkeit, den regenerativen Anteil auf Systemebene zu erhöhen und die Fluktuation auszugleichen, ist die Einbindung von thermischen Langzeitspeichern als Bestandteil von Wärmenetzen der 4. Generation (*smart thermal grid*).

## 2.2. Saisonale Wärmespeicher

Gegenwärtig sind bis auf wenige Ausnahmen nur die sensiblen Wärmespeicher als Saisonspeicher wirtschaftlich darstellbar, da die Wirtschaftlichkeit maßgeblich von der Zyklenanzahl bestimmt wird [43]. Vier gut erforschte Bauarten wurden unter realen Betriebsbedingungen getestet und langzeitüberwacht: Behälter-Wärmespeicher, Erdbecken-Wärmespeicher, Erdsonden-Wärmespeicher und Aquifer-Wärmespeicher [44–57]

### 2.2.1. Behälter-Wärmespeicher

Die universellsten Einsatzmöglichkeiten der vier Speichertypen eröffnen sich dem Behälter-Wärmespeicher, da er im Gegensatz zu den anderen Speichertypen nahezu unabhängig von geologischen Standortbedingungen ist und auch in verhältnismäßig kleinen Baugrößen eingesetzt werden kann. In der Regel liegen keine natürlichen Tragkonstruktionen vor, weshalb reine Heißwasserspeicher als Behälterspeicher aus Stahlbeton, Ortbeton oder Betonfertigteilen ausgeführt werden und teilweise in das Erdreich eingebaut bzw. in die Landschaft des Baugebietes integriert sind [45].

Die Speicher werden drucklos im Temperaturbereich zwischen 30 – 95 °C betrieben. Aufgrund des guten Schichtungsvermögens des Speichers und der Nutzung von Wasser als Speichermedium können hohe volumenspezifische Speicherkapazitäten zwischen

60 – 80  $\frac{kWh}{m^3}$  erreicht werden [48, 50]. Da mit diesem Speichertyp sehr hohe Be- und Entladeleistungen abgerufen werden können, kann auf einen zusätzlichen Pufferspeicher verzichtet werden.

Die Nachteile dieser Bauart sind die hohen Baukosten und eine durch statische Belastung limitierte Baugröße. In Deutschland wurden Behälter-Wärmespeicher in Hamburg, Friedrichshafen, Hannover und München realisiert. Diese wurden mit Volumina zwischen 2750 – 12000  $m^3$  ausgeführt [45, 47, 58].

### 2.2.2. Erdbecken-Wärmespeicher

Erdbecken-Wärmespeicher werden in Erdbecken oder Gruben verbaut und nutzen Wasser oder ein Gemisch aus Kies oder Sand und Wasser, weswegen häufig auch der Begriff *Kies-Wasser-Wärmespeicher* zu finden ist. Bei diesem Speichertyp wird keine tragende Decken- oder Dachkonstruktion benötigt, da die festen Speichermaterialien die statische Tragfähigkeit erhöhen [59]. Eine entsprechende Wärmedämmung wird durch eine wasser- und wasserdampfdichte Auskleidung des Erdbeckens oder der Grube durch Kunststoffbahnen (Dichtfolie) erzielt. Die Be- und Entladung des Wärmespeichers kann direkt oder indirekt über Wärmeübertrager erfolgen [46].

Da Kies eine geringere spezifische Wärmekapazität aber eine höhere spezifische Wärmeleitfähigkeit als Wasser besitzt, müssen zwei Effekte berücksichtigt werden. Erstens resultiert aus der geringeren spezifischen Wärmekapazität von Kies gegenüber Wasser ein größeres Volumen für die Speicherung der gleichen Energiemenge wie bei dem Einsatz eines reinen Heißwasserspeichers. Aus dem Mischungsanteil des Erdbecken-Wärmespeichers muss für eine Vergleichbarkeit mit anderen Speichertypen ein *Wasseräquivalent (water equivalent)* berechnet werden. Erdbecken-Wärmespeicher erreichen spezifische Wärmekapazitäten zwischen 30 – 50  $\frac{kWh}{m^3_{\text{ve}}}$ , womit das notwendige Volumen gegenüber dem Heißwasserspeicher um bis zu 50 % ansteigt [48, 50].

Der zweite Effekt, ein geringeres Schichtungsvermögen, wird durch die höhere thermische Leitfähigkeit des Gemisches gegenüber reinem Wasser verursacht, die der natürlichen Schichtung des Wassers auf Grund eines Dichteunterschiedes entgegenwirkt. Je höher der Kiesanteil in dem Gemisch ist, desto stärker wirkt sich dieser Effekt aus und desto geringer wird die Entladeleistung (Trägheit). Wegen der vergleichsweise geringen Be- und Entladeleistung müssen zusätzlich Pufferspeicher in das Anlagenkonzept integriert

werden. Kies-Wasser-Wärmespeicher sind in Deutschland in Augsburg, Steinfurt, Chemnitz und Eggenstein realisiert. Diese wurden mit Volumina zwischen  $1\,500 - 8\,000\ m_{we}^3$  ausgeführt [46–48, 50, 58].

### 2.2.3. Erdsonden-Wärmespeicher

Erdsonden Wärmespeicher nutzen das Erdreich bzw. das Gestein als Speicherhorizont. In vertikalen oder schräg verlaufenden Bohrungen werden Erdwärmesonden ins Erdreich eingegossen und verfüllt. Die Erdwärmesonden werden mit einem Wärmeträgermedium (z.B. Glykol) durchflossen, um die Wärme in den bzw. aus dem Untergrund zu leiten. Die optimale Tiefe der Erdwärmesonden ist abhängig von dem Abnehmersystem (Wärme-Lastprofil), der ungestörten/natürlichen Temperatur und thermischen Leitfähigkeit des Untergrundes, dem Grundwasserspiegel und dem Abstand zu einer thermischen Beeinflussung (bspw. zu anderen Erdwärmesonden). Im Regelfall werden die Erdsonden bis zu einer Tiefe zwischen  $30 - 100\ m$  eingebracht [50, 58, 60].

Erdsonden-Wärmespeicher werden durch ein Erdsondenfeld erschlossen, wobei die Anzahl der Erdsonden im Einzelfall zu prüfen ist. Der horizontale Abstand zwischen den Bohrlöchern sollte zwischen  $1 - 3\ m$  liegen. Die Baukosten für Erdsonden-Wärmespeicher sind relativ gering und können durch eine Erweiterung an ein wachsendes System technisch angepasst werden. Allerdings sind im Vorfeld die geologischen (gut bohrbarer Boden, Schichtenabfolge) und hydrogeologischen Bedingungen (geringe Durchlässigkeit) zu untersuchen. Mit einer spezifischen Wärmekapazität zwischen  $15 - 30\ \frac{kWh}{m_{we}^3}$  hat dieser Speichertyp das geringste volumenbezogene Speichervermögen. Ein weiteres Problem ist die im Entladezyklus sehr schnell abfallende Entladeleistung [61], weswegen Systeme mit Erdsonden-Wärmespeicher zusätzlich einen Pufferspeicher benötigen. Erdsonden-Wärmespeicher sind in Deutschland in Neckarsulm, Crailsheim und Attenkirchen (Hybrid aus Behälter- und Erdsonden-Wärmespeicher) mit Volumina zwischen  $9\,350 - 63\,360\ m_{we}^3$  realisiert [46–48, 50, 58].

### 2.2.4. Aquifer-Wärmespeicher

Aquiferwärmespeicher stellen eine technisch weitgehend ausgereifte und im Vergleich zu den anderen drei Speichertypen sehr kostengünstige Option für die saisonale Wärmespei-

cherung dar. Im Vergleich zu Erdsondenspeichern liegen die spezifischen Speicherkosten um den Faktor 5 – 10, im Vergleich zu oberirdischen Speichern etwa um den Faktor 20 niedriger [8].

Der Aquiferwärmespeicher nutzt natürliche Grundwasser führende Schichten, sogenannte Aquifere, um Wärme ein- bzw. auszuspeichern. Die Wärmespeicherung erfolgt dabei in dem Formationswasser, das meist durch das Dublettenprinzip mit zwei Bohrungen bzw. Bohrgruppen direkt erschlossen wird. Die Bohrlochperipherie umfasst jeweils einen Förderstrang mit einer Tiefenpumpe (vgl. Abschnitt 3.2.1) sowie einem Injektionsstrang, was den Betrieb des Aquiferspeichers in beide Strömungsrichtungen erlaubt. Eine detailliertere Beschreibung der hydraulischen und regelungstechnischen Funktionsweise erfolgt in Abschnitt 4.4.1.

Der Aquifer muss durch eine geeignete geologische Formation mit hoher Undurchlässigkeit nach oben und nach unten eingeschlossen sein und sollte eine Mächtigkeit von wenigstens 20 m haben [48]. Im Dublettenprinzip fungieren die zwei Brunnen den Jahreszeiten entsprechend abwechselnd als Förder- bzw. Schluckbrunnen und die Förderrichtung kehrt sich beim Wechsel von der Beladung zur Entladung um. Während der Sommermonate, wenn im Regelfall mehr Wärme erzeugt wird als das Abnehmersystem abnimmt, kann die Überschusswärme in den Untergrund gepumpt werden. Der Wärmespeicher dient während des Beladezyklus als Wärmesenke und bildet durch die Injektion von heißem Wasser eine Wärmeblase im Untergrund aus. Im Winter, wenn die Leistung der (regenerativen) Wärmeerzeuger nicht ausreichend ist, um den Bedarf vollständig zu decken, wird die eingespeicherte Wärme wieder aus dem Untergrund gefördert, indem der Förderstrang der warmen Seite die im Sommer entstandene Wärmeblase abpumpt. Das heiße Wasser wird obertägig durch einen Wärmeübertrager gefördert und gibt dort die Wärme an ein Abnehmersystem ab. Der Wärmespeicher dient als Wärmequelle. Die Ausspeichertemperatur ist geringer als die Einspeichertemperatur und nimmt im Verlauf des Entladezyklus ab. Bei der Be- und Entladung des Aquiferspeichers strömt das Formationswasser untertage in horizontaler Richtung [29, 30, 46, 62–64].

Der Aquiferwärmespeicher zeichnet sich durch hohe Belade- und Entladeleistungen aus. Die Abschätzung der Speichergröße ist komplex, da das Formationswasser durch eine fehlende Berandung in den Gesteinsschichten verteilt ist. Aufgrund der unterschiedlichen Wärmekapazitäten des Gesteins und des Wassers sowie einer nicht exakt bestimmbar Verteilung im Speicherhorizont kann das Speichervolumen von Aquifer-

Wärmespeichern nur auf etwa 20 – 30 % genau geschätzt werden [58]. Die zusätzlich von der Porosität des Gesteins abhängige Speicherkapazität des Speicherhorizontes liegt mit  $30 - 40 \frac{kWh}{m_{we}^3}$  etwa im Mittelfeld der vier Speichertypen [48, 50]. Die reinen Baukosten sind vergleichsweise niedrig und bestehen hauptsächlich aus den Bohrkosten (vgl. Wolfgramm et al. [9] und Kapitel 6). Obwohl in Deutschland etwa 70 % des Untergrundes als Speicherhorizont geeignet wären [65, 66], gibt es nur drei realisierte Projekte, drei weitere sind derzeit in Planung [8]. Anlagenkonzepte mit einem Aquiferwärmespeicher gibt es in Rostock [58, 67, 68], Neubrandenburg [69–74] und in Berlin [66, 75–80].

Eine Wärmedämmung ist aufgrund von Tiefen über 100 m unter der Erdoberfläche nicht möglich, weshalb in der Regel nur Speichervolumina von über  $100\,000 m_{we}^3$  die Verhältnismäßigkeit von Wärmeverlusten zu eingespeicherter Wärme sicherstellen [59]. Aquifere müssen eine mittlere bis hohe hydraulische Leitfähigkeit und Transmissivität/Transmissibilität, eine hohe Porosität und keinen bzw. einen geringen Grundwasserfluss aufweisen [48, 65, 81–85]. Die Nutzung eines Aquifers als Wärmespeicher ist neben den hydrogeologischen Randbedingungen (vgl. Tabelle 3.1) insbesondere durch den Wasserchemismus [70, 73, 86–88] in Zusammenhang mit den auftretenden Temperaturänderungen limitiert [89–95].

Prinzipiell gibt es verschiedene Anwendungsmöglichkeiten eines Aquiferpeichers, die sich hinsichtlich Temperatur und Anwendungsbereich unterscheiden lassen. In Abhängigkeit des Temperaturbereiches und des Anwendungsbereiches ergeben sich verschiedene Herausforderungen, Speichereffizienzen, Energieeinsparungen und Amortisationszeiten [96]. Für die Vergleichbarkeit und Bewertung ist eine genaue Betrachtung der Speicherbindung notwendig. Eine Kategorisierung der Einsatz- und Temperaturbereiche von Aquiferspeichern liefert Tabelle 2.1:

**Tab. 2.1.:** Kategorisierung von Aquiferspeichern in Anlehnung an [12]

Ziel	Klassifizierung	Temperaturbereich
Kältebereitstellung	Kältespeicher	$\leq 12\text{ °C}$
Kühlen und Heizen	Kältespeicher und	$\leq 12\text{ °C}$
	Niedertemp.-Wärmespeicher	$12 - 20\text{ °C}$
Wärmebereitstellung	Niedertemp.-Wärmespeicher	$20 - 50\text{ °C}$
Wärmebereitstellung	Hochtemp.-Wärmespeicher	$\geq 50\text{ °C}$

Unter der Prämisse eines Aquiferwärmespeichers im Kontext eines Nahwärmenetzes nach der Definition in Abschnitt 2.1, können zwei Konfigurationen hinsichtlich ihrer Ein- bzw. Ausspeichertemperatur unterschieden werden. Die Unterscheidung orientiert sich an der Definition der Internationalen Energie Agentur (IEA), die im ECES-Forschungsprogramm *Annex 12* erarbeitet wurde. Demnach fallen Untergrundspeicher mit einer Einspeichertemperatur von über 50 °C in den Hochtemperaturbereich [97].

### **2.2.4.1. Aquifer-Wärmespeicher im Niedertemperaturbereich mit indirekter Entladung**

Vereinfachend kann man sagen, dass die Ausspeichertemperatur zu Beginn der Speicherentladung der Einspeichertemperatur entspricht und dann über die Zeit abnimmt. Wenn die (mittlere) Ausspeichertemperatur unterhalb des (mittleren) Temperaturniveaus des Abnehmersystems liegt, muss die Ausspeichertemperatur auf die Zieltemperatur des Abnehmersystems angehoben werden, indem man beispielsweise eine Wärmepumpe einbindet. Im Allgemeinen findet die Entladung indirekt über ein Hilfsaggregat statt, das zwischen dem Aquiferspeicher und dem Abnehmersystem eingebunden ist. Für den Temperaturhub muss zusätzliche Energie eingesetzt werden, sodass diese Konfiguration auf Gesamtsystemebene nicht zwangsläufig vorteilhaft ist, obgleich auch positive Effekte wie eine bessere Speichereffizienz aus einer höheren Rückkühlung resultieren können.

### **2.2.4.2. Aquifer-Wärmespeicher im Hochtemperaturbereich mit direkter Entladung**

Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf einem mitteltiefen Hochtemperatur-Aquiferwärmespeicher, der auf einem Temperaturniveau betrieben wird, das eine direkte Entladung ermöglicht und keinen weiteren Temperaturhub für die unterstützende Versorgung eines Nahwärmenetzes benötigt. Gegenüber oberflächennahen Teufenbereichen erlauben mitteltiefe Aquifere in einer Tiefe zwischen 400 – 1000 m die Speicherung und Entnahme von Wärmeenergie auf einem höheren Temperaturniveau und beeinträchtigen Trinkwasseraquifere in der Regel nicht. Weiterhin können in diesen Teufenbereichen teilmobile Bohranlagen eingesetzt werden, die zwar weniger Bohrfortschritt leisten aber zumeist wesentlich kostengünstiger bereitgestellt werden können.

Auf dem Sektor der Wärmespeicherung im Hochtemperaturbereich wurden in den 80er

Jahren eine Reihe von Versuchsanlagen getestet und wegen des geringen Erfolgs wieder eingestellt. Im ECES-Forschungsprogramm *Annex 6* standen die Fragen des Umweltverhaltens und der Wasserchemie im Fokus. In dem Forschungsvorhaben wurden sowohl die häufigsten Probleme aufgezeigt (*clogging, scaling, corrosion, leaching*) als auch entsprechende Lösungsmöglichkeiten erarbeitet [98]. Dennoch kam es in dieser Phase zu keiner Umsetzung. Im Zusammenhang mit der Kraft-Wärme-Kopplung und der saisonalen Wärmespeicherung von Sonnenenergie wurden im späteren Verlauf der Forschungshistorie Untersuchungsergebnisse herangezogen und neue Pilotprojekte, wie z.B. das Reichtagsgebäude in Berlin, umgesetzt [89, 99].

### **2.3. Problematik der Investitionsplanung von ATES-Systemen und Verbesserung der Prognosefähigkeit und -genauigkeit**

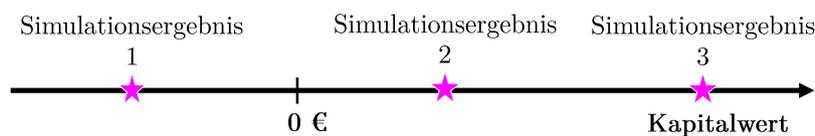
Die Realisierung eines Aquiferwärmespeichers umfasst eine Vielzahl von Risiken. Diese Risiken müssen durch eine integrale Planung so gut wie möglich reduziert werden (siehe Kapitel 3). Vor Baubeginn müssen Simulationen die prinzipielle Machbarkeit eines Aquiferwärmespeichers für den Standort nachweisen.

Aufgrund des Investitionsprofils von ATES-Systemen (sehr hohe Anfangsinvestitionen und unsichere Rückzahlungsströme) nehmen sowohl die Prognosefähigkeit als auch die Prognosegenauigkeit des Simulationsmodells einen entscheidenden Einfluss auf die Investitionsentscheidung. Die Prognosefähigkeit wird im Wesentlichen bestimmt durch die Art und Güte des Simulationsmodells. Je detaillierter das Simulationsmodell hinsichtlich seiner Einzelkomponenten ist, desto mehr Einflussfaktoren auf das Verhalten des Gesamtsystems können untersucht werden. Die Prognosegenauigkeit eines Modells kann häufig erst im Nachgang durch einen Abgleich mit Messdaten bestimmt werden. Eine Möglichkeit, die Problematik einer unsicheren Investitionsplanung von ATES-Systemen zu entschärfen, ist die Verbesserung des simulationsbasierten Verfahrens zur Energiesystem- und Wirtschaftlichkeitsanalyse. Im Gegensatz zu dem gängigen Verfahren, die energetische und wirtschaftliche Bewertung zeitlich und ggf. methodisch entkoppelt voneinander durchzuführen, berechnet das in dieser Arbeit entwickelte Simulationsmodell auf höchster Detailebene zeitgleich Energie- **und** Zahlungsströme. Dadurch kann eine gezielte, ganzheitliche Optimierung erfolgen, indem sowohl die

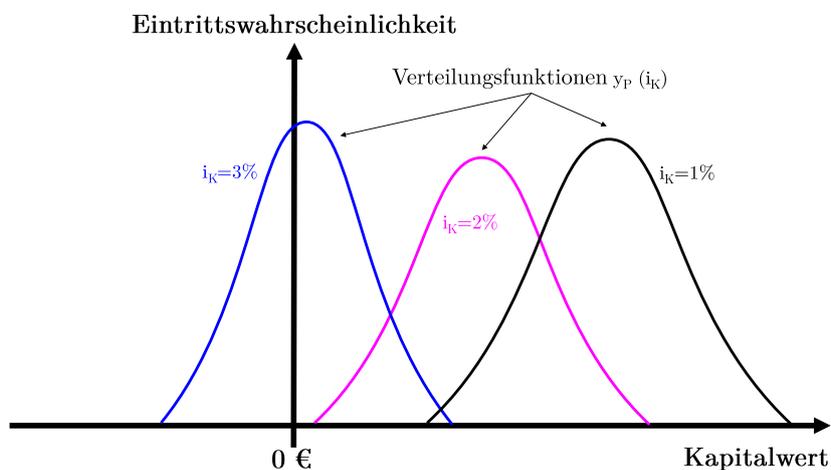
energetischen als auch die wirtschaftlichen Mechanismen in einem Modell untersucht und nach entsprechender Maßgabe optimiert werden können. Das holistische Modell verbessert somit die Prognosefähigkeit.

Um die Prognosegenauigkeit des Modells zu erhöhen, müssen seine Unsicherheiten reduziert werden. Für die Simulation von ATEs-Systemen ist es üblich, jährlich gleichbleibende Ein- und Ausspeichercharakteristika anzunehmen. Aufgrund der thermischen Trägheit von ATEs-Systemen können jährlich identische Lastprofile insbesondere bei Langzeitbetrachtungen zu großen Ungenauigkeiten in der Prognose führen.

Ein wahrscheinlichkeitsbasierter Ansatz in der Modellierung berücksichtigt explizit die Unsicherheit von Lastprofilen. Durch den neuen Modellierungsansatz gewinnt die Energiesystem- und Wirtschaftlichkeitsanalyse eine 2. Dimension: Sie liefert anstatt einer Punktprognose eine Verteilungsfunktion mit Eintrittswahrscheinlichkeit (Abbildung 2.2). Das Verfahren ist grundsätzlich übertragbar auf andere Energiesysteme und Standorte.



(a) konventionelle Energiesystemanalyse mit Punktprognose für ein Set an Parametern



(b) wahrscheinlichkeitsbasierter Energiesystemanalyse mit Verteilungsfunktion in Abhängigkeit des Kalkulationszinssatzes  $i_K$

**Abb. 2.2.:** Erhöhung der Prognosegenauigkeit

### 3. Integrale Planungsaspekte für die Realisierung eines Aquiferwärmespeichers

Olof Andersson beschreibt in [100] ein generelles Muster, nach welchem die Realisierung eines Aquiferwärmespeichers verläuft. Er teilt den komplexen Realisierungsprozess in ein formales Musterverfahren (*designing steps and permit procedure*) mit sieben Meilensteinen auf :

1. geologische Kenntnisstandanalyse und Aufführung der wesentlichen Fragestellungen
2. Machbarkeitsstudie - Bewertung der techno-ökonomischen und umweltechnischen Auswirkungen gegenüber einer oder mehrerer Referenzsysteme
3. Eröffnung von Genehmigungsverfahren (Erster Genehmigungsantrag bei lokalen Behörden)
4. Definition der hydrogeologischen Eigenschaften mit Hilfe von komplementären In- Situ-Untersuchungen und Messungen (Festlegung des Abnehmersystems mit seinem Profil und seinen Temperaturen, hydraulische Testarbeiten)
5. Evaluierung der In-Situ-Untersuchungen und der Simulationsergebnisse (Zirkulationstests)
6. Finales Konzept für Ausschreibungsunterlagen
7. Finaler Genehmigungsantrag (ggf. für gerichtliche Verfahren)

In diesem Kapitel sind die wichtigsten Planungsaspekte aufgeführt, die für eine erfolgreiche Umsetzung eines Aquiferwärmespeichers notwendig sind. Die dabei betroffenen Teildisziplinen aus den Wissenschaftsbereichen Technik, Wirtschaft und Recht wurden

in verschiedenen Dimensionen zusammengefasst.

Nicht zuletzt wegen des hohen Aufwandes im Vorfeld, sind der Identifikationsprozess und die anschließende Umsetzung mit Risiken und Hemmnissen verbunden. Der Untergrund in Deutschland ist aus regional-geologischer und hydro-geologischer Sicht grundsätzlich gut erschlossen. Als mögliches Explorationshemmnis kann der Umstand beitragen, dass Unternehmen der Kohlen-Wasserstoff-Industrie das Privat- und Betriebsgeheimnis geltend machen, so dass die für die Speichernutzung notwendigen Untergrund- und Bohrlochinformationen zumeist nur käuflich erworben werden können. Die geophysikalische Vorerkundung durch eine 3D-Reflexionsseismik-Messung kann im siebenstelligen Euro-Bereich liegen und (bei negativem Befund) neben dem quantitativen und qualitativen Fündigkeitsrisiko ein Investitionshemmnis darstellen.

### **3.1. Geohydraulische und wasserchemische Dimension**

Eine erfolgreiche Realisierung eines Aquiferwärmespeichers setzt eine sehr gute Kenntnis der Geometrie (Oberfläche und Mächtigkeit), Stratigraphie und Lithologie der geologisch betroffenen Formationen sowie der geohydraulischen und wasserchemischen Limitierungen voraus. Bei den Grundwasserleitern unterscheidet man generell zwischen Poren-, Kluft und Karstaquiferen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus auf porösen Aquiferen, bei denen eine Verschlechterung der Durchlässigkeit durch eine Reduktion der Porosität bei zunehmender Tiefe festzustellen ist [7].

#### **3.1.1. Geologische Formationen in Norddeutschland**

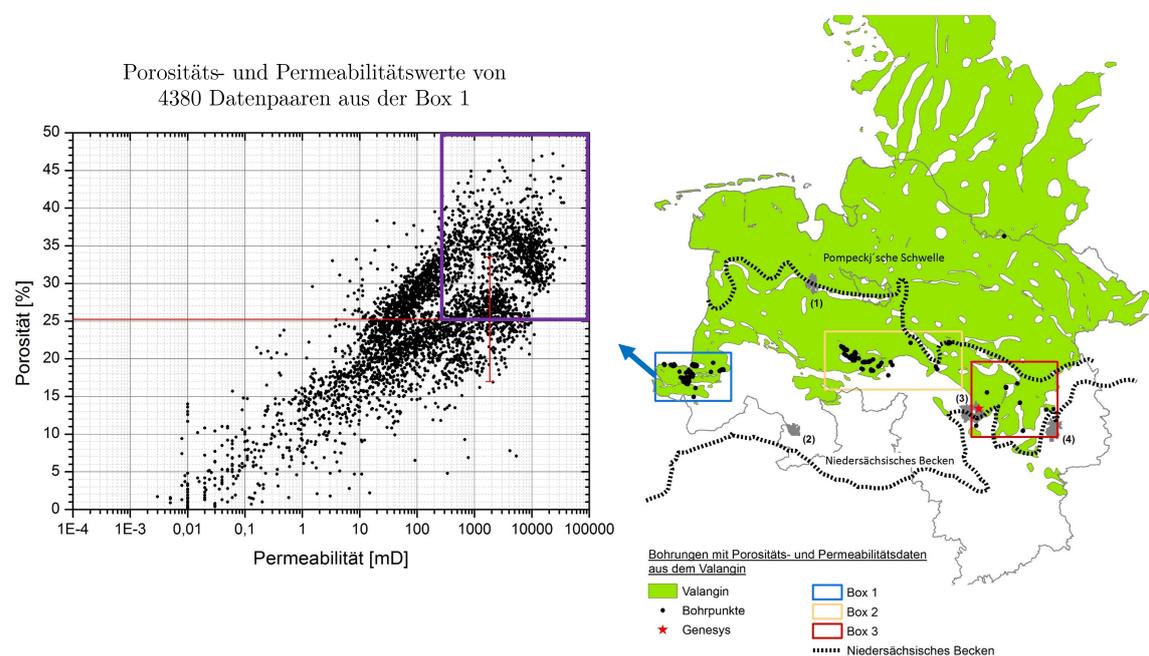
In Deutschland sind schätzungsweise etwa 1 % des Gesteinsvolumens, das in der Tiefe mit heutiger Erschließungstechnik erreichbar ist, der hydrothermalen Geothermie zuzuordnen. 95 % des geothermischen Potentials haben standortunabhängig petrothermalen Charakter, sind also fazielle Strukturen, in denen sich Erdgas oder Erdöl angereichert haben. Die Lagerstätten mit einem hohen hydrothermalen Potential lassen sich zu drei Hauptregionen verdichten: das Bayerische Molassebecken, der Oberrheintalgraben und das Norddeutsche Becken [101].

Der norddeutsche Raum ist tektonisch stabil und besitzt mit den mächtigen Sedimentbeckenfüllungen die größten geothermischen Potentiale in Deutschland. Das liegt zum

### Kapitel 3. Integrale Planungsaspekte für die Realisierung eines Aquiferwärmespeichers

einen an seiner Größe und zum anderen an der vielerorts erhöhten Temperatur wasserführender Gesteinsschichten mit einem durchschnittlichen thermischen Gradienten von etwa  $3,2\text{ K pro }100\text{ m}$ . Lokal kann der Temperaturanstieg auch größer sein und  $4 - 5\text{ K pro }100\text{ m}$  betragen [102].

Die Informationslage bezüglich der Geologie in Norddeutschland ist aufgrund von vielen niedergebrachten Bohrungen der Kohlenwasserstoffindustrie zur Erkundung von Erdöl- bzw. Erdgaslagerstätten als insgesamt gut zu bewerten. Der Datenfundus kann teilweise (z.B. Temperaturen in den Bohrlöchern und Lagerstätten) für Fragestellungen der Geothermie herangezogen werden.



**Abb. 3.1.:** Porositäts- und Permeabilitätswerte von 4380 Datenpaaren aus der Box 1 (links) aus dem Verbreitungsgebiet des Valangin (rechts) in logarithmischer Darstellung. Das rote Kreuz stellt die Mittelwerte aller Porositäts- und Permeabilitätsdaten mit Standardabweichung dar, die lila Box symbolisiert den Bereich, in dem die Mindest-randbedingungen erfüllt sind. Entnommen und aufbereitet aus [5]

In Norddeutschland und im Speziellen auch im nordwestlichen Teil des Norddeutschen Beckens sind daher die relevanten Aquifere prinzipiell bekannt und beispielsweise publiziert in [103] oder [5]. Letztere Publikation beschäftigt sich mit der geowissenschaftlichen Auswertung und Bewertung geeigneter Aquifer-Formationen in Nordwestdeutschland,

u.a. mit den Gesteinen des Valangin, einer weitverbreiteten Stufe der Unterkreide mit porösen Sandsteinen. Aus untersuchten Kernproben existieren für das Valangin 4380 Porositäts- und Permeabilitätspaare. Die Daten zeigen, dass die geohydraulischen Mindestbedingungen in einigen Verbreitungsgebieten gegeben sind (lila Box in Abbildung 3.1). Die statistische Auswertung der Datenpaare zeigte für das Untersuchungsgebiet der blauen Box 1 eine durchschnittliche Porosität von 25,3 % und eine durchschnittliche Permeabilität von 1837,3 *mD*. Von den 4380 Datenpaaren aus Abbildung 3.1 erfüllen 42 % die traditionell formulierten Randbedingung von mindestens 20 % Porosität und 250 *mD* Permeabilität[5].

Problematisch ist in diesem Zusammenhang die extrem hohe Standardabweichung der Permeabilität von 3910,8 *mD*. Aus der hohen Streuung der Permeabilität bei gleicher Porosität resultiert ein hohes quantitatives Fündigkeitsrisiko. Das bedeutet, dass bei geologischer Exploration eines Nutzungshorizontes die Bestimmung der Porosität allein nicht ausreichend ist, um eine Aussage über die überwiegend von der Permeabilität abhängige erzielbare Förderrate zu treffen. Auf die Zusammenhänge und wichtigen geohydraulischen Kenngrößen wird im nächsten Abschnitt näher eingegangen.

#### **3.1.2. Geohydraulische Eigenschaften des Speicherhorizontes**

Klassischerweise werden geohydraulische Randbedingungen formuliert, die erfahrungsgemäß einen wirtschaftlichen Betrieb eines hydrothermalen Aquiferspeichers ermöglichen. Besonders bedeutsam für die Berechnung von Zirkulationsraten ist die Transmissibilität  $T$  als Produkt aus der Permeabilität  $K$  und der Mächtigkeit  $M$  des Aquifers.

Die Permeabilität  $K$  wird zur Quantifizierung der Durchlässigkeit von porösen Strukturen genutzt. Aus dem Zusammenhang zwischen der Wasserflußdichte und dem Gradienten des hydraulischen Potentials lässt sich die Permeabilität aus dem Darcy'schen Gesetz ableiten [104, 105]. Die Permeabilität ergibt sich aus der Fließrate  $Q$ , der dynamischen Viskosität  $\eta$  des Fließmediums, aus der durchströmten Länge  $L$  und der durchströmten Querschnittsfläche  $A$  des porösen Körpers sowie aus der Druckdifferenz  $\Delta p$ , die sich nach dem Absenken des Wasserspiegels während der Förderung einstellt (Gleichung 3.1).

$$K = \frac{Q \cdot \eta \cdot L}{A \cdot \Delta p} \quad \left[ \text{in } m^2, D, mD \right] \quad (3.1)$$

### Kapitel 3. Integrale Planungsaspekte für die Realisierung eines Aquiferwärmespeichers

Über die Permeabilität  $K$  kann der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  bzw. die hydraulische Leitfähigkeit des porösen Körpers bestimmt werden. Weiterhin ergibt sich die Transmissivität (in  $\frac{m^2}{s}$ ) als Produkt aus dem Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  und Mächtigkeit  $M$ .

$$k_f = \frac{K \cdot \rho_F \cdot g}{\eta} \quad (3.2)$$

Im Gegensatz zur Transmissibilität (in  $Dm$  oder  $mDm$ ), die sich aus dem Produkt der Permeabilität und der Mächtigkeit errechnet, gehen in die Transmissivität bereits die Viskosität und Dichte des Fluides mit ein.

Die Förderrate  $Q$  steht mit der hydraulischen Leitfähigkeit  $k_f$ , der effektiven Mächtigkeit  $M$  des Aquifers sowie der Reichweite  $R$  des Absenktrichters und dem Radius  $r_w$  des Bohrloches in der Darcy-Dupuit'schen Brunnengleichung in folgendem Zusammenhang:

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot k_f \cdot M \cdot \frac{\Delta p}{\ln \frac{R}{r_w}} \quad (3.3)$$

mit

$$R = 3000 \cdot \Delta p \cdot \sqrt{k_f}$$

Die Entzugs- bzw. Einspeicherleistung eines hydrothermal genutzten Brunnens kann nach Bestimmung der Kenngrößen aus den Gleichungen 3.1 - 3.3 berechnet werden. Die Leistung  $P_w$  ist abhängig von der durchsetzbaren Fließrate  $Q$  und ergibt sich aus ihrer Multiplikation mit der spezifischen Dichte  $\rho$  und der isobaren spezifischen Wärmekapazität  $c$  des Formationswassers  $F$  mit der treibenden Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zwischen Ein- und Austrittstemperatur (Gleichung 6.7). Dabei werden die Dichte und Wärmekapazität als qualitative und Förderrate und Temperatur als quantitative Eigenschaften des Nutzungshorizontes bezeichnet [102]:

$$P_w = Q \cdot \rho_F \cdot c_F \cdot \Delta T \quad (3.4)$$

Da die Stoffwerte des Formationswassers lokal unterschiedlich sein können und entsprechende Inhomogenitäten des Speicherhorizontes vernachlässigt werden, müssen sowohl

die Transmissivität/Transmissibilität als auch die Entzugs- und Einspeicherleistung praktisch durch hydraulische Testarbeiten und Pumpversuche bestätigt werden. Die realisierbaren Zirkulationsraten und die dafür notwendige elektrische Leistungsaufnahme der Pumpen sind zudem abhängig vom Produktivitätsindex  $PI$  des Brunnens. Der Produktivitätsindex beschreibt das Verhältnis aus der förderbaren Fließrate des Thermalwassers in Bezug auf die resultierende Druckdifferenz zwischen dem Reservoir-Druck  $p_r$  und dem abgesenkten dynamischen Brunnendruck  $p_{w,f}$  während der Förderung (Gleichung 3.5).

$$PI = \frac{Q}{\Delta p} = \frac{Q}{p_r - p_{w,f}} = \Pi \quad \left[ \text{in } \frac{m^3}{h \cdot MPa} \right] \quad (3.5)$$

Aus rein physikalischer Sicht ist der Produktivitätsindex unter gleichen Randbedingungen des Drucks, der Temperatur und der Druckabsenkung, identisch mit dem Injektivitätsindex  $\Pi$ . Die erreichbare Förderrate kann prinzipiell durch eine größere Pumpenleistung gesteigert werden, jedoch resultiert aus einer höheren Pumpleistung eine stärkere Absenkung des dynamischen Brunnendrucks bzw. des Wasserspiegels. Neben höheren Betriebskosten durch einen höheren Strombezug für die Tiefenpumpen muss zudem berücksichtigt werden, dass die Tiefenpumpen einen gewissen Vordruck benötigen und somit die mögliche Druckabsenkung beschränkt ist [102].

Der Wärmetransport im Aquiferspeicher erfolgt hauptsächlich durch Wärmeleitung und Wärmekonvektion durch das umgewälzte Formationswasser. Damit ein natürlicher, poröser Aquiferspeicher genutzt werden kann, müssen ausreichende Fließwege im Gestein existieren, die eine Bewegung des Wassers ermöglichen. Die Porosität gibt an, wieviel Prozent des Gesteinsvolumens von Hohlräumen gebildet wird und im günstigsten Fall Wasser enthält. Die Nutzporosität ist derjenige Anteil am Porenraum, der von Wasser durchflossen werden kann und stellt den ausschlaggebenden Faktor der Permeabilität eines Gesteines dar. Sie wird durch Laborversuche an Boden- und Gesteinsproben bestimmt. Die Nutzporosität sollte mindestens 20 % betragen [5, 102, 106]. Für eine wirtschaftlich darstellbare Wärmenutzung gibt es weitere Anforderungen an einen Aquifer.

Um eine Verhältnismäßigkeit der nicht zu umgehenden Wärmeverluste im angrenzenden Gestein herzustellen, sollte der Aquifer eine Mindestmächtigkeit von 10 m [107] bzw. 20 m [102, 106] und eine Mindestpermeabilität von 250 – 500 mD [102, 106] erreichen.

### Kapitel 3. Integrale Planungsaspekte für die Realisierung eines Aquiferwärmespeichers

Die Transmissibilität  $T$  sollte mindestens  $2 Dm$  [108] bzw.  $5 Dm$  [5] betragen. Rechnerisch ergibt sich aus einer Mindestmächtigkeit von  $20 m$  und einer Permeabilität von  $500 mD$  bereits eine Transmissibilität von  $> 10 Dm$ .

Tabelle 3.1 fasst die Randbedingungen zusammen, die aus geohydraulischer Sicht eine wirtschaftliche Betriebsweise eines (porösen) Aquiferwärmespeichers ermöglichen. Der Umgang mit dem verbleibenden Risiko der Fündigkeit als wichtiger Bestandteil der integralen Planung eines Aquiferwärmespeichers wird in Abschnitt 3.3 näher behandelt.

**Tab. 3.1.:** Geohydraulische Mindestanforderungen an wichtige, die Wirtschaftlichkeit ermöglichende Parameter eines Poren-Aquifers zur Nutzung als saisonaler Wärmespeicher

Parameter	Mindestanforderung
Mächtigkeit des Aquifers	$M > 20 m$
Volumen	$V > 100\,000 m_{we}^3$
Einspeichertemperatur	$T > 60\text{ °C}$
Porosität	$\Phi > 20\%$
Permeabilität	$K > 500 mD$
Transmissibilität	$T > 10 Dm$
Produktivitätsindex	$PI > 50 \frac{m^3}{h \cdot MPa}$

#### 3.1.3. Veränderung der Hydrochemie im Formationswasser

Die Wärmespeicherung im Thermalwasser führt zu Veränderungen der geochemischen Eigenschaften des Untergrunds durch eine Veränderung der Lösungsgleichgewichte der mineralischen Komponenten. Infolge einer Temperaturerhöhung wird ein Ungleichgewichtszustand herbeigeführt, der in Verbindung mit Luftzutritten zur Übersättigung einiger Verbindungen führen kann, welche sich in fester Form ablagern oder korrodieren [92, 95, 109, 110]. Bei der Bildung von Ablagerungen wirken Lösungs- und Fällungsprozesse (allg. Dissoziationsreaktionen) sowie Redoxprozesse zusammen. Das ist auch bei der Bildung von Ablagerungen durch Verockerung und durch Oxidation von Metallen der Fall. Dissoziations- und Redoxreaktionen bilden somit den theoretischen, thermodynamischen Rahmen für eine Beschreibung der Vorgänge [111]. Demgegenüber folgen Mikroorganismen und deren Gemeinschaften (Biofilme) nicht den Gesetzen der

### Kapitel 3. Integrale Planungsaspekte für die Realisierung eines Aquiferwärmespeichers

Thermodynamik und können durch ihre Enzymsysteme Reaktionen und Reaktionswege nutzen, die rein abiotisch deutlich langsamer oder gar nicht ablaufen [112].

Die Auflösung und Fällung chemischer Verbindungen wird über das Löslichkeitsprodukt, das eine Sonderform des Massenwirkungsgesetzes ist, beschrieben. Das Schicht- bzw. das Formationswasser besteht aus in Lösung befindlichen Kationen und Anionen, die bei der Passage des Wassers durch den geologischen Untergrund aufgenommen wurden. Solange das Ionenprodukt kleiner als das Löslichkeitsprodukt ist, kommt es zu einer Lösung. Überschreitet das Produkt aus Kationen und Anionen das Löslichkeitsprodukt, findet eine Ausfällung statt. Der Stand des Wissens hinsichtlich der eisenspezifischen Reaktionen und Redoxprozesse im Zusammenhang mit geothermisch genutztem Thermalwasser ist ausführlich in [111] beschrieben. Für andere Metalle wie Kupfer und Nickel laufen die Reaktionsmechanismen ähnlich ab und sind in [113] veröffentlicht. In diesen Reaktionen können verschiedene anorganische und organische Liganden, Ionenpaarbildner und Katalyten eingreifen, die im Einzelnen Gegenstand kinetischer Untersuchungen der Metall- und Korrosionschemie sind [114]. Redoxprozesse zwischen Metallen und weiteren Nichtmetallen wie beispielsweise die Oxidation von Sulfid durch Eisen (III) sind weitere mögliche Reaktionen und prinzipiell gut bekannt [115].

Die vorrangigen Probleme der hydrothermalen Geothermie in Zusammenhang mit der Hydrochemie sind die Ausfällung und das Ablagern von gelösten karbonatischen Mineralien und Gasen an Wärmeübertragern [85], im Förderstrang oder an Stellen mit kritischen Strömungsverhältnissen, wie z.B. Filtern mit kleinen Spalten oder in Pumpenstufen [116].

Das sogenannte *Scaling* oder *Clogging* entsteht durch eine Teilentgasung von im Thermalwasser enthaltenen Stickstoff oder  $CO_2$  bei Entspannung auf Atmosphärendruck [117, 118]. Besonders im Pumpenstillstand ist das Ausgasen als kritisch anzusehen, da im laufenden Betrieb i.d.R. ein Druck gegenüber Atmosphäre gehalten wird.

Weiterhin sind folgenden Prozesse bekannterweise von besonderer Bedeutung und auslegungsrelevant [109, 114]:

- Ausfällung von Calcit und Carbonaten aufgrund temperaturinduzierter Lösungs- und Fällungsprozesse sowie Veränderung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts (Ausgasen von  $CO_2$ )
- Ausfällung und Bildung von silikatischen Ablagerungen durch die temperaturinduzierte Lösung und Fällung von Tonmineralen und Silikaten

- Korrosionsprozesse aufgrund der Verwendung unbehandelten Grundwassers (keine kontrollierten Bedingungen wie idealerweise in geschlossenen Systemen, höhere Ionenstärke, elektrische Leitfähigkeit und Mineralisierung, je nach Teufe und Lithologie hohe bis sehr hohe Salzgehalte)
- Ausfällung von Metallen aufgrund von pH/eh – Änderungen und Oxidation durch Luftsauerstoff, insbesondere Oxidation von Eisen (Verockerung) und Mangan, das als Legierungsbestandteil von Stahl eingesetzt wird
- Bildung von Biofilmen und mikrobielle Korrosion, Ausfällung von Sulfiden

Die Ausfällung von Metallen lässt sich gegenwärtig mit technischen Maßnahmen wie einer Stickstoffbeaufschlagung der Brunnen nicht vollständig verhindern [119]. Der Eintrag von Luftsauerstoff durch Druckunterschiede, Undichtigkeiten oder Diffusion und die daraus resultierende Eisenoxidation ist in nährstoffarmen Wässern auch für die Bildung von Biofilmen verantwortlich, während Temperaturänderungen die Biofilme in ihrer Zusammensetzung und Auswirkung verändern, jedoch nicht hervorrufen können [114].

Innerhalb Deutschlands unterscheidet sich die Zusammensetzung des Thermalwassers in den drei Hauptregionen erheblich [120]. Eine hydrochemische Untersuchung des Formationswassers und die Ableitung der maximalen Einspeichertemperatur ist daher für jeden Speicherhorizont individuell durchzuführen.

## **3.2. Technische Dimension**

Die technische Dimension fasst die Bohrtechnik, die untertägigen Geothermiepumpen sowie die Zusammensetzung der Erzeuger und Abnehmer in der obertägigen Anlage zusammen. Die Bohrtechnik und die obertägige Abnehmerstruktur beeinflussen sich in gewissem Maße gegenseitig. Für die Auswahl der Bohreinrichtung muss der zu bohrende Durchmesser bekannt sein. Umgekehrt muss für die Begrenzung des Bohrdurchmessers, der aufgrund der Rohrreibungsverluste auch die Zirkulationsrate bestimmt, das Zusammenspiel aus dem untertägigen Thermalwasserkreislauf und der obertägigen Abnehmerstruktur bekannt sein, um so die maximale Entzugsleistung der gewählten Bohrlochgröße zu bestimmen. Dieser iterative Planungsprozess ist spätestens durch die Probebohrungen und Injektions- bzw. Fördertests abgeschlossen.

Für die nähere Betrachtung der in Frage kommenden Bohrtechnik wird von einer vertikalen Bohrung zur Erschließung eines horizontalen Trägers ausgegangen [121].

### 3.2.1. Bohrtechnik und Geothermiepumpen

In der Geotechnik haben sich im Wandel der Zeit die unterschiedlichsten Bohrverfahren entwickelt, die sich beispielsweise hinsichtlich Bautechnik (Baugrunderkundung, Bergbau, Offshore usw.) oder Lagerstättensuche (Kohle, Erdöl, Erdgas, Speicherbohrung usw.) unterscheiden.

Grundsätzlich können die Bohrverfahren (abgesehen von Sonderbohrverfahren) in drei Verfahren eingeteilt werden - das schlagende, das (dreh-) stoßende und das drehende Bohren [122]. Beim schlagenden Bohren wird das Gesteinsmaterial durch Keilwirkung zertrümmert. Charakteristisch für das schlagende Bohren ist die geringe, aber konstante primäre Druckkraft mit geringer Zerstörungsenergie bei hoher Schlagfrequenz. Beim stoßenden Bohrverfahren hingegen wirken große Zerstörungsenergien bei geringer Schlagfrequenz. Beim drehenden Bohren wird das Gesteinsmaterial durch sich drehende Bohrmeißel unter hoher axialer und konstant anhaltender Druckkraft zerspant [108, 122, 123].

Die Wahl der Bohrtechnik hängt in erster Linie von der Tiefe der Zielformation ab, die erschlossen werden soll. Gleichsam ist wichtig, welche Formationen und Lagerstätten bis zur Zielformation durchteuft werden. In der Literatur variieren die Teufenangaben für den Begriff *Flachbohrung* zwischen 300 – 1500 m [123]. Die VDI 4640 definiert die *oberflächennahe Geothermie* bis zu einer Tiefe von 400 m [124] und in der klassischen Geothermie spricht man ab einer Teufe von 3000 m von *Tiefbohrungen* [122, 125].

Ein Aquiferwärmespeicher muss für seine bidirektionale Betriebsweise in der Ein- bzw. Ausspeicherphase sowie aus wasserwirtschaftlichen und umweltschutztechnischen Vorgaben durch mindestens zwei Bohrungen (Dublette) erschlossen werden. Dabei dient die Produktionsbohrung zur Förderung und die Einpressbohrung zur Druckhaltung der Lagerstätte, um eine nachhaltige Nutzung bei möglichst konstanten Förderraten zu ermöglichen. Der erforderliche laterale Abstand zwischen beiden Bohrungen ist individuell zu prüfen. Die Abstandsberechnung ist abhängig von den Fluid- (Dichte  $\rho_f$ , Kompressibilität  $c_f$ ) und Aquifereigenschaften (Mächtigkeit  $M$  und Kompressibilität  $c_A$ ) sowie von der thermischen Durchbruchzeit  $t_B$ . Die Abstandsberechnung der Brunnen

in einem gespannten Aquifer kann nach Gleichung 3.6 erfolgen [126]:

$$a_D = \sqrt{\frac{3 \cdot t_B \cdot \rho_f \cdot c_f \cdot q}{4 \cdot \pi \cdot \rho_A \cdot c_A \cdot M}} \quad (3.6)$$

Die Abstände der Brunnen in einem Dubletten-System können zwischen 50 m [66] und 1 – 2 km [126] betragen. Die Wahl des Abstandes wird in der Regel so gewählt, dass eine gegenseitige thermische Beeinflussung der kalten und warmen Seite weitestgehend ausgeschlossen ist und bei starker Nutzungskonkurrenz im Untergrund möglichst wenig Raum für ein ATES-System verwendet werden muss [127]. Unter geeigneten Umständen scheinen auch positive Auswirkungen hinsichtlich der Speichereffizienz möglich zu sein, wenn sich die Dubletten gegenseitig beeinflussen [9].

Brunnen können nach den üblichen Trockenbohrverfahren sowie nach dem normalen *Rotary-Bohrverfahren* mit Spülung und Wasser oder Luft als Zirkulationsmedium oder nach dem Gegenspülverfahren niedergebracht werden [123]. Mittlere Tiefen von bis zu 1000 m können mit mobilen oder teilmobilen Bohranlagen erschlossen werden. Beispiele für aufgesattelte Vertikal-Flachbohranlagen sind *Streicher Bohrgeräte* des Typs MD 250 [128] oder mobile Bohrgeräte der *Prakla Bohrtechnik GmbH*, z.B. der Prakla RB50 [129]. Ob eine mobile oder stationäre Tiefenbohranlage zum Einsatz kommt, ist bei einer Durchörterung von Grundwasserhorizonten zusätzlich eine genehmigungsrechtliche Abwägung oder Vorgabe einer Landesbehörde, die Berücksichtigung finden muss. Die wichtigsten Aspekte in Zusammenhang mit geothermalen Bohrungen und verfügbarer Bohrtechnik sind in Culver et al. [130] aufgeführt.

#### 3.2.1.1. Geothermiepumpen

Die Pumpenindustrie stellt eine große Anzahl an Techniken zur Verfügung, um Medien aus dem Untergrund zu fördern. Prinzipiell kommen in der Geothermie Tauchkreiselpumpen zum Einsatz, bei denen sich die Antriebssysteme (*driver*) je nach Hersteller und Anwendung unterscheiden. Pumpensysteme in der Geothermie können mehrere Tonnen schwer und bis zu 36 m lang sein [120].

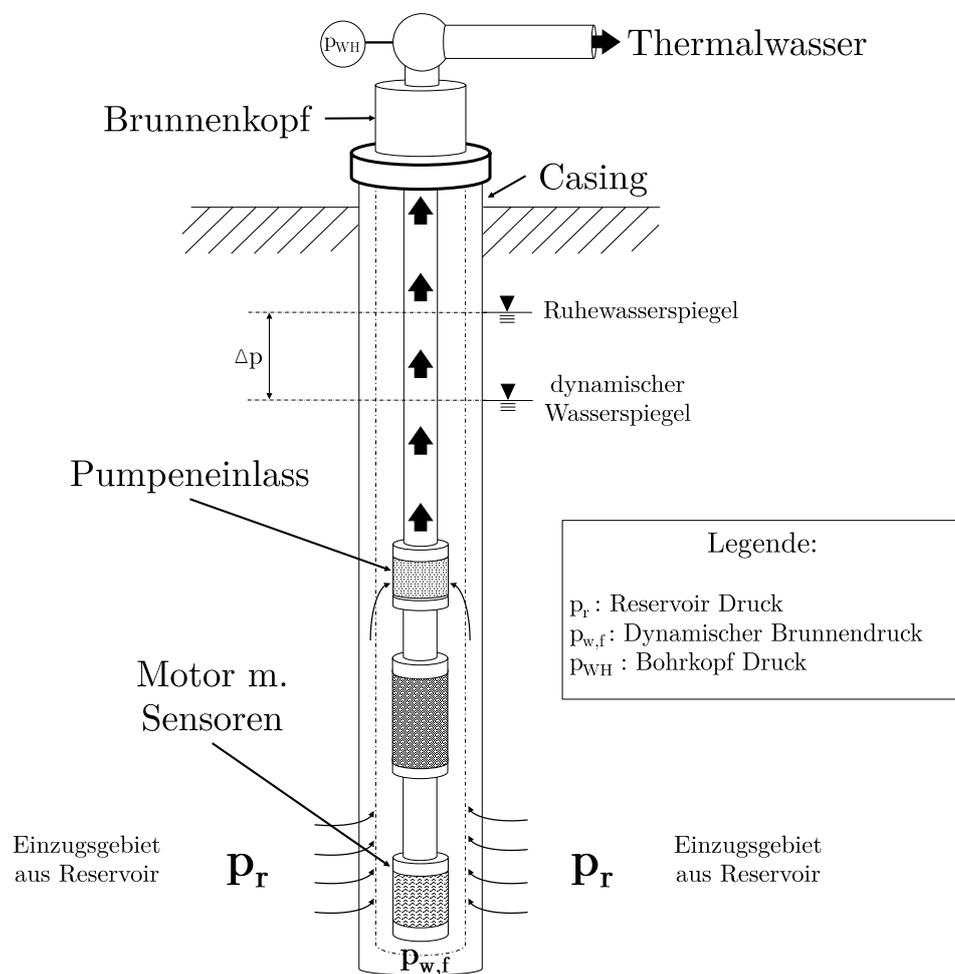
*Electrical Submersible Pumps* (ESP) werden durch ein aufwendiges Abdichtungssystem von einem Untertagemotor angetrieben. Der Motor wird durch ein Kabel mit Strom versorgt, ein obertägiger Frequenzumrichter regelt die Förderrate über die Drehzahl.

### Kapitel 3. Integrale Planungsaspekte für die Realisierung eines Aquiferwärmespeichers

Diese Pumpentypen können in einer maximalen Einbautiefe von bis zu 4000 m realisiert werden und laufen normalerweise bei höheren Drehzahlen.

*Line Shaft Pumps* (LSP) werden über eine bis zur Oberfläche durchgehenden Welle über Pumpenstufen verbunden. Der Motor befindet sich am Bohrlochkopf und treibt die Welle an. Das Gestängepumpensystem kann in Einbautiefen bis zu 500 m realisiert werden.

Aus den verschiedenen Antriebstechniken ergeben sich unterschiedliche Limitierungen und Anforderungen. Eine Übersicht über hochleistungsfähige Tauchkreiselpumpen beider Typen ist in [131] zusammengetragen. Beide Pumpentypen erzielen Wirkungsgrade zwischen 68 – 78 % [11].



**Abb. 3.2.:** Prinzipskizze und Druckverhältnisse am Beispiel einer *Electrical Submersible Pump* mit Bohrlochperipherie, eigene Darstellung in Anlehnung an [6]

### Kapitel 3. Integrale Planungsaspekte für die Realisierung eines Aquiferwärmespeichers

In Abhängigkeit des Ruhewasserspiegels (*static fluid level SFL*) und des dynamischen Wasserspiegels im Betrieb (*dynamic fluid level DFL*) können die Einbautiefen der Pumpen stark variieren. Insbesondere bei gespannten Aquiferen oder artesischen Brunnen kann der Ruhewasserspiegel knapp unterhalb oder über der Geländeoberkante liegen. Eine Übersicht der wesentlichen Komponenten beider Pumpentypen befindet sich im ergänzenden Anhang A.2

Eine Auslegung der Pumpe hinsichtlich ihrer Leistung erfolgt über die Bestimmung der Gesamtförderhöhe  $TDH$ . Diese ergibt sich additiv aus der notwendigen Bohrkopfdruckhöhe  $H_{WH}$  und der Verlusthöhe  $H_F$  aufgrund von Druckverlusten durch Rohreibung, die für eine Förderung überwunden werden müssen (Gleichungen 3.7 - 3.12) [6].

$$P_p = TDH \cdot \frac{Q}{3600} \cdot \rho_f \cdot g \cdot \frac{1}{\eta_p} \quad [\text{in kW}] \quad (3.7)$$

$$TDH = DFL + H_{WH} + H_F \quad [\text{in m}] \quad (3.8)$$

mit

$$DFL = SFL + \frac{Q \cdot 10^6}{PI \cdot g \cdot \rho_f} \quad (3.9)$$

$$SFL = D_W - \frac{p_r \cdot 10^6}{\rho_f \cdot g} \quad (3.10)$$

$$H_{WH} = \frac{p_{WH} \cdot 10^6}{\rho_f \cdot g} \quad (3.11)$$

$$H_F = f_D \cdot \frac{L_p}{D_p} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (3.12)$$

$P_p$ : elektrische Leistungsaufnahme der Pumpe in kW

$TDH$ : Gesamtförderhöhe in m

$Q$ : Volumenstrom in  $\frac{m^3}{h}$

$\rho_f$ : Dichte des Thermalwassers in  $\frac{kg}{m^3}$

$g$ : gravimetrische Konstante der Erdbeschleunigung in  $\frac{m}{s^2}$

$\eta_p$ : Gesamtwirkungsgrad der Pumpe [-]

$DFL$ : dynamischer Wasserspiegel in m

$H_{WH}$ : Bohrkopfdruckhöhe in m, ergibt sich aus dem vorzuhaltenden Bohrkopfdruck

$H_F$ : Verlusthöhe in m

$PI$ : Produktivitätsindex in  $\frac{m^3}{h \cdot MPa}$ , siehe Gleichung 3.5

### Kapitel 3. Integrale Planungsaspekte für die Realisierung eines Aquiferwärmespeichers

$D_W$ : Brunntiefe in  $m$

$p_{WH}$ : Bohrkopfdruck in  $MPa$

$p_r$ : Reservoirdruck in  $MPa$

$f_D$ : Rohrreibungszahl nach Darcy [-]

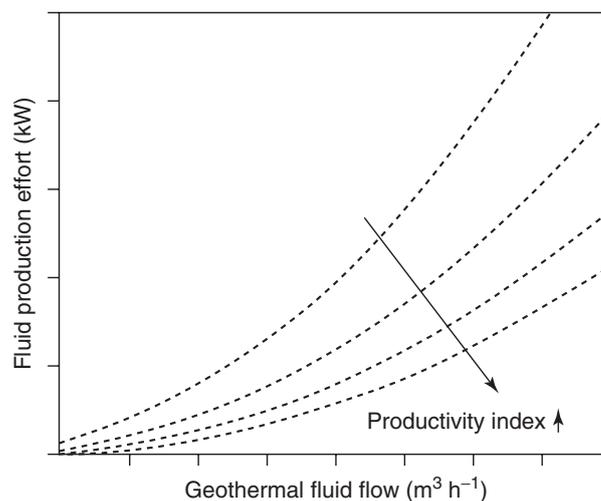
$L_P$ : Länge der Rohrleitungen in  $m$

$D_P$ : Durchmesser der Rohrleitung in  $m$

$v$ : durchschnittliche Fluidgeschwindigkeit (*plug-flow*) in  $\frac{m}{s}$

Die Einbautiefe der Pumpe ergibt sich aus dem dynamischen Wasserspiegel zuzüglich eines *Overheads* in Abhängigkeit des notwendigen Pumpenvordrucks und des maximalen Gasgehaltes. Ein Optimum der Einbautiefe der Pumpe wird zunächst in der Machbarkeitsstudie geschätzt und muss durch Testbohrungen und einen Zirkulationstest bestimmt werden, wobei Druckabsenkungen  $\Delta p$  zwischen 10 – 30 *bar* eine übliche Größenordnung darstellen [102].

Die tatsächliche elektrische Leistungsaufnahme der Pumpen im Betrieb hängt von der realisierbaren Produktivität des Reservoirs und von dem geförderten Volumenstrom ab. Je höher der Volumenstrom ist, desto höher ist die dafür notwendige Leistung der Pumpe.

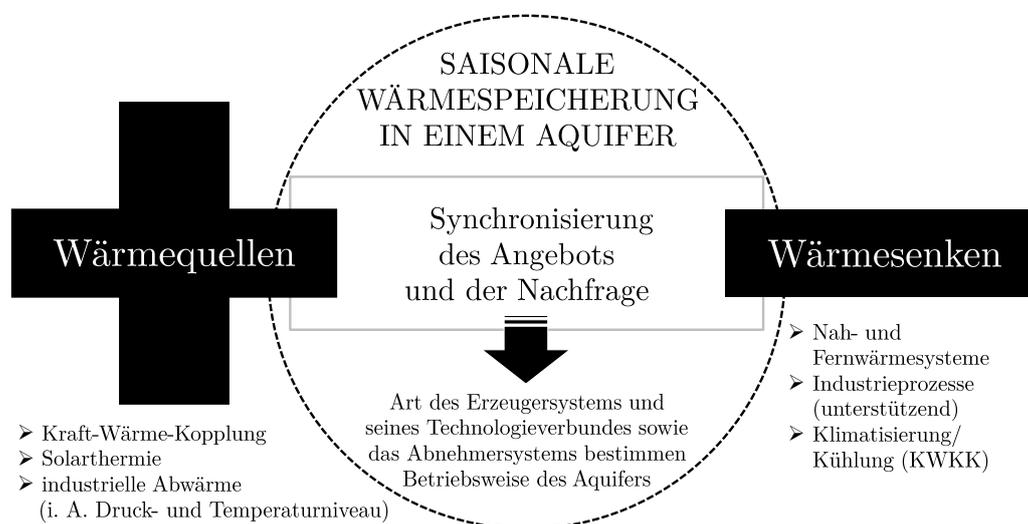


**Abb. 3.3.:** Pumpenleistung in Abhängigkeit des geförderten Volumenstromes für verschiedene Produktivitäten, entnommen aus [6]

Der quadratische Zusammenhang zwischen Volumenstrom und dafür notwendiger Pumpenleistung ist für kleinere Produktivitätsindizes stärker ausgeprägt als dies für größere Produktivitäten der Fall ist (siehe Abbildung 3.3). Aus diesem Sachverhalt folgt, dass insbesondere bei geringen Produktivitätsindizes eine Erhöhung des Volumenstroms zu einer überproportional höheren Leistungsaufnahme der Pumpe führt und damit die Betriebskosten durch den Bezug von elektrischer Energie deutlich ansteigen. Eine Untersuchung der Druckverhältnisse in Zusammenhang mit der richtigen Auslegung des Pumpen-Betriebspunktes (in Abhängigkeit thermophysikalischer Eigenschaften) wurde an der Forschungsplattform Groß-Schönebeck durchgeführt [132].

#### 3.2.2. Obertägige Anlagenstruktur und anlagenseitiger Technologieverbund

Die Einbindung eines Aquiferwärmespeichers in ein Energiesystem steht im Spannungsfeld von nachhaltiger Erzeugung und preisgünstiger Bereitstellung. Entscheidend für das Verhalten des Langzeitspeichers als Bindeglied zwischen den Wärmeerzeugern und den Wärmeverbrauchern ist die Konfiguration des Gesamtsystems. Das antizyklische Verhalten der Erzeuger und Verbraucher über das Jahr hinweg ist charakteristisch für viele Wärmenetze, insbesondere unter Nutzung der Solarthermie.



**Abb. 3.4.:** Übersicht von möglichen Konfigurationen der Wärmespeicherung zwischen Wärmeerzeugern und Wärmeverbrauchern

## Kapitel 3. Integrale Planungsaspekte für die Realisierung eines Aquiferwärmespeichers

Eine Synchronisierung des Wärmeangebotes mit seiner Nachfrage durch einen saisonalen Versatz kann den regenerativen Anteil auf Gesamtsystemebene erhöhen oder eine sonst ungenutzte (Ab-) Wärmequelle erschließen (Abbildung 3.4). Günstige Voraussetzungen sind dort gegeben, wo ohne Zusatzaufwand oder mit geringen Investitionen vorhandene Abwärmepotentiale genutzt werden können oder durch eine KWK-Flexibilisierung zusätzliche Einnahmen (Einspeisung, Direktvermarktung oder netzdienliche Umwandlung von Strom in Wärme) oder verminderte Ausgaben (Brennstoffkosten) realisiert werden können.

Der Speicher kann im Sinne einer technischen Systemkomponente als Baustein zwischen Quellen und Senken betrachtet werden. Daraus ergibt sich eine Vielzahl an denkbaren Kombinationen, in denen die Speicheranforderungen unterschiedlich sein können. Sowohl der Technologieverbund zur Deckung der Grund- bzw. Spitzenlast als auch der Einsatz des Brennstoffes und die Abnehmerstruktur nehmen Einfluss auf die Betriebsweise des Aquiferwärmespeichers.

Bei konkurrierenden Erzeugertechnologien wie der Kraft-Wärme-Kopplung und der Solarthermie oder für den Fall paralleler Erzeuger, muss im Entladezyklus des Aquifers eine Erzeugerhierarchie erstellt werden. Diese regelt, in welchen Systemzuständen und Lastfällen welcher Erzeuger die höchste Priorität hat und demzufolge als Letztes abgeregelt wird, wenn die Erzeugung zeitweise größer ist als die Abnahme. In der Praxis ist häufig die Regelung von ATES-Systemen eine Herausforderung, die Probleme bereitet und über Jahre hinweg entwickelt werden muss [74, 96].

### **3.3. Wirtschaftliche Dimension und Risikomanagement**

Dieses Unterkapitel beschäftigt sich mit den finanziellen Risiken hydrothermalen Vorhaben. Das finanzielle Risiko meint in diesem Zusammenhang die Risiken, die direkt mit dem Nutzungshorizont bzw. seiner Geologie zusammenhängen, dem sogenannten Fündigkeitsrisiko. Nicht in die Betrachtungen eingeschlossen sind externe finanzielle Entwicklungen (z.B. ungünstige Zinsspanne oder Zinsstruktur) oder generelle marktwirtschaftliche Trends (z.B. Brennstoffkosten), die ein Gesamtsystem mit realisiertem Aquiferwärmespeicher negativ beeinflussen können.

### 3.3.1. Risikomanagement

(Tief-)Bohrvorhaben und untertägige Erschließungskonzepte sind im Regelfall mit Risiken verbunden und können zu Verlusten oder finanziellen Ausfällen führen. Schätzungen zufolge sind weltweit etwa 50 % aller Bohrungen zur Erschließung neuer Lagerstätten nicht fündig. In Deutschland ist diese *Fehlquote* mit 20 – 30 % deutlich geringer. Von aktuell 40 deutschen Tiefen-Geothermie-Projekten in Betrieb und im Bau, gelten zwei als nichtfündig, bei vier weiteren ist die Fündigkeit unsicher und bei 18 Projekten traten erhebliche Probleme auf. Etwa 50 % der hydrothermalen Tiefenprojekte sind planmäßig oder nur mit geringen Planabweichungen verlaufen [133].

Im Sinne einer Risikominimierung ist es sinnvoll, ein Risikomanagement mit einer Chancen-Risiko-Abwägung zu betreiben. Ein wichtiger Teil des Risikomanagement-Kreislaufs nach [134] ist die Identifikation potentieller Risiken in dem Sektor der Geothermie. Zur Risikoidentifizierung bei der geothermischen Erschließung sind sowohl kollektive (z.B. SWOT) als auch analytische Methoden (z.B. FMEA) geeignet. Eine weit verbreitete und etablierte Methode, um wahrscheinliche Risiken möglichst lückenlos zu erfassen, ist die Szenarientechnik. In der Szenarientechnik werden Checklisten und Risikokataloge im Rahmen der Geothermie erstellt und systematisch abgearbeitet.

Nach der Risikoidentifikation erfolgt die Erfassung und Bewertung von Risikoereignissen in Form von Eintrittswahrscheinlichkeit und möglichem wirtschaftlichen Schaden. Da der errechnete Wert der Eintrittswahrscheinlichkeit lediglich für die Erzeugung eines Finanz- oder Risikowertes als Vergleichskennzahl herangezogen wird, genügt eine relativ grobe Einschätzung, z.B. in 10 % (unwahrscheinlich), 40 % (wenig wahrscheinlich) und 70 % (wahrscheinlich). Genauere Wahrscheinlichkeitsvorgaben sind möglich, jedoch für den Einzelfall nicht erkenntnisreicher, da das Ereignis letztlich unabhängig von der zuvor festgelegten Eintrittswahrscheinlichkeit eintreten kann oder auch nicht. Der aus der Eintrittswahrscheinlichkeit berechnete Finanzwert führt zu einer kosten-priorisierten Gewichtung des Risikoereignisses. Die Prioritätenliste ist letztlich die Grundlage für die getroffenen Maßnahmen zur Verringerung der Risikoeintrittswahrscheinlichkeit und der Schadensminimierung.

Zusammenfassend kann das Risikomanagement zu drei wesentlichen Prozessabläufen verdichtet werden [133].

1. Identifikation potenzieller Risiken in der Geothermie

2. Bewertung der Risiken (Eintrittswahrscheinlichkeit, wirtschaftlicher Schaden)
3. Maßnahmen zur Verringerung der Risiko-Eintrittswahrscheinlichkeit und der Schadensminimierung

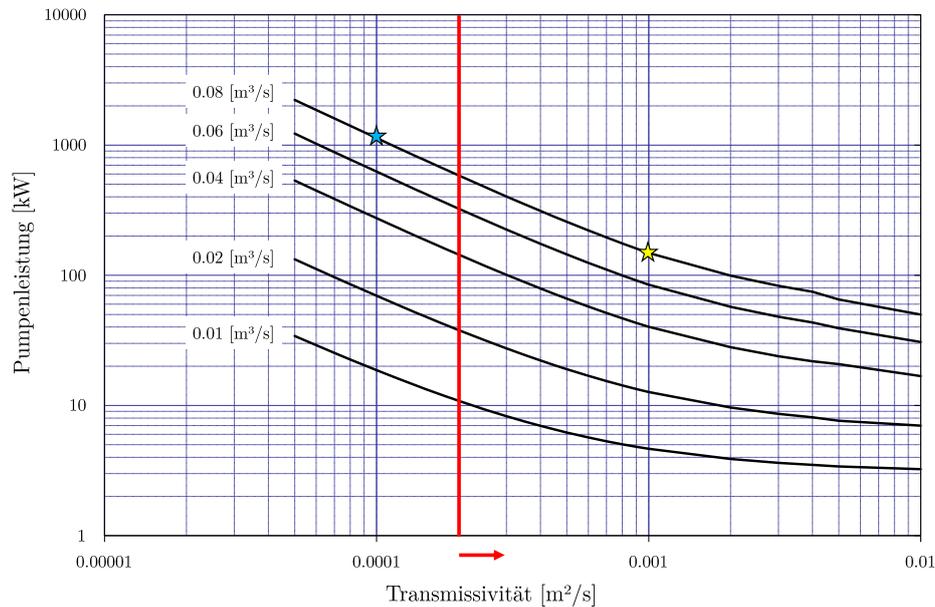
### 3.3.2. Fündigkeits- und Querschnittsrisiken

Nach einer Experten-Befragung von *trend:research* im Rahmen einer Studie zum Potenzial der Geothermie halten 42 % der Befragten das Fündigkeitsrisiko für das größte Problem von Geothermieprojekten [135]. Das Fündigkeitsrisiko kann bestimmt sein durch eine reduzierte thermische Ergiebigkeit, eine geringere Injektivität, eine ungünstige Veränderungen der Hydrochemie oder durch eine unerwünschte Sekundärfündigkeit.

Das Risiko, ein geothermisches Reservoir mit einer oder mehreren Bohrungen in nicht ausreichender Quantität oder Qualität zu erschließen, wird als quantitatives bzw. qualitatives Fündigkeitsrisiko bezeichnet. Die Quantität kann durch eine geringere thermische Leistung eines Förder- oder Injektionsstranges gefährdet sein und verhält sich proportional zur Förderrate  $Q$  und Temperaturdifferenz  $\Delta T$  (siehe Gleichung 6.7). Unter qualitativen Risiken sind im Vergleich zu den Voruntersuchungen ungünstigere Zusammensetzungen des Thermalwassers zu verstehen, die unter Umständen zu veränderten Betriebsbedingungen führen. Daraus könnte beispielsweise die Vorgabe einer niedrigeren Betriebstemperatur des Aquifers folgen.

Neben dem Wärmeinhalt und dem Temperaturniveau ist die Transmissibilität als Produkt aus Permeabilität und Mächtigkeit des Aquiferwärmespeichers ein wesentlicher Faktor, von welchem die Wirtschaftlichkeit der Nutzung des Aquifers stark abhängt. Nach den Bohrkosten bzw. den Investitionskosten stellen die laufenden Kosten für elektrische Energie die größte Kostenposition im Betrieb dar. Zur Förderung und zur Injektion des Thermalwassers wird elektrische Energie für den Antrieb der Pumpen bezogen. Die notwendige Pumpenleistung für die Förderung bzw. die Verpressung kann über den Produktivitätsindex  $PI$  (Gleichung 3.5) und den Ruhewasserspiegel der Bohrung berechnet werden. Für die wirtschaftliche Betriebsweise sollte ein hydrothermal genutzter Aquifer eine Mindesttransmissivität von  $2 \cdot 10^{-3} \frac{m^2}{s}$  (rote Linie in Abbildung 3.5) aufweisen [7].

### Kapitel 3. Integrale Planungsaspekte für die Realisierung eines Aquiferwärmespeichers



**Abb. 3.5.:** Zusammenhang zwischen Pumpenleistung und Transmissivität für Volumenströme von  $0,01 - 0,08 \frac{m^3}{s}$ , entnommen aus [7]

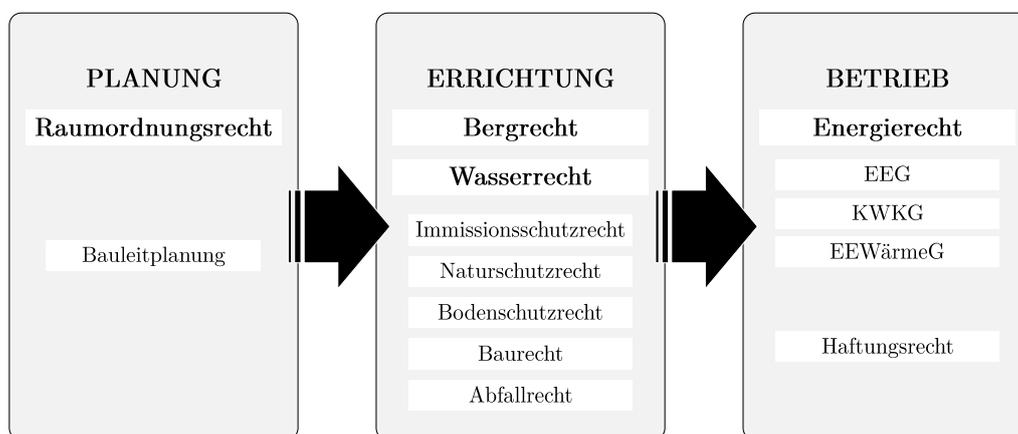
Für eine Produktivität von  $288 \frac{m^3}{h}$  bzw.  $0,08 \frac{m^3}{s}$  muss die Pumpe bei einer Aquifer-Transmissivität von  $1 \cdot 10^{-3} \frac{m^2}{s}$  etwa  $150 kW$  leisten (Betriebspunkt gelber Stern). Darin enthalten sind die zu überwindende Förderhöhe (etwa  $\frac{2}{3}$  der Leistung), die Druckverluste durch Reibung im Steigrohr (etwa 15%) sowie ein vorzuhaltender Bohrkopfdruck von  $2 bar$ . Für den Fall, dass die Aquifer-Transmissivität eine Größenordnung kleiner ist und  $1 \cdot 10^{-4} \frac{m^2}{s}$  beträgt, steigt die erforderliche Pumpenleistung bei gleichbleibendem Volumenstrom von  $0,08 \frac{m^3}{s}$  auf über  $1100 kW$  an (Betriebspunkt blauer Stern).

Die Angaben zur Mindestförderrate und -temperatur ergeben sich in der Regel aus den Wirtschaftlichkeitsüberlegungen und Kalkulationen des Betreibers. Angefangen von den stark variierenden Bohrkosten [130] bis hin zu unerwarteten Betriebskosten verbleibt auch bei sorgfältigen und tiefgehenden Voruntersuchungen ein Restrisiko für die wirtschaftliche Betriebsweise bestehen.

Je nach Projektreife und Planungstiefe ist es durchaus sinnvoll, bei der Investitionsrechnung eine Reserve von 20% oder mehr einzuplanen [133].

### 3.4. Rechtliche Dimension

In Deutschland unterliegt die Gewinnung von (tiefen-) geothermischer Energie dem Bundesberggesetz, dem Lagerstättengesetz (Anzeige- und Auskunftspflicht über geophysikalische Untersuchungen des Nutzungshorizontes), dem Wasserhaushaltsgesetz (Schutz und Nutzung von Grundwasser), den landesrechtlichen Wassergesetzen und in Abhängigkeit der obertägigen Anlage ggf. dem Baugesetzbuch [136]. Des Weiteren verfügen die Bundesländer über Leitfäden und Richtlinien, die die Vorgehensweise bei Geothermie-Projekten regulieren [137]. Für die Realisierung eines Aquifer-Wärmespeichers müssen einige rechtliche Fragestellungen bei der Planung im Vorfeld, bei der Errichtung und während des Betriebs geklärt werden (siehe Abbildung 3.6).



**Abb. 3.6.:** Überblick über die relevanten Rechtsfragen auf verschiedenen rechtlichen und zeitlichen Ebenen, eigene Darstellung, angelehnt an [8]

In der Planungsphase können sich Fragen bei der Raumordnung und bei der Bauleitplanung ergeben. Das Raumordnungsrecht beschränkt sich nicht nur auf obertägige Vorhaben, sondern lässt sich grundsätzlich auch auf unterirdische Nutzungen anwenden. Die Anwendung des Raumordnungsgesetzes setzt voraus, dass das jeweilige Vorhaben raumbedeutsam ist, das heißt es muss raumbeanspruchend und raumbeeinflussend sein. Die zunehmende Ressourcenknappheit des Planungsraumes *Untergrund* führt zu resultierenden Nutzungskonkurrenzen. So wird beispielsweise das Spannungsfeld zwischen Grundwasserschutz und Grundwassernutzung zunehmend verschärft werden. Das

### Kapitel 3. Integrale Planungsaspekte für die Realisierung eines Aquiferwärmespeichers

Raumordnungsrecht ermöglicht mit Gebietsausweisung die Steuerung von Nutzungen. Daraus können Vorranggebiete für bestimmte Nutzungen als Ziele der Raumordnung resultieren und Gebiete mit unvereinbarer Nutzung ausgeschlossen werden [138]. Somit können Flächen für die Wärmespeicherung in einem Aquifer gesichert werden und entgegenstehende Nutzungen können dort dann nicht mehr verwirklicht werden.

Im Rahmen der Errichtung von ATES-Anlagen spielen insbesondere das Berg- und das Wasserrecht eine Rolle, aber auch das Natur- oder Bodenschutzrecht können relevant sein. Das Bundesberggesetz (BBergG) regelt die Aufsuchung, Gewinnung und Aufbereitung von bergfreien und grundeigenen Bodenschätzen und ist für die Rohstoffgewinnung und die Bohrung in das Erdreich einschlägig. Es muss geklärt werden, ob im Fall der Aquiferwärmespeicherung ein Bodenschatz vorliegt, da Erdwärme den bergfreien Bodenschätzen gleichgestellt wird, sofern es sich um natürliche Vorkommen handelt [139]. Somit muss juristisch untersucht werden, ob und inwiefern bei der Ein- und Ausspeicherung Erdwärme natürlichen Ursprungs genutzt wird oder lediglich künstlich in das Erdreich eingebracht und wiedergewonnen wird. Die Einordnung als Bodenschatz hätte die Erfordernis von Berechtigungen und Betriebsplänen zur Folge.

Während des Betriebes können sich Besonderheiten bei der finanziellen Förderung ergeben, wenn der Aquiferwärmespeichern mit einer KWK-Anlage verknüpft ist. In Abhängigkeit des eingesetzten Brennstoffes können Förderungsmöglichkeiten nach dem Stromsteuergesetz (Befreiung der Stromsteuer), dem Energiesteuergesetz (Befreiung von der Brennstoffsteuer) oder über eine Einspeisevergütung bzw. Marktprämie erfolgen [8, 140].

Im Vergleich zum EEG 2012, in dem festgelegte Vergütungssätze festgeschrieben waren, geht das EEG 2014 den Weg der verpflichtenden Direktvermarktung und wechselt im Jahr 2017 in ein Ausschreibungsmodell [141].

Das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) sieht ebenfalls ein Ausschreibungsmodell für (konventionelle) KWK-Anlagen ab dem Winter 2017/18 vor. Nach dem Vorbild des EEG 2017 wird die Förderung bzw. Vergütung der KWK-Anlagen zwischen  $1\text{ MW}_{el}$  und  $50\text{ MW}_{el}$  ausgeschrieben werden. Weiterhin gibt es Fördermöglichkeiten für innovative KWK-Systeme und neue Vorgaben für Netze und Speicher [142].

### 3.5. Gesellschaftliche Dimension

Die gesellschaftliche Dimension ist bei der Planung von Aquiferwärmespeichern nicht zu unterschätzen, da die Geothermie im öffentlichen Diskurs zu den emotional besetzten Streitthemen zählt und eine rein sachlich-inhaltliche Diskussion nicht zwangsläufig gewährleistet ist. Insbesondere wenn wasserwirtschaftlich genutzte Trinkwasserreservoir tangiert werden (z.B. Wasserschutzgebiet Zone IIIb), müssen öffentliche Bedenken ernst genommen werden. Die frühzeitige Kommunikation und eine gesellschaftliche Akzeptanz können einer erfolgreichen Umsetzung zuträglich sein und Probleme sozialer Akzeptanz ggf. vermeiden.

Für Anlagenbetreiber stellt eine Öffentlichkeitsbeteiligung hingegen grundsätzlich ein Risiko dar, da die Umsetzung von Projekten verzögert oder komplett verhindert werden kann. Dies kann allerdings auch dann vorkommen, wenn keine rechtliche Verpflichtung zu einer Öffentlichkeitsbeteiligung besteht. Man kann mit [143] entlang der Dimensionen Bewertung (positiv, negativ) und Handlung (aktiv, passiv) vier verschiedene Reaktionsweisen der Bevölkerung auf Erneuerbare-Energien- (und Speicher-)Anlagen unterscheiden: die aktive Unterstützung (auch: Engagement), die (passive) Befürwortung, die (passive) Ablehnung und den (aktiven) Widerstand. Probleme gesellschaftlicher Akzeptanz bei Geothermievorhaben sind beispielsweise seit dem Vorfall induzierter Seismizität bei den Projekten in Basel und Landau bekannt. Tiefe und oberflächennahe Geothermie, Hydraulic Fracturing („Fracking“), Carbon Capture and Storage (CCS) und Bergbau wecken *primordiale Ängste* der Menschen vor Ort [144, 145]. Übertragungseffekte auf vergleichbare Vorhaben wie die Wärmespeicherung in einem Aquifer, die ebenfalls einen Eingriff in den Untergrund beinhalten, sind daher wahrscheinlich. Kommunikationsstrategien zur Akzeptanzsicherung adressieren überwiegend den passiven Teil der lokalen Bevölkerung. Ein aktiver Widerstand lässt sich nur in wenigen Fällen brechen oder durch Partizipationsangebote mildern. Bei der Ausgestaltung von Kommunikationsstrategien sollte nicht allein auf die Wissensvermittlung gesetzt werden und die unterschiedlichen Öffentlichkeiten sollten Berücksichtigung finden [146].

## 4. Modellierung und Aufbau einer Simulationsumgebung zur Durchführung von Energiesystemanalysen

In diesem Kapitel wird der Aufbau der Simulationsumgebung in *Transient Systems Simulation (TRNSYS)* [147] beschrieben, mit der anschließend Energiesystem- und Wirtschaftlichkeitsanalysen durchgeführt werden können.

Innerhalb der Simulationsumgebung können verschiedene Anlagenkonzepte simuliert und energetisch bewertet werden. Die Simulationsumgebung wird mit Hilfe der graphischen Benutzeroberfläche *Simulation Studio* schrittweise aufgebaut und bildet sämtliche Systemkomponenten, die Regelung und Steuerung der Komponenten sowie die Topologie der Hydraulik als integrales Gesamtmodell ab.

### 4.1. Aufbau der Simulationsumgebung in TRNSYS

Im Gegensatz zu Auslegungssoftware mit vorgefertigten Systemkonstellationen und graphischer Ergebnisauswertung (z.B. Hottgenroth, Polysun, T\*Sol) müssen lauffähige Systeme in TRNSYS komplett neu erstellt, parametrisiert und validiert werden [148]. Der Funktionsumfang von TRNSYS reicht weit über eine thermische Anlagensimulation hinaus, die Ausgabedetails und die Einarbeitungszeit sind vergleichsweise hoch [149].

#### **4.1.1. Beschreibung der Simulationssoftware**

TRNSYS ist ein leistungsstarkes Werkzeug zur Simulation von energietechnischen Anlagen und Gebäuden. Das Programm wurde 1974 am Solar Energy Laboratory der Universität von Wisconsin entwickelt und wird seitdem kontinuierlich, teilweise nutzerbasiert, weiterentwickelt.

Ein großer Vorteil von TRNSYS ist seine blockschaltbildorientierte Simulationsumgebung, die beliebig flexibel und offen ist. Der modulare Aufbau ermöglicht die Lösung einer Vielzahl von Problemen. Die Rechenzeiten sind im Vergleich zu konventioneller FEM-Software sehr kurz und ermöglichen umfangreiche Simulationsstudien. Insbesondere bei der Betrachtung auf Gesamtsystemebene ist TRNSYS durch seine Struktur ein effektives Simulationswerkzeug.

Bei den TRNSYS-Berechnungen werden sowohl algebraische als auch differentielle Gleichungen gelöst. Die Ermittlung der Lösung kann mit der Standard-Methode (sukzessive Substitution) oder mit der Methode nach Powell erfolgen [49, 147, 148]. Die genannten Methoden sind in [150] ausführlich beschrieben. Die in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Simulationen basieren auf dem Standardlösungsverfahren. In dem Lösungsverfahren werden die Komponenten in jedem Zeitschritt in einer festgelegten Reihenfolge aufgerufen und deren Quellcode nacheinander abgearbeitet. Dabei werden entsprechend der Reihenfolge die berechneten Ausgangsgrößen als Eingangsgrößen übergeben (siehe Informationsstruktur eines Komponentenmodells in Abbildung 4.1) und auf ein Konvergenzkriterium geprüft.

Die Toleranzwerte für die Integration der numerischen Lösung und der Konvergenz der Ausgangsgrößen werden in den globalen Parametern festgelegt und bestimmen die Genauigkeit des Ergebnisses. In der vorliegenden Arbeit wurden die Fehler-Toleranzgrenzen auf höchstens 1 % gesetzt, in vielen Fällen beträgt die Toleranzgrenze 0,1 %.

#### **4.1.2. Beschreibung des Modellaufbaus und der Anlagenkonzepte**

Der Aufbau der Simulationsumgebung erfolgt in drei Schritten. Im ersten Schritt wird das bestehende Nahwärmenetz gemäß Netztopologie und der Regelstrategie des Energieversorgers abgebildet (Bestandsanlage).

Anschließend wird der Aquiferwärmespeicher hydraulisch und regelungstechnisch in das System eingebunden. Um die niedrigen Rücklauftemperaturen aus dem Niedrigexergie-

Gebäude entkoppeln zu können, ist ein zweiter Pufferspeicher auf niedrigerem Temperaturniveau verbaut (Konzept I).

Nach der Integration des Aquiferwärmespeichers wird die Solarthermie als vollwertiger Erzeuger in das Gesamtsystem eingebunden, um die regenerative Heizleistung des Gesamtsystems zu erhöhen und zusätzliche Wärme in den Aquiferwärmespeicher einspeichern zu können. In diesem Konzept werden verschiedene Kollektortypen und Regelungsstrategien untersucht und hinsichtlich eines energetischen Optimums ausgelegt (Konzept II). In Kapitel 6 wird basierend auf dem energetischen Optimum die Wirtschaftlichkeit abgefragt und analysiert.

## 4.2. Modellierung der Systemkomponenten

Die Detailtiefe und Modellierungsgenauigkeit in TRNSYS ist im Vergleich zu anderen simulationsbasierten Auslegungshilfen hoch. Die Programmstruktur ermöglicht die modulare Zusammenstellung eines Gesamtsystems aus einzelnen Komponentenmodellen, sogenannten *Types*.

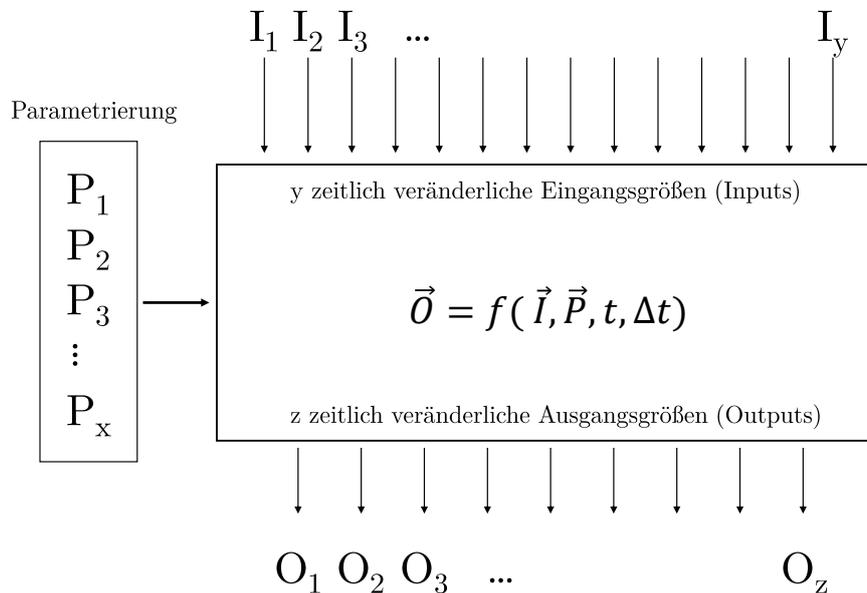


Abb. 4.1.: Informationsstruktur eines Komponentenmodells (Type) in TRNSYS

Jeder *Type* muss parametrisiert ( $P_1, P_2, \dots, P_x$ ) werden und berechnet in Abhängigkeit der Zeitschrittweite  $\Delta t$  aus den übergebenen Eingangsgrößen ( $I_1, I_2, \dots, I_y$ ) die Ausgangsgrößen ( $O_1, O_2, \dots, O_z$ ). Jeder *Type* hat eine charakteristische, von der Komplexität der Modellkomponente abhängige Anzahl an zeitveränderlichen Ein- bzw. Ausgangsgrößen und Parametern.

Das TRNSYS-Basispaket (*standard-types*) umfasst eine Vielzahl von Modulen zur Simulation des Verhaltens von Wärmeerzeugern, Pumpen, Reglern, Rohrleitungen oder Wärmeübertragern.

Zusätzlich gibt es für spezielle Anwendungen die Möglichkeit, benutzerdefinierte Fortran-Programmcodes zu verfassen, sogenannte *non-standard-types*. Da in der Simulationsumgebung dieser Arbeit zahlreiche Nicht-Standardanwendungen verwendet werden, sind die wesentlichen Systemkomponenten nachfolgend näher beschrieben.

#### 4.2.1. Blockheizkraftwerke

Die Grundlast des Nahwärmenetzes decken zwei *GE Jenbacher JMS312* Blockheizkraftwerke mit einer thermisch nutzbaren Nennleistung von  $670 \text{ kW}_{th}$ . Die Kraft-Wärme-Einheit stellt ein mit Biogas betriebener Gasmotor und eine Wärmeauskopplung über fünf kaskadierte Wärmetauscher. Der Generator kann eine elektrische Nennleistung (bei  $\cos(\phi) = 1$ ) von  $527 \text{ kW}_{el}$  abgeben. Die Stromkennzahl im Nennleistungspunkt beträgt 0,785. Die thermische Blindleistung, die aus der Heizzentrale abgeführt und rückgekühlt werden muss, beträgt etwa  $30 \text{ kW}_{th}$ .

Die Blockheizkraftwerke sind hydraulisch parallel geschaltet und beziehen ihren Rücklauf aus dem Pufferspeicher. Um eine konstante Zieltemperatur nach dem Abgaswärmeübertrager I (5. Kaskade) von  $95^\circ\text{C}$  einregeln zu können, wird bei Bedarf über eine Rücklaufbeimischung vorgewärmt. Die maximale Rücklauftemperatur  $T_{max,BHKW}$ , die in den Abgaswärmeübertrager II (1. Kaskade) eintreten darf, ist wegen der Gefahr einer Motorüberhitzung und eines schlechter werdenden Gesamtwirkungsgrades auf  $75^\circ\text{C}$  begrenzt.

Der Temperaturhub des jeweiligen Wärmeübertragers und die Kaskadierung der Wärmeauskopplung ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Die Abbildung der BHKWs wurde in TRNSYS durch den *Type 6* umgesetzt und mit der realen Regelung (Anwahlzeit, maximaler Volumenstrom, Zieltemperatur) bespielt. Die Regelung der Zieltemperatur erfolgt

über einen Frequenzumrichter der Drehzahl der Förderpumpe (*Grundfoss Effizienzpumpe*). Die elektrische Leistungsaufnahme der Pumpe und die maximale Fördermenge von  $23\,000 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$  sind in TRNSYS durch den *non standard Type 743* berücksichtigt.

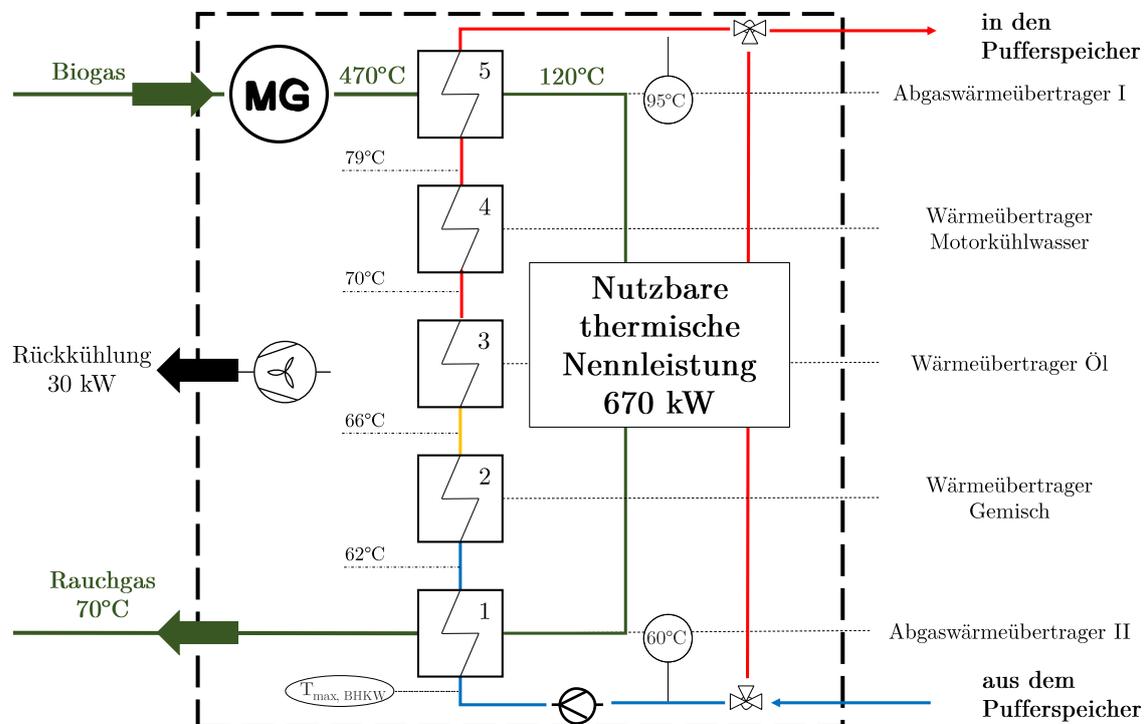


Abb. 4.2.: Modellierung eines Blockheizkraftwerkes mit Wärmeübertragungskaskade, Zieltemperaturregelung und Förderpumpe

In den Sommermonaten, wenn die Wärmeleistung der BHKWs zeitweise über der Leistung der Wärmeabnahme liegt, können die Module zur Taktzeitreduktion in den Teillastzustand wechseln. Gegenüber dem Nennleistungspunkt verhalten sich elektrischer und thermischer Wirkungsgrad im Teillastbereich gegenläufig. Der thermische Wirkungsgrad steigt von 51 % (bei Nennlastbrennstoffzufuhr) auf 54 % (bei 50 % der Nennlastbrennstoffzufuhr) an. Der elektrische Wirkungsgrad hingegen fällt von 40 % auf 36 %. Da der höherwertige Strom vermarktet wird, beschränkt sich die Teillast unter Inkaufnahme eines schlechteren elektrischen Wirkungsgrades auf minimal 80 % der Nennlast.

In der Simulationsumgebung sind die Wärmeleistung, die Zieltemperatur, der maximale Massenstrom, die elektrische Nennleistung der Pumpe und das Teillastverhalten

berücksichtigt und können parametrisiert werden. Die Anzahl der Startvorgänge und die Taktzeiten der BHKWs können ebenfalls ausgewertet werden.

Da der Fokus der Betrachtungen auf der Maximierung der Laufzeiten und des erneuerbaren Energien-Anteils liegt, werden in der Modellierung Anfahrzeiten, Netzsynchro- nisierung, Wartungs- und Einspeisemanagementzeiten vernachlässigt.

#### 4.2.2. Spitzenlastkessel

Die Spitzenlastkessel sind zwei mit konventionellem Erdgas befeuerte Heizaggregate mit einer thermisch nutzbaren Nennleistung von  $3500 kW_{th}$  bzw.  $6500 kW_{th}$ . Die beiden Heiz-Aggregate und ihre Förderpumpen sind wie in Abschnitt 4.2.1 durch den *Type 6* bzw. den *Type 743* abgebildet.

In der Simulationsumgebung sind die Wärmeleistung, die Zieltemperatur, der maximale Massenstrom, die elektrische Nennleistung der Pumpe und die Mindestlastanforderung berücksichtigt und können parametrisiert werden.

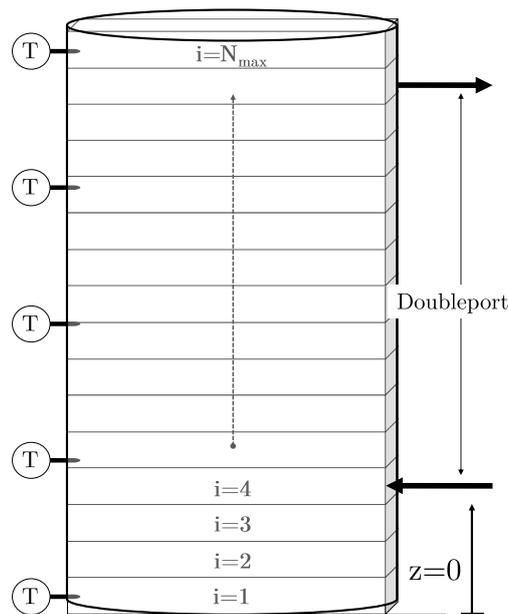
#### 4.2.3. Pufferspeicher (Multiport-Modell)

Die Genauigkeit der abbildbaren Speicherschichtung gewinnt wegen der sensiblen Regelung über den Speicherladezustand stark an Bedeutung. Für die Modellierung des Pufferspeichers wurde aus Gründen der Genauigkeit und schnellen Rechenzeit [151] das Multiport-Modell [152] verwendet. Das Modell löst eine differentielle Energiebilanz und unterteilt den Speicher in gleichgroße Volumen-Segmente ( $i_{Sto}=1$  bis  $i_{Sto}=N_{max}$ ), innerhalb derer von einer vollständigen Durchmischung ausgegangen wird. Das Modell berechnet für jede Speicherschicht eine einheitliche Temperatur. Je höher die gewählte Knotenzahl  $N$  ist, desto feiner kann die Speicherschichtung abgebildet werden. In Abhängigkeit von der gewählten Knotenzahl können die Abweichungen der Simulationsergebnisse auf Gesamtsystemebene (z.B. der KWK-Anteil) mehrere Prozent betragen.

Der Speicher kann über bis zu zehn Doubleports direkt be- oder entladen werden. Ein Doubleport ist ein hydraulisches Rohrpaar, das dem gleichen funktionalen Kreislauf zugehört. Somit können bis zu zehn verschiedene hydraulische Kreisläufe an den Speicher angeschlossen werden. Die Höhe der Ein- und Auslässe ist individuell einstellbar.

Des Weiteren ist eine indirekte Be- oder Entladung über die vier im Modell integrierten

Wärmeübertrager möglich. Diese sind im Modell je nach Parametrierung als interne- oder Mantelwärmeübertrager implementiert. Ist davon auszugehen, dass die Wärmequellen nicht ausreichen, um eine vorgegebene Temperatur im Speicher halten zu können, kann eine elektrische Nachheizung vertikal oder horizontal auf gewünschter Speicherhöhe eingesetzt werden. Zusätzlich besitzt der Speicher fünf integrierte Temperatursensoren, deren Positionen relativ zur Speicherhöhe ( $0 \leq z_{Sensor} \leq 1$ ) verändert werden können (Abbildung 4.3).



**Abb. 4.3.:** Aufbau und Funktionsweise des Knotenmodells des Pufferspeichers und Berechnung der Schichtung im Multiport-Modell (Type 340)

Die Wärmeverlustrate des Speichers zur Umgebung kann separat für die Boden- und Deckelfläche sowie für bis zu vier Zonen des Speichers berechnet werden. Die relative Mantelfläche einer Zone mit einheitlicher Wärmeverlustrate ergibt sich aus der Aufteilung der vier Mantelflächen, die in Summe eins ergeben müssen.

Da der Pufferspeicher in einer Heizzentrale mit relativ konstanten Umgebungstemperaturen steht, werden die Wärmeverluste einheitlich über die Hüllfläche berechnet, ohne zwischen Boden, Mantel- und Deckelfläche zu unterscheiden. Die Berechnung der Wärmeverlustrate  $WVR$  für nichterdvergrabene zylinderförmige Stahlspeicher mit

kurzen Speicherintervallen und einem Volumen zwischen  $50 - 500 \text{ m}^3$  kann in Anlehnung an [153] über das Volumen des Pufferspeichers  $V_{PS}$  (in  $\text{m}^3$ ) berechnet werden:

$$WVR = 2,24 \cdot (V_{PS})^{0,63} \left[ \text{in } \frac{\text{W}}{\text{K}} \right] \quad (4.1)$$

Die Energiebilanz, der Aufbau des Berechnungsrasters und die einzelnen Terme der Differentialgleichung sind in der Dokumentation des *Type 340* [152] und in [154] näher beschrieben. Wenn nicht explizit erwähnt, werden für die Simulationen Speicher mit gutem Schichtungsvermögen (10 Knoten pro Meter Speicherhöhe) verwendet.

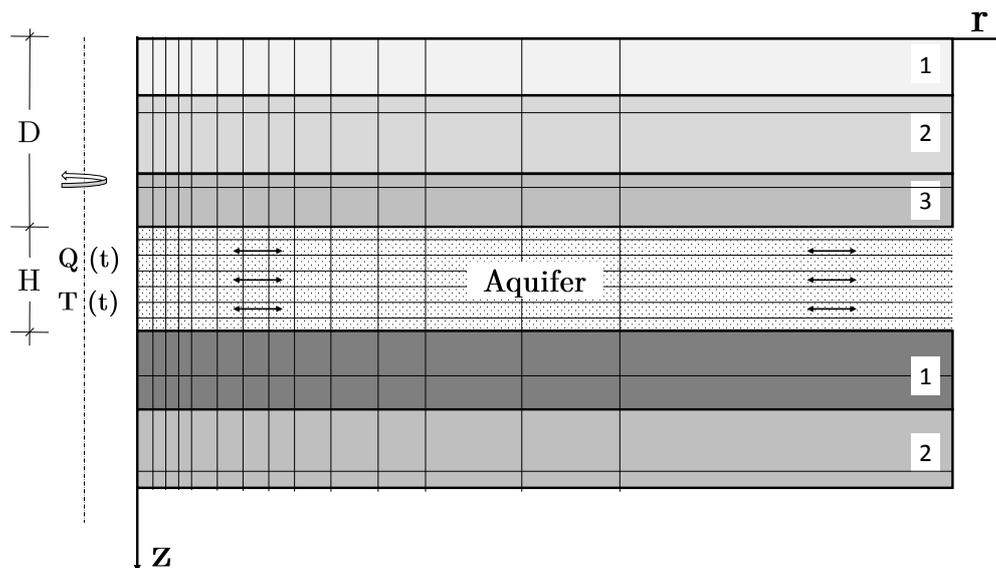
#### 4.2.4. Aquiferspeicher (TRNASt-Modell)

Voraussetzung für Energiesystem- und Wirtschaftlichkeitsanalysen sind zahlreiche Variantenrechnungen über Mehrjahreszeiträume von bis zu 30 Jahren bei kurzen Rechenzeiten und gleichzeitiger Abbildung der wesentlichen Wärmetransportvorgänge. Mit dem *TRNASt-Modell* [155] steht eine modifizierte Version des *AST Modells* [156] für die Einbindung in TRNSYS zur Verfügung. Das *TRNASt-Modell* ist eine zwei Brunnen-Erweiterung zur Simulation des Betriebsverhalten eines Aquiferwärmespeichers mit einer Dublette (Paarung aus einer Produktions- und einer Injektionsbohrung). Das Modell wurde mehrfach mit Messdaten einer Bestandsanlage validiert [157] und resultierende Ergebnisse aus dem Modell wurden mit Simulationsergebnissen anderer numerischer Modelle verglichen [9].

Das *TRNASt-Modell* berücksichtigt den konvektiven und den konduktiven Wärmetransport im Untergrund. Zur Reduktion der Komplexität wird eine rein radiale Wasserströmung im Einzugsbereich der Bohrungen angenommen. Zusätzlich wird das Liegende und Hangende zu einer homogenen, mit konstanter Mächtigkeit auftretenden Formation vereinfacht. Die Anzahl und Dicke der angrenzenden geologischen Gesteine mit unterschiedlichen Bodenkennwerten wie thermische Wärmeleitfähigkeit ( $\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ ), volumetrische Wärmekapazität ( $\frac{\text{J}}{\text{m}^3\cdot\text{K}}$ ) und Mächtigkeit der Schicht ( $m$ ) werden in einem Gitternetz parametrisiert. Dieses Gitternetz wird als externe Datei eingelesen und richtet das interne *TRNASt-Modell* (*Type 345*) entsprechend ein. Für jeden Zeitschritt  $t$  wird ein radialsymmetrisches Temperaturfeld ( $T = f(r,z,t)$ ) berechnet und entsprechend des angelegten Gitternetzes wird für jede Zelle eine Temperatur berechnet. Aus dem sich

einstellenden Temperaturfeld im Untergrund, einem parametrierbaren, geologischen Temperaturgradienten und dem Modell übergebenen Eingangsgrößen werden die Ausgangsgrößen in Form von Austrittstemperaturen, Massenstrom und Leistung für jeden Simulationsschritt berechnet. Eine Übersicht über die Informationsstruktur des Modells findet sich im Anhang A.3 wieder.

In Abbildung 4.4 ist der Aufbau des *TRNAST-Modells* mit exemplarischem Gitternetz und drei über- und zwei unterlagernden Schichten skizziert.



**Abb. 4.4.:** Exemplarisches TRNAST-Gitternetz des Untergrundes zur Berechnung der Wärmespeicherung um ein in z-Richtung liegenden Injektionsstrang mit drei überlagernden Schichten der Gesamt-Mächtigkeit  $D$  und zwei den Aquifer unterlagernden Schichten. Der Mittelpunkt der Bohrung und die Radialsymmetrie sind durch die gestrichelte Linie parallel zur z-Achse angedeutet.

Weiterhin sind in dem Modell die charakteristischen Bodenkennwerte, wie die vertikale und horizontale Dispersionslänge, berücksichtigt. Der Wärmetransport durch die Dispersion ist näherungsweise über die Entropieerhaltung berücksichtigt.

Die genaue Modellierung der Wärmetransportvorgänge (Konvektion, Konduktion und Dispersion) ist in [155] beschrieben. Weitere numerische Modelle thermohydraulischer Prozesse im Untergrund zur Modellierung von porösen Aquiferen können aus [50, 84, 158] entnommen werden.

#### 4.2.5. Solarkollektoren

In der solarthermischen Simulation mit TRNSYS haben sich zur Abbildung des dynamischen Verhaltens von Solarkollektoren im Wesentlichen zwei validierte Modelle durchgesetzt. Das *Matched-Flow-Collector-Model* (MFC) und das *Dynamic-Collector-Model* (QDT) [47, 49, 148, 153].

Die resultierende Abweichung der jährlichen Kollektor- und Systemerträge der unterschiedlichen Kollektormodelle betrug für die durchgeführten Simulationsstudien im Mittel etwa 1 %.

**Tab. 4.1.:** Vergleich der Simulationsergebnisse unter Verwendung der verschiedenen Kollektormodelle für ein exemplarisches Gesamtsystem mit  $2000\text{ m}^2$  Kollektorfläche ausgewertet für das 1. Simulationsjahr

Modell	$Q_{sol}$	$Q_{spec}$	$\eta_{Coll}^1$	HRF	Regenerativ	Fossil	Abweichung $HRF$
QDT	984 MWh	491,8 $\frac{kWh}{m_{AP}^2}$	42 %	40,2 %	83,8 %	16 %	[-]
MFC	979 MWh	489,3 $\frac{kWh}{m_{AP}^2}$	41,8 %	40,5 %	83,7 %	16,3 %	+0,3 %

##### 4.2.5.1. Matched-Flow-Collector-Model (Type 301)

Das *Matched-Flow-Collector-Model (Type 301)* ist ein etabliertes und mit Messdaten validiertes Modell von Per Isakson [159]. Das *plug-flow* Strömungsmodell berücksichtigt die Wärmekapazität des Kollektors, die Verweildauer des Fluides im Kollektor und bietet Optionen für die Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit des Wärmedurchlasskoeffizienten des Kollektors. Grundsätzlich kann zwischen verschiedenen dynamischen Kollektormodi und optischen Modellen zur Winkelkorrektur unterschieden werden. Das Komponentenmodell *Type 301* basiert auf einer partiellen Differentialgleichung und einem Quellterm  $q(T)$ . Zur Beschreibung des Quellterms wird der quadratische Effizienzansatz nach Gleichung 4.3 verwendet.

---

<sup>1</sup>Der Kollektorwirkungsgrad definiert die im Kollektor auf das Fluid übertragene Wärmemenge in Bezug auf die jährliche Einstrahlung auf die Kollektorebene

$$(C_{eff,col} + V_f \cdot \rho c_p) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + m_c \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = q(T) \quad (4.2)$$

$$q(T) = S - \alpha_1 \cdot (T - T_{amb}) - \alpha_2 \cdot (T - T_{amb})^2 - \alpha_w \cdot v_w \cdot (T - T_{amb}) - \alpha_r \cdot (T - T_r) \quad (4.3)$$

$$S = E \cdot (IAM(I_b) \cdot G_b + IAM(I_d) \cdot G_d + IAM(I_g) \cdot G_g) \quad (4.4)$$

Die absorbierte Solarenergie  $S$  wird über die jeweiligen Winkelkorrekturfaktoren (engl. *incident angle modifier IAM*) der Strahlungsanteile berechnet. Die Winkelkorrekturfaktoren können als externe Datei eingelesen werden oder über die Ambrosetti-Gleichung bestimmt werden.

#### 4.2.5.2. Dynamic-Collector-Model (Type 832)

Das *Dynamic-Collector-Model (Type 832)* ist eine Erweiterung des Modells von Bengt Perers und Chris Bales, das im Rahmen der *IEA Task 26* [160] zur Simulation von solaren Kombisystemen erstellt wurde [161]. Die Berechnung der nutzbaren Wärmeleistung erfolgt nach dem quasi stationären Messverfahren ohne Nachführung, nach welcher der Kollektor in 4 Arbeitspunkten bei unterschiedlichen Wetterbedingungen vermessen wird. Die spezifische Leistungsbeschreibung eines Kollektors erfolgt über eine Faktorengleichung gemäß Gleichung 4.5, die über ein nicht-iteratives Matrixverfahren zur Minimierung des Fehlers bei der Ausgangsleistung des Kollektors verwendet wird. Im Vergleich zur Methode des stationären Zustandes bietet diese Berechnungsmethodik einige Vorteile, wie einer vollständigeren Charakterisierung des Kollektors durch ein erweitertes Parameter-Set [162].

$$\begin{aligned} \frac{\dot{Q}}{A_B} &= F'(\tau\alpha) \cdot K_{\theta b}(\theta) \cdot I_b + F'(\tau\alpha) \cdot K_{\theta d} \cdot I_d - c_{w,F'} \cdot u_w \cdot (I_b + I_h) \\ &- c_{IR} \cdot (I_{IR} - \sigma \cdot (T_{amb})^4) - \alpha_1 \cdot \Delta T_{amb} - \alpha_2 \cdot |\Delta T_{amb}| \cdot \Delta T_{amb} \\ &- c_{w,hl} \cdot u_w \cdot (\Delta T_{amb}) + \dot{q}_{lat} - C_{eff} \cdot \frac{\partial \vartheta_m}{\partial t} \end{aligned} \quad (4.5)$$

mit

$$\Delta T_{amb} = \vartheta_m - \vartheta_{amb}, u_w = wf \cdot u_{w,0} \text{ und } I_{IR} = rf \cdot I_{IR,0}$$

Die Eingabeparameter für das *Dynamic-Collector-Model* können aus den Zertifikaten des Prüfsiegels *Solar Key Mark* entnommen werden. Somit kann der *Type 832* kollektorspezifisch und qualitätsgesichert parametrisiert werden. Eine detaillierte Dokumentation der verwendeten Kollektorgleichungen zur Leistungsbeschreibung sind in der Dokumentation des Modells [163] hinterlegt und orientieren sich an der *ISO 9806-3* und [161].

Mit dem verwendeten Modell ist es möglich, mehrere Knoten in Strömungsrichtung des Fluides zu simulieren sowie Wärmegevinne durch Kondensation und Frost zu berücksichtigen. Durch das Mehrknotenmodell können auch mehrere seriell verschaltete Kollektoren im *Low Flow Betrieb* korrekt abgebildet werden. Die Subroutine des Modells beinhaltet ein Stabilitätskriterium, das die Modellstabilität bei sehr kleinen Massenströmen und/oder sehr großen Flächen sicherstellen soll.

$$\frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot N_{\text{Segmente}} \cdot dt}{C_{\text{eff}} \cdot A} \geq 0,5 \quad (4.6)$$

Simulationen haben gezeigt, dass die Modellstabilität bei sehr kleinen Massenströmen durch den Kollektor nicht immer gewährleistet werden kann.

#### 4.2.6. Tiefenpumpen (Type 742)

In Abschnitt 3.2.1 ist beschrieben, welche Pumpentypen grundsätzlich zur Förderung von Thermalwässern in Frage kommen. Die notwendige Leistung der Pumpe hängt unter anderem von dem Ruhewasserspiegel (*static fluid level*), dem dynamischen Wasserspiegel (*dynamic fluid level*), dem Bohrkopfdruck, den Reibungsverlusten und dem Produktivitätsindex der Bohrung ab. Die Leistungs-Berechnung wird in Abschnitt 3.2.1 näher beschrieben.

In der Simulationsumgebung wird ein lineares Teillastverhalten der Pumpenleistung in Abhängigkeit der Fördermenge angenommen, welche für Produktivitätsindizes  $> 50 \frac{\text{m}^3}{\text{h} \cdot \text{MPa}}$  näherungsweise zutrifft [164]. Vereinfachend wird ein Aquifer in derart gespannten Verhältnissen angenommen, dass sich der Ruhewasserpegel an der Geländeoberkante befindet und die elektrische Leistungsaufnahme im Auslegungspunkt der Aufrechterhaltung des notwendigen Bohrkopfdruckes und der Überwindung der Rohrreibungsverluste entspricht. Des Weiteren wird angenommen, dass sich die elektrische

Leistungsaufnahme der Pumpe linear proportional zur Fördermenge verhält.

Die zwei Tiefenpumpen werden in TRNSYS durch den *Type 742* abgebildet. Das Pumpenmodell berechnet die Leistungsaufnahme über einen Druckverlust bei Nennleistung. Der berechnete Druckverlust wurde über den geschätzten Produktivitätsindex aus der Machbarkeitsstudie [9] berechnet und beträgt 12 bar bei Nennleistung. Die Motoreffizienz beträgt 88 %, der Gesamtwirkungsgrad der Pumpe 48 %.

#### 4.2.7. Erdvergrabene Wärmetrassen (Type 313)

Die Wärmeverluste eines Nahwärmenetzes, die auf das Verteilernetz zurückzuführen sind, können mehrere Prozent der Wärmeerzeugung betragen [49]. Eine entsprechende Berücksichtigung der Verteilverluste in der Simulationsumgebung findet durch den *Type 313* statt. Das Modell wurde gegen Messdaten eines schwedischen Nahwärmenetzes validiert [165].

Im Gegensatz zu den TRNSYS-Standardkomponenten für die Abbildung von Rohrleitungen, kann der *Type 313* die gegenseitige thermische Beeinflussung von *Twin-Pipes* (Vor- und Rücklauf sind in einer Dämmung gefasst) abbilden. Durch die Vorgabe der Einbautiefe und der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes können erdvergrabene Wärmetrassen in der Ausführung als Einzeltrasse mit getrenntem Vor- und Rücklauf oder als *Twin-Pipe* simuliert werden.

#### 4.2.8. Wärmeübertrager mit Zieltemperaturregelung (Type 810)

Das Wärmeübertragermodell *Type 810* wurde von Stefan Kranz am Deutschen Geoforschungs-Zentrum (GFZ) Potsdam entwickelt. Das Modell nutzt die *NTU-Methode* [166] zur Berechnung des Wärmeübergangs. Das Teillastverhalten wird über einen Teillastexponenten berücksichtigt.

Das Wärmeübertragermodell kann im Gegenstrom, Parallelstrom oder im Kreuzstrom betrieben werden. Weiterhin kann eine der beiden Austrittstemperaturen (heiße Seite oder kalte Seite) durch Vorgabe einer Zieltemperatur festgelegt werden. Welcher Massenstrom die Führung der Regelung übernimmt, kann ebenfalls vorgegeben werden. Das Design des Wärmeübertragers und das Wärmeträgermedium werden durch die Parameter festgelegt.

#### 4.2.9. Abnehmersysteme

Die Heizzentrale versorgt insgesamt drei Abnehmersysteme. Den Campus der Leuphana Universität, das Wohngebiet Bockelsberg und seit Mitte 2016 auch das neue Zentralgebäude der Universität. Die Steuerung und Regelung der Abnehmersysteme *Campus* und *Bockelsberg* erfolgt über eine Differenzdruckregelung von drei Netzpumpen.

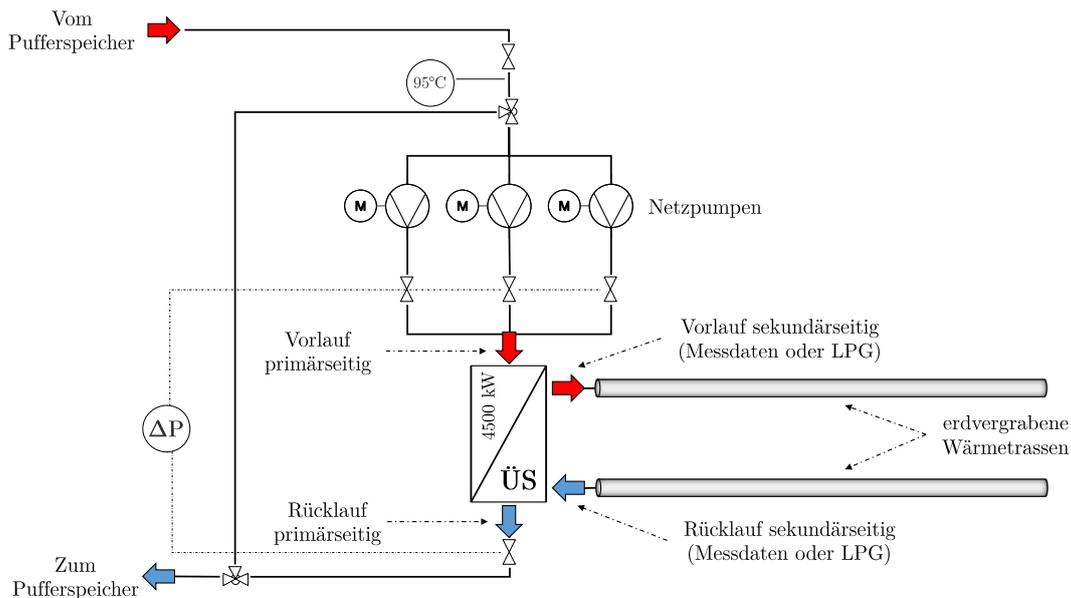


Abb. 4.5.: Modellierung eines Abnehmersystems mit Netzpumpen, Übergabestation und Wärmetrasse

Für den Netzabgang werden zwei parallele Vorlaufpumpen auf einen frei einstellbaren Differenzdruck-Sollwert geregelt. Beide Pumpen werden über je einen Frequenzumrichter in der Drehzahl geregelt. Als Redundanz dient eine dritte Pumpe. Um eine gleichmäßige Nutzung der Netzpumpen zu garantieren und um ein Festsetzen der Pumpe zu verhindern, erfolgt eine automatische Führungsumschaltung.

In der Simulationsumgebung werden die zwei Netzpumpen zu einer Umwälzpumpe zur Überwindung der Rohrleitungsverluste über den *Type 743* zusammengefasst. Die elektrische Leistungsaufnahme bei einer maximalen Fördermenge von  $52\,000 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$  beträgt  $10 \text{ kW}_{el}$  und nimmt im Teillastbereich linear ab.

In der Simulationsumgebung wird der primärseitige Massenstrom so berechnet, dass die

übertragene Wärmeleistung an der Übergabestation (ÜS) gleich der für den jeweiligen Zeitschritt gemessenen Wärmeleistung ist (siehe Abbildung 4.5). Durch den gewählten Modellansatz weichen die jährlich gemessenen Wärmemengen an den Übergabestationen und die simulierten Wärmemengen weniger als 0,1 % voneinander ab.

#### **4.2.10. Umwälzpumpen, Ventile und andere Hydraulikkomponenten**

Die in der Simulationsumgebung verwendeten Hydraulikkomponenten, wie Umwälzpumpen und Ventile werden hier nicht näher beschrieben, da sie durch eine standardmäßige Abbildung berücksichtigt sind und hinsichtlich der Modellbildung keine Besonderheit darstellen.

Weitere hydraulische und mechanische Systemkomponenten zur Enthärtung, Druckhaltung oder Dosierung der Anlage sind in der Simulationsumgebung nicht enthalten.

### **4.3. Grundlegendes Regelungskonzept und Systemführung**

In diesem Kapitel wird das Regelkonzept und die prinzipielle Systemführung beschrieben, die nach dem Vorbild der umgesetzten Regelung der Bestandsanlage erfolgt. In der Bestandsanlage ist eine individuell konfigurierbare Automatisierungslösung für große und mittlere Heizkraftwerke, die *HEAT 2 Efficiency Advanced* Lösung der *Bilfinger GreyLogix GmbH* implementiert.

Die Automatisierungslösung kann umfangreiche Mengengerüste und eine Vielzahl an Regelkreisen bewältigen. Alle Daten und Bedienmöglichkeiten der Anlage werden visualisiert und über ein Bedienpanel angezeigt. Die Überwachung und manuelle Bedienung wird seitens des Energieversorgers durch einen Anlagenverantwortlichen sichergestellt. Im Vorfeld und während der Modellierung fanden mehrere Vor-Ort-Anlagenbesichtigungen und Gespräche mit dem Anlagenverantwortlichen statt.

#### **4.3.1. Speicherladezustand als Systemführungsgröße**

Die zentrale Führungsgröße der gesamten Regelstrategie ist der Speicherladezustand. Die regelungstechnische Einbindung des Pufferspeichers erfolgt über eine *Siemens SIMATIC S7-Softwareapplikation*, die zum einen den Pufferladezustand (PLZST) berechnet

und zum anderen einen Pufferladetrend, der anzeigt ob der Pufferspeicher entladen bzw. beladen wird. Der Pufferladetrend wird nach einer frei einstellbaren Zeit aktualisiert.

Der Pufferspeicher dient in klassischen Nahwärmesystemen zur Glättung von kurzfristiger Leistungsspitzen, zur Reduktion von Taktzeiten der Wärmeerzeuger und stellt eine Art hydraulische Weiche dar, die den Erzeuger- und Verbraucherkreis ausgleicht. Zudem kann der Pufferspeicher für die Druckhaltung genutzt werden.

Der Pufferladezustand PLZST ist abhängig von den Temperaturen der Pufferspeichersensoren ( $T_{Sen,PS}$ ), von den zustandsabhängigen Temperaturen für den Wert "Leer" (0 %) und "Voll" (100 %). Der Pufferladezustand (0 – 100 %) berechnet sich für jeden Zeitschritt  $t$  über eine Steigung der Sensor-Temperaturen  $T_{Sen,PS}$ , die von oben nach unten im Pufferspeicher gemessen werden.

$$PLZST = \left(1 - \frac{(T_{Voll} - T_{SP,av})}{(T_{Voll} - T_{Leer})}\right) \cdot 100 = f(T_{Sen,PS}, T_{Leer}, T_{Voll}, T_{min,WE}, \Delta T_{add}, t) \quad (4.7)$$

Die mittlere Speichertemperatur  $T_{SP,av}$  wird über das arithmetische Mittel der *plug-in* Sensortemperaturen des Pufferspeichers berechnet. Die Temperatur  $T_{Voll}$  definiert sich aus einer minimalen Temperatur der Wärmeerzeuger  $T_{min,WE}$  zuzüglich einer frei einstellbaren, konstanten Temperaturbeaufschlagung  $\Delta T_{add}$  zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit.

$$T_{Voll} = T_{Min,WE} + \Delta T_{add} \quad (4.8)$$

Die Temperatur  $T_{Leer}$  berechnet sich aus einer gleitenden Mittelwertbildung der Netzurücklauftemperaturen über ein frei einstellbares Zeitintervall.

$$T_{Leer} = \bar{T}_{RL,av} = \frac{1}{x} \cdot \sum_{t=1}^x T_{RL}(t) \quad (4.9)$$

Da der Ladezustand des Pufferspeichers über eine lineare Steigung zwischen den Temperaturen  $T_{Voll}$  ( $\cong 100$  %) und  $T_{Leer}$  ( $\cong 0$  %) berechnet wird und sich diese Grenztemperaturen über das Jahr ändern, findet eine dynamische Speicherladezustandsberechnung statt. Diese dynamische Berechnungsmethodik berücksichtigt die Tatsache, dass im Sommer grundsätzlich niedrigere Speichertemperaturen ausreichend sind, um die not-

wendigen Vorlauftemperaturen bereitzustellen. Dementsprechend sind die Temperatur-Regelhysteresen im Sommer größer.

In den Sommermonaten sind die Vorlauftemperaturen der Abnehmernetze entsprechend der Heiznetzkurven des Wärmesystems geringer als im Winter. Die Rücklauftemperaturen steigen in den Sommermonaten hingegen aufgrund einer geringeren Wärmeabnahme der Verbraucher an. Aufgrund der außentemperaturgeführten Bestimmung der Vorlauftemperaturen des Heiznetzes nehmen die erforderlichen Heiznetztemperaturen mit zunehmender Außentemperatur ab. Die notwendige Temperatur  $T_{voll}$  ist im Sommer geringer. Aus beiden Sachverhalten resultiert eine geringere Differenz zwischen  $T_{voll}$  und  $T_{Leer}$  in den Sommermonaten und bei gleichen durchschnittlichen Temperaturen im Speicher folgen unterschiedliche Pufferladezustände. Im Sommer ist der Speicher bereits bei niedrigeren Temperaturen „durchgeladen“. Im Winter, wenn die Rücklauftemperaturen niedriger sind und die erforderlichen Heiznetz-Vorlauftemperaturen höher sind, muss der Speicher im Temperaturmittel höhere Temperaturen erreichen, um den gleichen Speicherladezustand zu erreichen (siehe Tabelle 4.2).

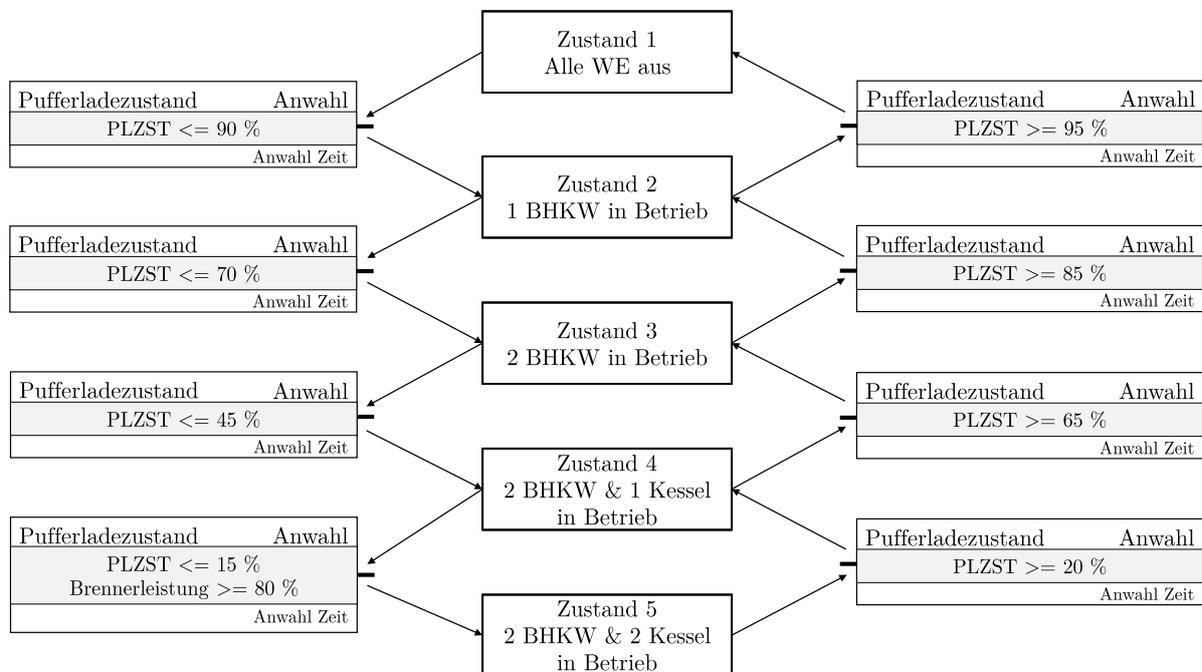
**Tab. 4.2.:** Momentaufnahme einer exemplarischen Pufferladezustandsberechnung bei gleicher mittlerer Speichertemperatur in den Wintermonaten und in den Sommermonaten

	Winter	Sommer
$T_{voll}$	95 °C	80 °C
$T_{Leer}$	55 °C	55 °C
$T_{SP,av}$	67 °C	67 °C
Pufferladezustand	30%	48%

### 4.3.2. Folgeschaltung der Wärmeerzeuger

Der Speicherladezustand ist die Führungsgröße der Folgeschaltung der Wärmeerzeuger und über die Hierarchie der Versorgungszustände definiert. Die Folgeschaltung ist in Form eines Petrinetzes aufgebaut. Wenn die An- bzw. Abwahlbedingung für eine vordefinierte Zeitspanne erfüllt ist, wird in den nächsten Zustand gesprungen und ein Wärmeerzeuger wird zu- bzw. abgeschaltet. Es kann immer nur ein Zustand aktiv sein. Der Sprung erfolgt linear, so dass immer nur in den benachbarten Zustand geschaltet

werden kann. Die individuellen Regel-Hysteresen (An- und Abwahlkriterien in Abhängigkeit des Pufferladezustandes) der jeweiligen Wärmeerzeuger unterscheiden sich je nach Anlagenkonzept und Saison (4.6).



**Abb. 4.6.:** Petri-Netzstruktur der regelungstechnischen Folgeschaltung der Wärmeerzeuger mit beispielhaften Regelhysteresen in den Wintermonaten

Wenn der Speicher im Winter zu über 95 % geladen ist, sind alle Wärmeerzeuger aus (*Zustand 1*). Sinkt der Speicherladezustand ab, werden die Wärmeerzeuger sequentiell zugeschaltet. Bei zunehmendem Speicherladezustand werden die Wärmeerzeuger gemäß ihrer Hysteresen wieder abgeschaltet. Der Speicherladezustand definiert den nutzbaren Energieinhalt des Speichers für jeden Simulationszeitschritt und bringt die Speichersensortemperaturen mit den Grenztemperaturen  $T_{Voll}$  und  $T_{Leer}$  in Abhängigkeit. Tendenziell ist der Speicher in den Sommermonaten trotz der dynamischen Speicherladezustandsberechnung auf einem höheren Temperaturniveau und ist "voll durchgeladen"(95 %). Im Schnitt ist der Speicher im Sommer etwa 1,5 – 2 °C wärmer.

Die Regelhysteresen sind in Abbildung 4.7 gut erkennbar. Aus Redundanzgründen sind die Spitzenlastkessel überdimensioniert, so dass der Pufferspeicher in den Wintermonaten zu keinem Zeitpunkt unter 45 % fällt und *Zustand 5* ( $PLZST \leq 15\%$ ) nicht eintritt.

Beim Wechsel in die Sommermonate ändert sich das Anwahlkriterium des Führungs-Spitzenlastkessels von 45 % auf 20 %.

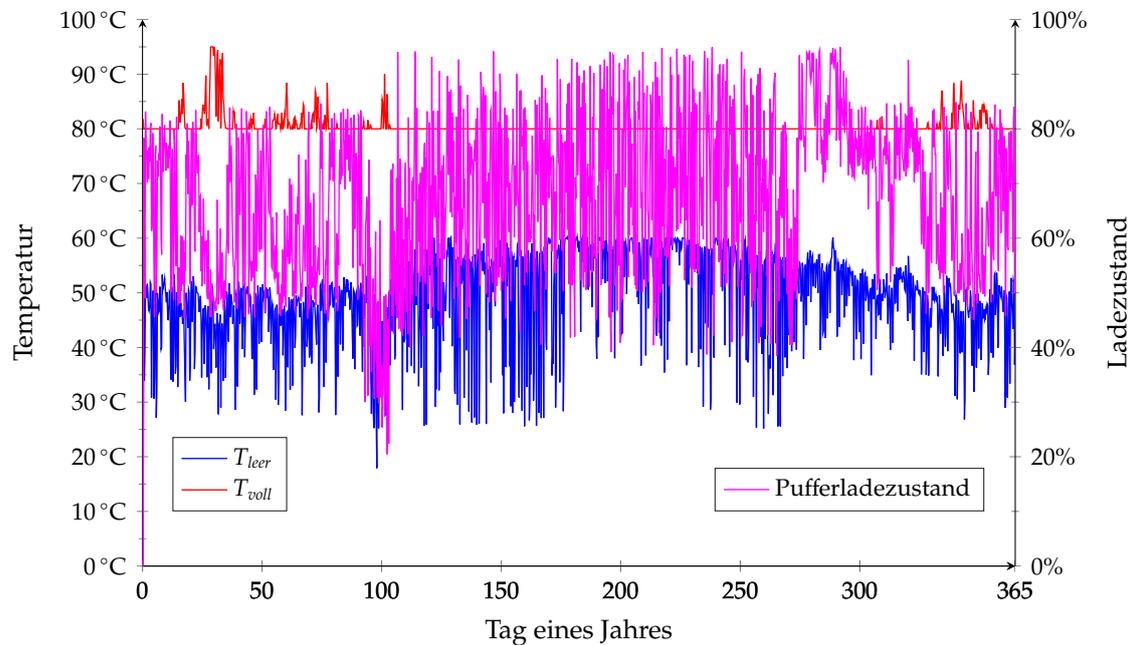


Abb. 4.7.: Verlauf der Temperaturführungsgrößen über das Jahr in einer exemplarischen Simulation der Bestandsanlage

#### 4.4. Hydraulische und regelungstechnische Erweiterung der Bestandsanlage

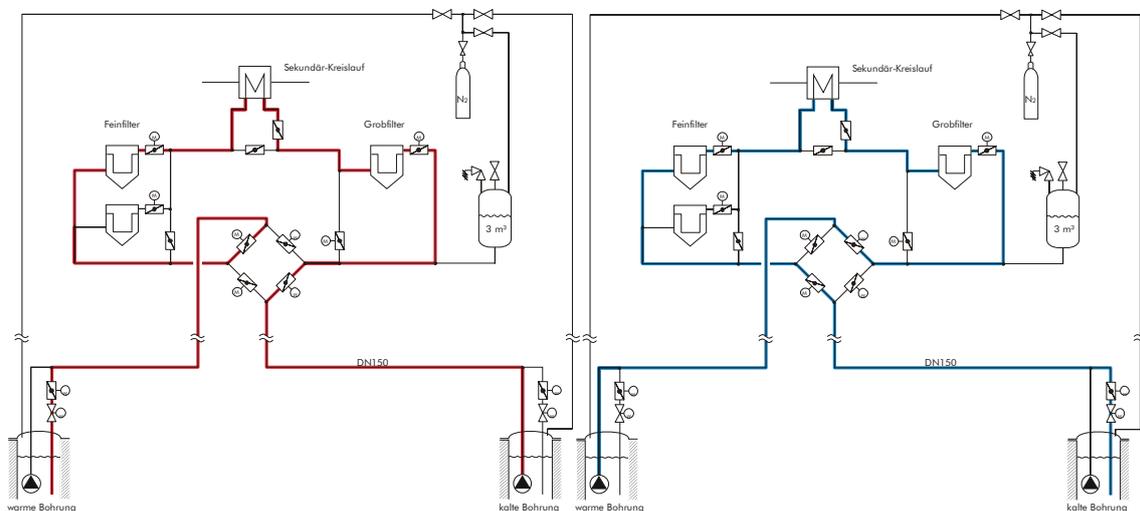
Für eine sinnvolle und effiziente Einbindung des Aquiferwärmespeichers und der Solarthermie in die Bestandsanlage, muss diese hydraulisch und regelungstechnisch erweitert werden. Die wesentlichen Änderungen und die regelungstechnische Umsetzung werden nachfolgend für die im weiteren Verlauf der Arbeit untersuchten Anlagenkonzepte beschrieben. In beiden Anlagenkonzepten wird zusätzlich zum bestehenden Hochtemperatur-Speicher (HT-Speicher) ein Niedertemperatur-Speicher (NT-Speicher) in das System eingebunden, um eine hydraulische Trennung des Anlagenteils auf hohem Temperaturniveau (Anbindung der Abnehmersysteme Bockelsberg und Universität) mit dem Anlagenteil auf niedrigem Temperaturniveau (Niedrigexergiesystem) zu ermögli-

chen. Weiterhin dient der Niedertemperaturspeicher mit einem Volumen von  $50\text{ m}^3$  zur Rückkühlung des Aquifers und der Solarthermie.

#### 4.4.1. Einbindung des Aquiferwärmespeichers

Der Aquiferwärmespeicher ist über seinen übertägigen Thermalwasserkreislauf in das Wärmeerzeuger- und Wärmeabnehmersystem eingebunden. Hydraulisch getrennt sind die beiden Kreisläufe über einen Plattenwärmübertrager zur Ein- bzw. Auskopplung von Wärme in bzw. aus dem Aquifer. Hydraulisch wird der Kreislauf durch die Tiefenpumpen betrieben. Im Regelfall wird das übertägige System mit einer Druckhaltung gegen Atmosphäre und mit einer Schutzgasbeaufschlagung betrieben, um die in Abschnitt 3.1.3 beschriebenen wasserchemischen Gleichgewichtsänderungen zu unterbinden bzw. weitestgehend zu verhindern.

Da der Aquiferwärmespeicher bidirektional betrieben wird (vgl. Abbildung 4.8), erfolgt an den Bohrungsköpfen eine Umschaltung über Armaturengruppen, die wahlweise den Förderbetrieb mit Abwahl des Pumpenmotors oder die Injektion mit Anwahl des Injektionsstranges realisieren.



**Abb. 4.8.:** Prinzipschema des übertägigen Thermalwasserkreislaufes im Sommerbetrieb (links) und im Winterbetrieb (rechts) mit Druckhaltung, Schutzgasbeaufschlagung und Filterstrecken, entnommen aus [9]

Das Thermalwasser wird saisonabhängig aus der jeweiligen Bohrung entnommen und durchläuft die erste Filterstufe. Anschließend wird das heiße bzw. das kalte Thermalwasser in den Wärmeübertrager (Komponente Nr. 10 in Abbildung 4.9) transportiert und dort vom anlagenseitigen System rückgekühlt bzw. erwärmt. Nach der Wärmeübertragung erfolgt eine zweite Filtrationsstufe und anschließend die Wiedereinleitung in den geologischen Horizont [9].

Der Aquiferwärmespeicher wird sekundärseitig von den beiden BHKW-Modulen beschickt. Die BHKW-Module können durch die saisonale Wärmespeicherung ganzjährig im Volllastbetrieb stromgeführt fahren. In den Sommermonaten entstehen Wärmeüberschüsse, die zu einem zunehmenden Pufferladezustand des HT-Speichers führen (Komponente Nr. 5 der Tabelle 4.3). Eine leistungsabhängige Überschussmenge wird aus dem HT-Speicher entnommen und über den Wärmeübertrager an den Thermalwasserkreislauf übertragen. In der Sommerbetriebsweise ist der Aquiferwärmespeicher als Wärmesenke in das Gesamtsystem eingebunden.

In den Wintermonaten kehrt sich die Flussrichtung um. Die eingespeicherte Wärme wird aus dem Untergrund gepumpt und über den obertägigen Thermalwasserkreislauf an das Sekundärsystem übertragen. Die Ausspeicherung erfolgt zur leistungsgeregelten Unterstützung der BHKW-Module, die die verbraucherseitige Wärme-Leistung auf Grund ihrer Grundlastauslegung nicht kontinuierlich erbringen können. In der Winterbetriebsweise ist der Aquiferwärmespeicher als Wärmequelle in das Gesamtsystem eingebunden (siehe Tabelle 4.3 und Abbildung 4.9).

**Tab. 4.3.:** Hydraulische Komponenten der Simulationsumgebung in Konzeptvariante I

Nr.	Komponente	Funktion
1	Führungs-BHKW	Grundlastdeckung
2	Folge-BHKW	Grundlastdeckung
3	Führungs-Kessel	Spitzenlastdeckung
4	Notfall-Kessel	Redundanz
5	Pufferspeicher (100 m <sup>3</sup> )	Pufferung der Erzeuger und Verbraucher auf hohem Temperaturniveau (90 – 60 °C)
6	Pufferspeicher (50 m <sup>3</sup> )	Pufferung der Erzeuger und Verbraucher auf niedrigem Temperaturniveau (60 – 25 °C)
7	Wohngebiet Bockelsberg	Verbraucher
8	Campus Universität	Verbraucher
9	Zentralgebäude Universität	Verbraucher (Niedrigexergiesystem)
10	Wärmeübertrager	Wärmeein- oder Wärmeauskopplung in/aus dem Thermalwasserkreislauf
11	Aquiferbrunnen	kalte Seite
12	Aquiferbrunnen	warme Seite
13	Beimisch-Ventil	bei Bedarf Beimischung auf die geforderte Vorlauftemperatur
14	Verteil-Ventil	temperaturabhängige Beschickung des Hochtemperatur- oder des Niedertemperatur-Pufferspeichers

---

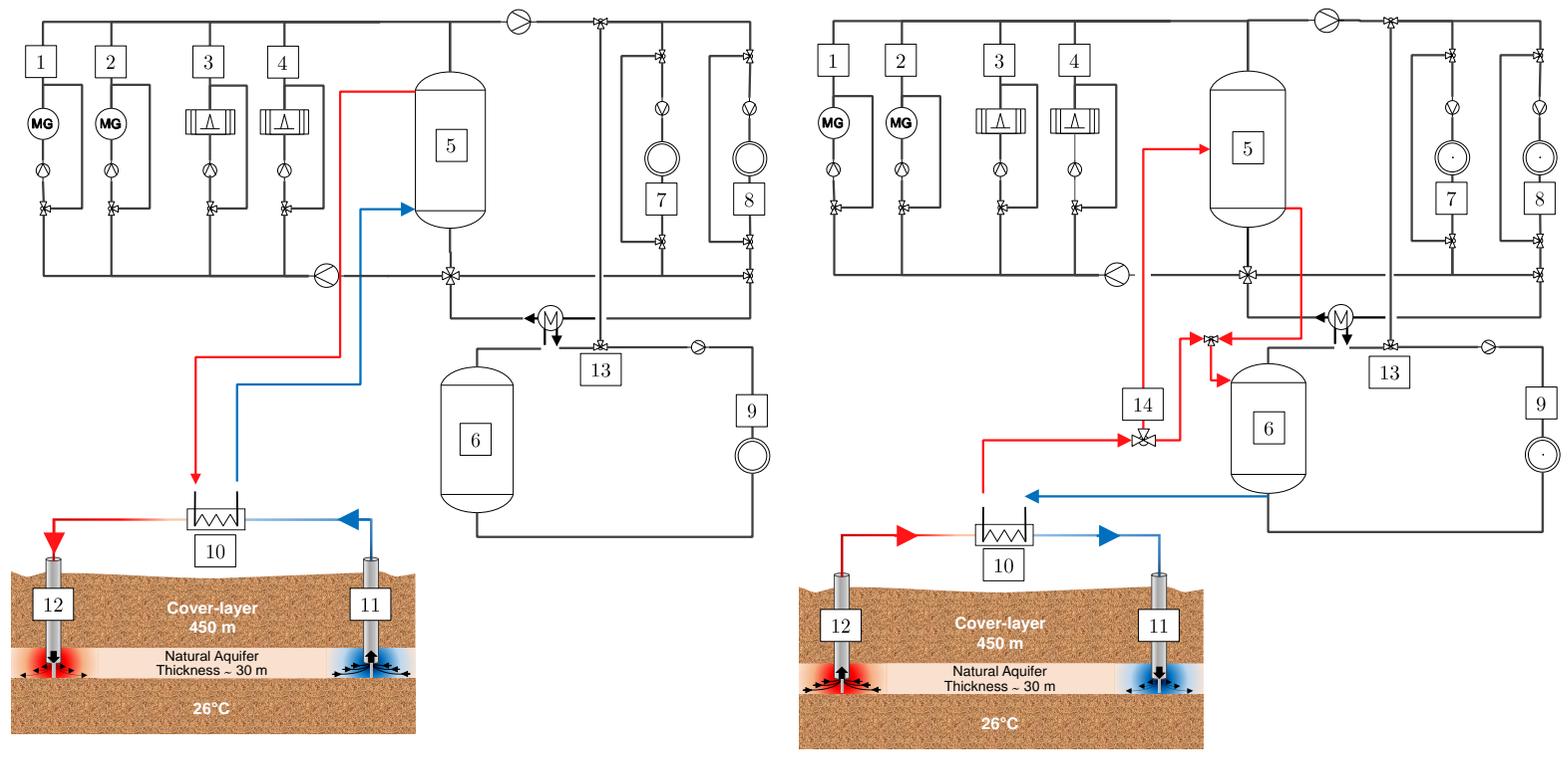
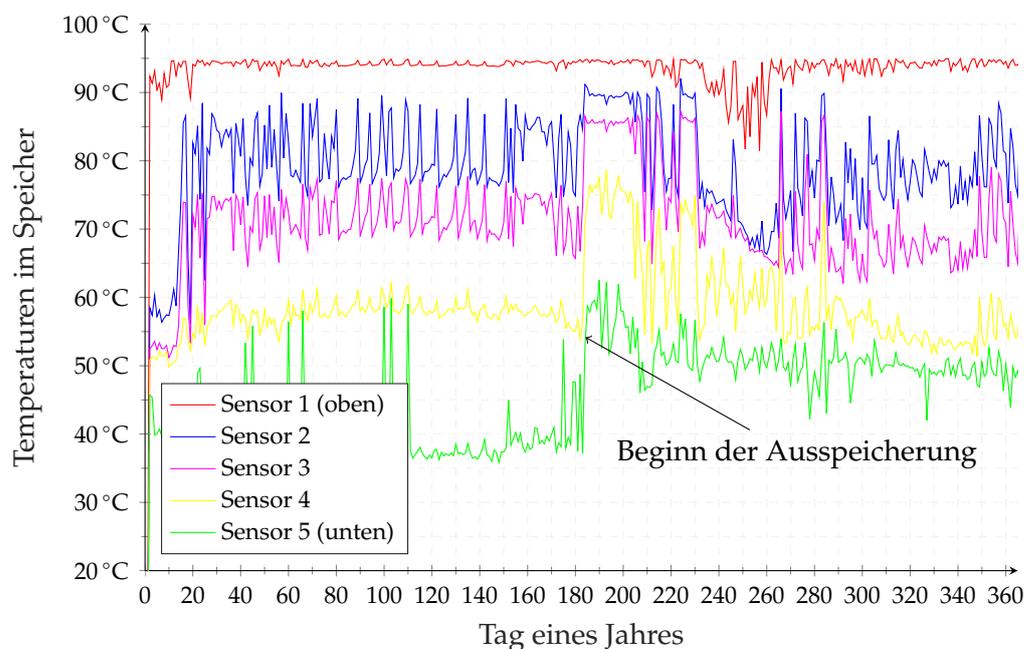


Abb. 4.9.: Hydraulische Einbindung des Aquiferwärmespeichers während der Beladung (links) und Entladung (rechts)

In der Simulationsumgebung beträgt die Regeltemperatur der Wärmeerzeuger über das Jahr hinweg konstant 95 °C. Der Vorlauf der Wärmeerzeuger (Komponenten Nr. 1-4 in Abbildung 4.9) ist hydraulisch ganz oben an den HT-Pufferspeicher angeschlossen und wird von *Sensor 1* (rot) erfasst. Der Rücklauf der Abnehmersysteme *Bockelsberg* und *Universität* ist hydraulisch ganz unten an den HT-Speicher angeschlossen und wird von *Sensor 5* (grün) erfasst.

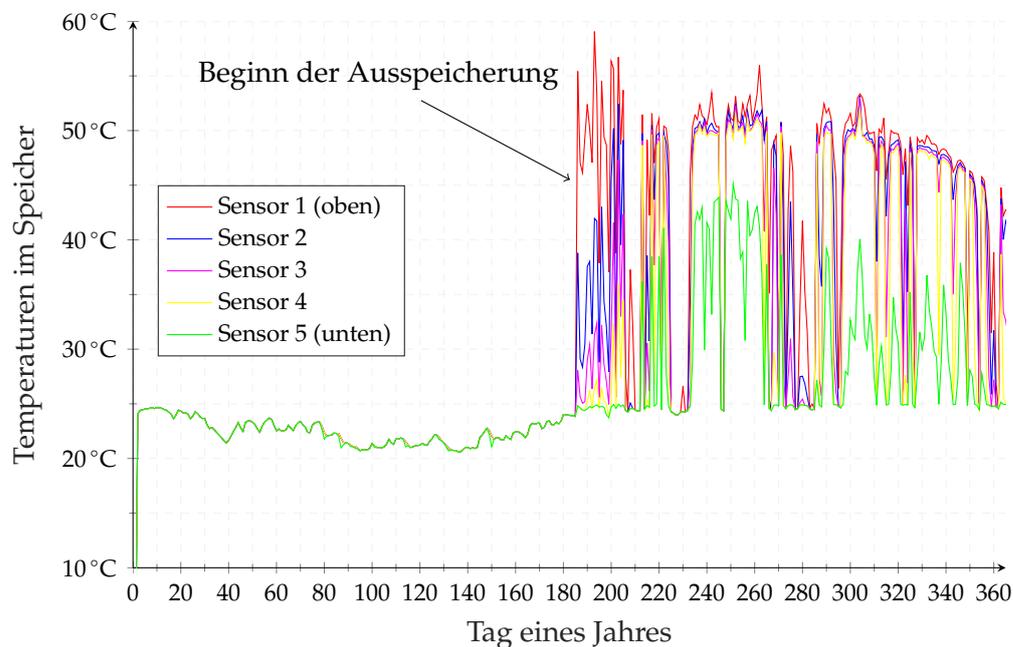
Wie in Abschnitt 4.3.1 und Abschnitt 4.3.2 beschrieben ist, wird das Gesamtsystem über die Berechnung des Pufferladezustandes und die Folgeschaltung der Wärmeerzeuger geführt, deren Hysteresen grundsätzlich saisonabhängig variieren. Durch die wechselnde Betriebsweise des Aquifer-Wärmespeichers als Wärmesenke und Wärmequelle nimmt der Auifer Einfluss auf die Speichertemperaturen im Hochtemperatur-Pufferspeicher und Niedertemperatur-Pufferspeicher.



**Abb. 4.10.:** Jährlicher Verlauf der HT-Speichertemperaturen ( $100\text{ m}^3$ ) exemplarisch für eine Simulation des Gesamtsystems ohne Solarthermie im 1. Simulationsjahr

Zu Beginn der Ausspeicherphase (für den Fall aus Abbildung 4.10 und Abbildung 4.11 beginnt diese Periode nach 6 Monaten, am Tag 182 des Jahres) ist die förderbare Temperatur aus dem Aquifer sehr hoch und näherungsweise gleich der Einspeichertemperatur

von 90 °C. Der heiße, sekundärseitige Vorlauf verlässt den Wärmetauscher (Komponente Nr. 10) mit einer 2 °C niedrigeren Temperatur als das Thermalwasser aus dem Aquifer (zu Beginn etwa 88 °C) und wird über das Verteilventil (Komponente Nr. 14) zunächst in den HT-Pufferspeicher geleitet. Dort führt die Ausspeicherung zu einer zunehmenden Aufladung und Erhöhung der mittleren Speichertemperaturen (siehe Abbildung 4.10). Der Massenstrom, der sekundärseitig oben in den HT-Pufferspeicher eingeleitet wird, wird gleichzeitig ganz unten aus dem Speicher entnommen und in den NT-Pufferspeicher geleitet. Im NT-Pufferspeicher führt diese Umschichtung ebenfalls zu einem Temperaturanstieg im Speicher und kann über die Sensortemperaturen gemessen werden (Abbildung 4.11).



**Abb. 4.11.:** Jährlicher Verlauf der NT-Speichertemperaturen ( $50\text{ m}^3$ ) über das Jahr exemplarisch für eine Simulation des Gesamtsystems ohne Solarthermie im 1. Simulationsjahr

Mit zunehmender Ausspeicherungsdauer fällt die Thermalwassertemperatur aus dem Aquifer weiter ab und mit einem 2-grädigen Versatz auch der sekundärseitige Vorlauf zum Verteilventil. Das Verteilventil leitet den Vorlauf in den HT-Speicher, solange dieser größer als die niedrigste Sensortemperatur im HT-Speicher (Sensor 5) ist. Unterschreitet der Vorlauf diese Sensortemperatur, erfolgt die Ausspeicherung ausschließlich in den NT-Pufferspeicher. Ab diesem Zeitpunkt kann der Aquiferwärmespeicher nur noch

durch den NT-Pufferspeicher rückgekühlt werden. Da der aus der Ausspeicherung resultierende Volumenstrom teilweise größer als der Volumenstrom des Verbrauchers (Zentralgebäude der Universität) ist, lädt sich der NT-Speicher zeitweise durch. Die Temperaturfront mit hohen Temperaturen bewegt sich von oben nach unten und lässt die Temperaturen bis in den unteren Teil des Speichers (Sensor 4 und Sensor 5) ansteigen (siehe Abbildung 4.11).

Der Temperaturanstieg im NT-Pufferspeicher kann dazu führen, dass der Aquiferwärmespeicher nicht mehr weiter entladen werden kann. Das ist der Fall, wenn zu einem gewissen Zeitpunkt die Temperatur im unteren Bereich des NT-Speichers höher als die Ausspeichertemperatur des Aquifers ist. Da die Rückkühlung hydraulisch durch den unteren Auslass des NT-Speichers erfolgt, würde man in diesem Fall das Thermalwasser im Wärmeübertrager erwärmen, anstatt rückzukühlen (siehe Abbildung 4.12). Um diesen Umstand zu verhindern, wird dem Aquifer eine Rückkühlhysterese vorgegeben.

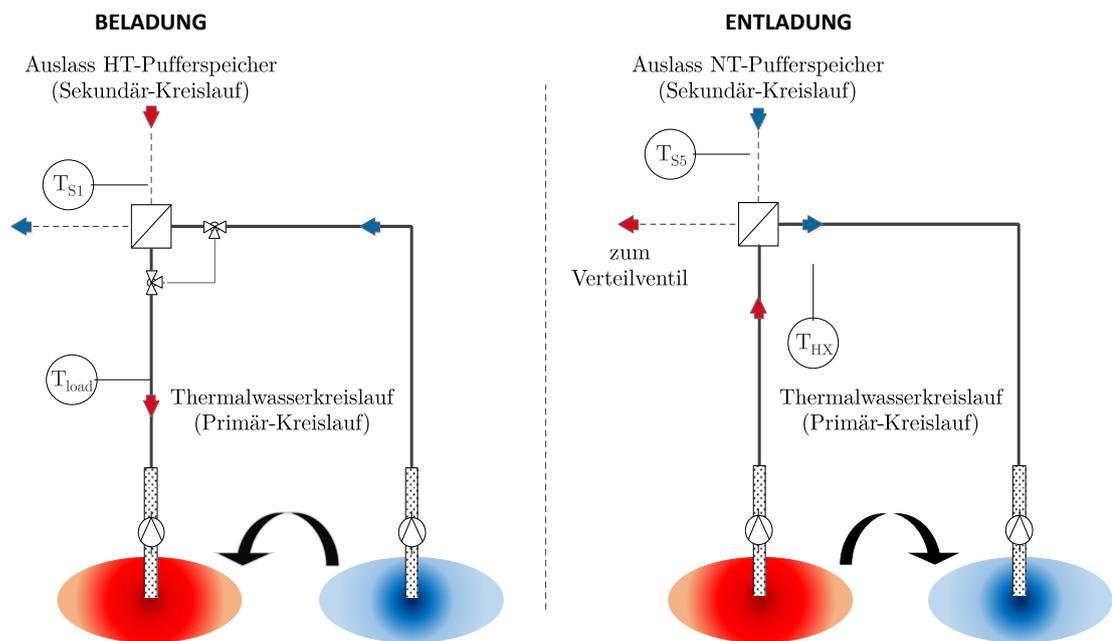


Abb. 4.12.: Regelungstechnische Einbindung des Aquiferwärmespeichers in der Simulationsumgebung

Durch die regelungstechnische Vorgabe einer Rückkühlhysterese kann bestimmt werden, wie groß die treibende Temperaturdifferenz zwischen dem anlagenseitigen Rücklauf

und dem thermalwasserseitigen Vorlauf aus dem Aquifer mindestens sein muss, um eine Entladung des Aquifers freizugeben. Der Hysterese-Regler gibt die Entladung des Aquifers im Betrieb solange frei, bis die Temperaturdifferenz kleiner wird als ein vorgegebenes Differenzband.

Diese Regelgröße ist in Bezug auf die Speichereffizienz des Aquifers sensibel und weiterhin abhängig von der regenerativen Erzeugerhierarchie. Durch die Vorgabe der Rückkühlhysterese kann indirekt auch die Tiefenentladung des Aquifers vorgegeben bzw. limitiert werden. Der Einfluss der Rückkühlhysterese auf die Speichereffizienz ist Untersuchungsgegenstand in Abschnitt 4.5.3.

Die Beladung des Aquifers erfolgt über eine Massenstromregelung und ein Beimischventil. Sekundärseitig, das heißt anlagenseitig, wird die Leistung aller regenerativen Wärmeerzeuger und aller Wärmeverbraucher für jeden Zeitschritt berechnet. Wenn ein festgelegter Leistungsüberschuss mit einer Volumenstrom-Mindestanforderung vorliegt und ein Mindest-Pufferladezustand gewährleistet ist, wird das Signal für die Beladung freigegeben. Die Beladung wird von der Regeleinheit solange freigegeben, bis der Pufferladezustand unter einen vorgegebenen Wert sinkt oder eine steigende Wärmeleistung der Verbraucher dazu führt, dass der Mindestvolumenstrom nicht mehr überschüssig ist.

Der primärseitige Thermalwasser-Massenstrom wird über ein Beimischventil so in den Wärmetauscher eingeregelt, dass die vorgegebene Einspeichertemperatur in den Aquifer erreicht wird. Im Wärmeübertrager gehen beim Wärmeübergang im Gegenstrom etwa 2 °C an Temperatur verloren. Die minimal zulässigen Speichertemperaturen am Auslass des HT-Pufferspeichers werden über die Vorgabe der Beladehysterese des Pufferladezustandes geregelt.

#### **4.4.2. Einbindung der Solarthermie**

Das Konzept eines solar unterstützten Nahwärmesystems mit Langzeitwärmespeicherung in einem Aquifer sieht eine Reduktion oder Substitution des fossil bereitgestellten Anteils der Spitzenlastkessel (Komponenten Nr. 3 und Nr. 4) durch solar gewonnene Wärme auf einem brauchbaren Temperaturniveau vor.

Die Schwierigkeit liegt dabei in einer konkurrierenden Nutzung des Niedrigexergiesystems durch die Solarthermie und durch den Aquifer, da beide Technologien von

niedrigen Rückkühltemperaturen profitieren. Des Weiteren wird durch die Einbindung der Solarthermie die regelungstechnische Komplexität und Variantenvielfalt stark erhöht. Dieser Abschnitt beschreibt die hydraulische (Abbildung 4.13) und regelungstechnische (Abbildung 4.14) Einbindung der Solarthermie in die Simulationsumgebung.

Im Wesentlichen ist die Netztopologie identisch mit dem Anlagenkonzept ohne Solarthermie. Den Unterschied macht ein weiterer Auslass am Niedertemperatur-Speicher (Komponente Nr. 6) für die Rückkühlung des Solarkreislaufes über den Wärmeübertrager (Komponente Nr. 14) aus. Der Solarkreislauf besteht hinsichtlich seiner Komponenten aus einer Förderpumpe, aus erdvergrabenen Wärmetrassen, dem Solarkollektorfeld, einem Wärmeübertrager zur hydraulischen Entkopplung von Solarkreislauf und Anlagenkreislauf sowie einer Regeleinheit.

Für die Standorte im Bundesgebiet Deutschland stellen eine Vielzahl von Herausgebern Klimadatensätze mit Messwerten für die Direkt- und Diffusstrahlung bereit. Im Bereich der solarthermischen Kollektorsimulation sind die Testreferenzjahre vom Deutschen Wetterdienst (TRY) [167] und die *Meteonorm-Daten* der Firma Meteotest [168] weit verbreitet. Aufgrund der Nichteignung der Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes zur solarthermischen Ertragssimulation [153, 169], wurden die *Meteonorm-Strahlungsdaten* von Lüneburg verwendet. In einem Strahlungsprozessor werden diese Daten in TRNSYS eingelesen und für die Kollektorebene berechnet. Für verschiedene Kollektortypen (z.B. Flachkollektor oder Vakuumröhrenkollektor) werden individuelle temperaturabhängige Strahlungskurven oder Mindeststrahlungswerte für die Freigabe des Ein- bzw. Ausschaltsignals vorgegeben und an die Regeleinheit übergeben.

Die Regeleinheit sammelt weiterhin die übergebenen Temperaturen  $T$  aus den unteren Auslässen des HT- bzw. NT-Speichers, die sekundäre Vorlauftemperatur sowie die Austrittstemperatur aus dem Kollektorfeld (Abbildung 4.14). Der primärseitige Massenstrom der Förderpumpe im Solarkeislauf wird durch das Ein- bzw. Ausschaltsignal der jeweiligen Strahlungskurve an- bzw. abgewählt. Wenn für eine Außentemperatur die zugehörige Mindesteinstrahlung gemessen wird, geht die primärseitige Förderpumpe mit einem minimalen Massenstrom von  $5 \frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{m}^2_{AP}}$  an. Der Massenstrom wird über einen iterativen Regler in TRNSYS derart gesteuert, dass die Temperatur am Austritt des Kollektorfeldes der frei parametrierbaren Zieltemperatur  $T_{set, coll}$  entspricht (siehe Tabelle 4.6). Der maximale Massenstrom der Förderpumpe beträgt zumeist  $25 \frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{m}^2_{AP}}$ .

Tab. 4.4.: Hydraulische Komponenten der Simulationsumgebung in Konzeptvariante II

Nr.	Komponente	Funktion
1	Führungs-BHKW	Grundlastdeckung
2	Folge-BHKW	Grundlastdeckung
3	Führungs-Kessel	Spitzenlastdeckung
4	Notfall-Kessel	Redundanz
5	Pufferspeicher (100 m <sup>3</sup> )	Pufferung der Erzeuger und Verbraucher auf hohem Temperaturniveau (90 – 60 °C)
6	Pufferspeicher (50 m <sup>3</sup> )	Pufferung der Erzeuger und Verbraucher auf niedrigem Temperaturniveau (60 – 25 °C)
7	Wohngebiet Bockelsberg	Verbraucher
8	Campus Universität	Verbraucher
9	Zentralgebäude Universität	Verbraucher (Niedrigexergiesystem)
10	Wärmeübertrager	Wärmeein- oder Wärmeauskopplung in den/aus dem Thermalwasserkreislauf
11a	Belade-Ventil	regelt den Beladekreislauf des Aquifers
11b	Wärmeübertrager	koppelt die Wärme für die Beladung des Aquifers ein
12a	Wärmeübertrager	koppelt die Wärme für die Entladung des Aquifers aus
12b	Verteil-Ventil	temperaturabhängige Beschickung des Hochtemperatur- oder des Niedertemperatur-Pufferspeichers
13	Solarkollektorfeld	Solarthermische Nutzung der Strahlung
14	Wärmeübertrager	koppelt die Wärme des Solarkreislaufes ein
15	Regel-Ventil	regelt den Vorlauf aus dem (sekundärseitigen) Solarkreislauf
16	Beimisch-Ventil	bei Bedarf Beimischung auf die geforderte Vorlauftemperatur

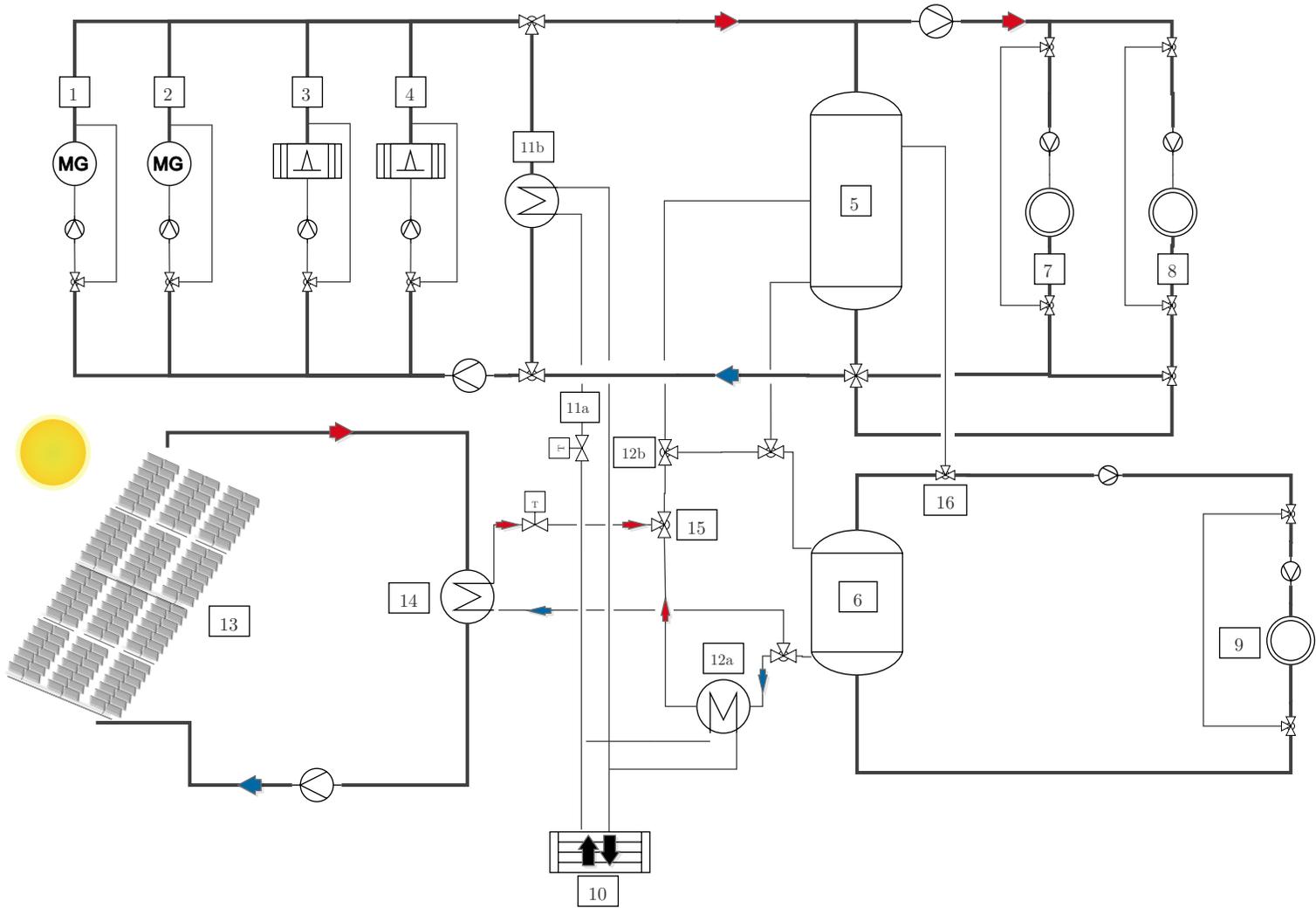
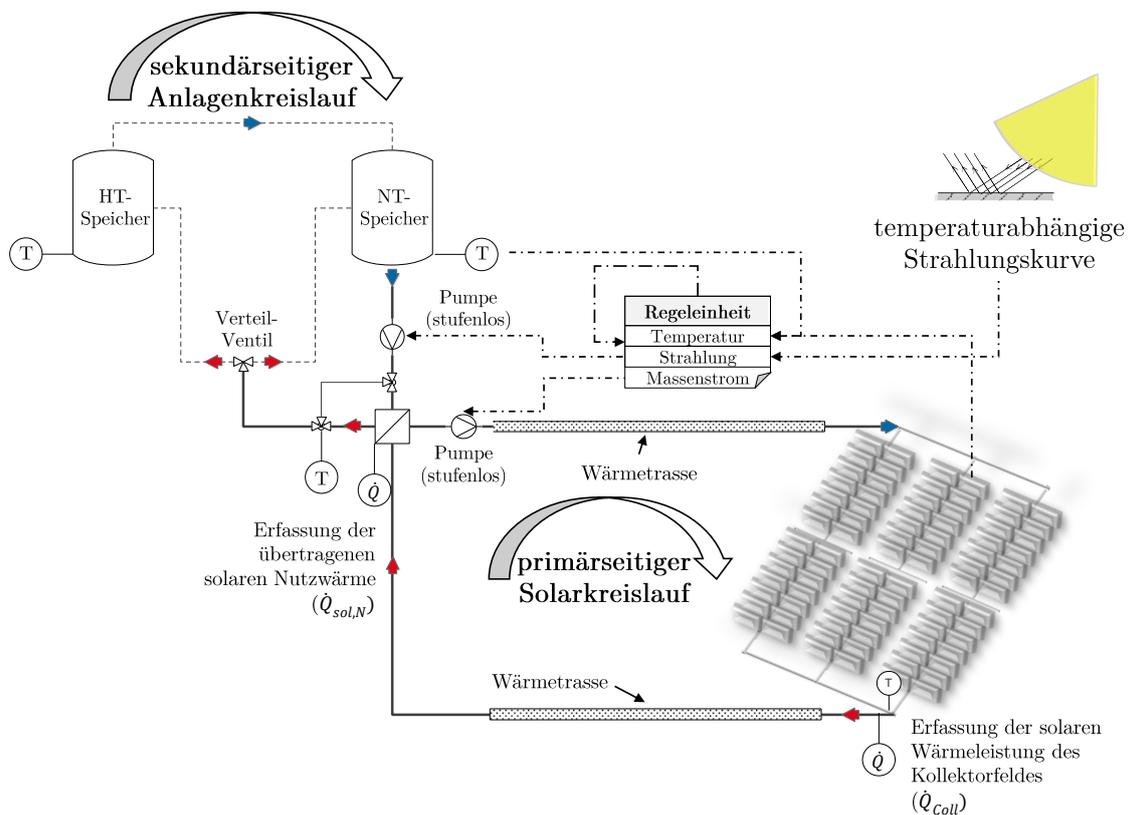


Abb. 4.13.: Hydraulische Einbindung des Aquiferwärmespeichers und der Solarthermie in der Simulationsumgebung

## Kapitel 4. Modellierung und Aufbau einer Simulationsumgebung zur Durchführung von Energiesystemanalysen

Die anlagenseitige Förderpumpe wird eingeschaltet, wenn die Temperatur am Eintritt des Wärmeübertragers im Solarkreislauf um ein frei parametrierbares Delta größer als die zu diesem Zeitpunkt geforderte Heiznetztemperatur ist. Dadurch wird häufig eine Kollektoraustrittstemperatur von  $> 80^\circ\text{C}$  gefordert, bevor solare Nutzwärme ( $Q_{sol,N}$ ) an das Wärmenetz übertragen werden kann. Wenn der Kollektorkreislauf in einer strahlungsarmen Zeit die geforderte Austrittstemperatur nicht erreicht, verzeichnet das Kollektorfeld einen Wärmeertrag, den das Wärmenetz nicht nutzen kann. Es resultiert ein Delta zwischen dem Kollektorfeldertrag ( $Q_{coll}$ ) und dem solaren Systemertrag ( $Q_{sol,N}$ ), das mit sinkender Kollektortemperatur zunimmt (siehe Tabelle 4.6). Zudem gehen über die erdvergrabenen Wärmetrassen etwa 1 – 2 % der transportierten Wärmeenergie an die Umgebung verloren.



**Abb. 4.14.:** Regelungstechnische Einbindung der Solarthermie in der Simulationsumgebung

Der anlagenseitige Massenstrom wird in einer vorgegebenen Teillastbandbreite derart geregelt, dass die Temperatur am Austritt des Gegenstromwärmeübertragers  $2^\circ\text{C}$  geringer ist, als die Eintrittstemperatur im Solarkreislauf.

Prinzipiell gibt es hinsichtlich der Einspeisung und des Temperaturhubes verschiedene Möglichkeiten, wie die Solarthermie in ein Nahwärmenetz eingebunden werden kann. Für den Fall, dass der Netzbetreiber und der Solaranlagenbetreiber nicht identisch sind, gibt es aus Sicht der jeweiligen Betreiber unterschiedlich zu bevorzugende Varianten. Eine detaillierte Studie zu den Einbindungsarten und deren Auswirkung auf den solaren Systemertrag wurde in [153] durchgeführt.

In der vorliegenden Arbeit soll die Solarthermie als vollwertiger Erzeuger in das Gesamtsystem eingebunden werden. Die Zieltemperatur am Austritt des Kollektorfeldes wurde zunächst passend zu den Wärmeerzeugertemperaturen zu  $95^\circ\text{C}$  festgesetzt. Die optimale Zieltemperatur in Bezug auf eine maximale Effizienz der Solarthermieanlage und des Aquiferwärmespeichers wird in Abschnitt 4.6.5 untersucht.

### **Klassifizierung von Kollektoren und Anlagenkonzepten**

In Europa gibt es derzeit etwa 200 solar unterstützte Nahwärmesysteme mit saisonaler Wärmespeicherung, die mit einer solaren Nennkapazität von mindestens  $700\text{ kW}_{th}$  realisiert wurden [170]. Die Anlagenkonzepte unterscheiden sich hinsichtlich Anlagengröße, saisonalem Speichertyp, solarem Deckungsanteil, Einbindung des Kollektorfeldes und hinsichtlich des Kollektortyps.

Das Marktangebot von solarthermischen Kollektoren umfasst eine Vielzahl an unterschiedlichen Produkten und Herstellern. Eine Klassifizierung und Einteilung der Kollektoren kann entlang verschiedener Kriterien (Temperaturniveau, geometrische und optische Bauform, Wärmeträgerfluid) und Anwendungsgebiete (Haushalt, Kraftwerks- oder Industrieprozesse) verlaufen, lässt sich aber aufgrund der großen Technologie-Diversität und Systemabhängigkeit nicht trennscharf abgrenzen.

In Europa besitzen Flachkollektoren die größte installierte Kapazität. Mit einem Marktanteil von 83 % dominiert der Flachkollektor die Verteilung der installierten Leistung nach Bauart. Während in den skandinavischen Ländern Anlagenkonzepte mit Flachkollektoren in Verbindung mit großen Erdbecken-Wärmespeichern dominieren, gibt es in Deutschland zunehmend Umsetzungsprojekte mit Vakuumröhrenkollektoren und

Wasser als Wärmeträgermedium, sogenannte *Aqua-Systeme*. Der Anteil an Vakuumröhrenkollektoren in Europa hat in den letzten Jahren leicht zugenommen und betrug Ende 2015 etwa 13 % [171].

Durch eine Vakuumisolierung der Glasröhren (Dewargefäß) sind die konvektiven Wärmeverluste deutlich geringer, weshalb die spezifische Leistung von Vakuumröhrenkollektoren gegenüber Flachkollektoren insbesondere bei hohen Kollektortemperaturen zumeist höher ist (vgl. Abbildung A.8). Durch ein schnelleres Anfahren der Anlage liefern Röhrenkollektoren schneller höhere Temperaturen. Unabhängig von der Sonneneinstrahlung können Kollektorausstrittstemperaturen von 80 °C nahezu jederzeit erreicht werden [172] und somit das Wärmesystem auch an Tagen mit hohem Diffusanteil unterstützen. Eigene Simulationen haben bestätigt, dass die spezifischen Kollektorerträge von Vakuumröhrenkollektoren (schwarz) über das Jahr um 35 % höher sind als die von Flachkollektoren (magenta). Mit einem Hochleistungsflachkollektor (blau) konnten sogar 40 % höhere Kollektorerträge erzielt werden (Abbildung 4.15).

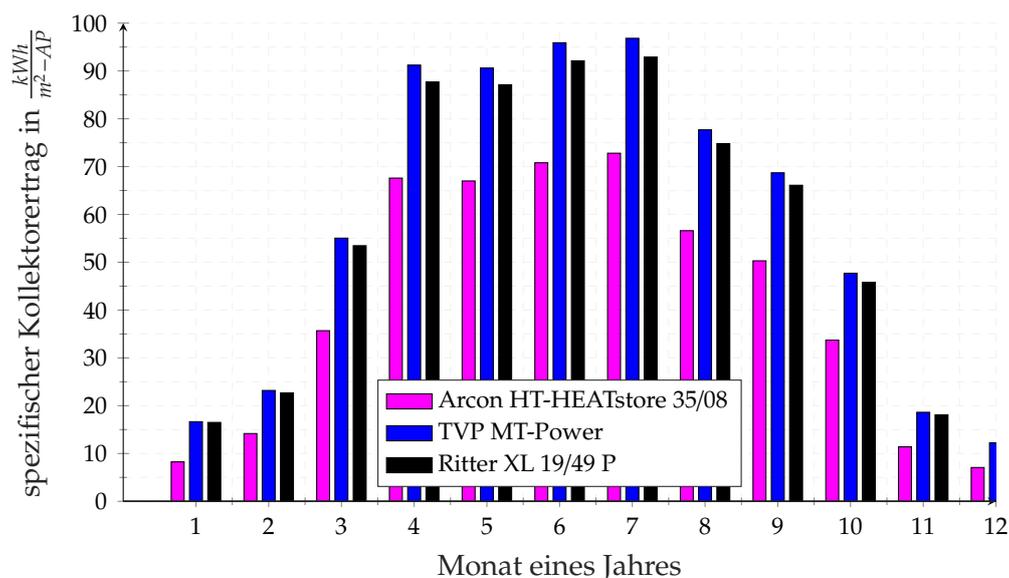


Abb. 4.15.: In TRNSYS simulierte spezifische Kollektorerträge von drei unterschiedlichen Kollektortypen in einer Systemsimulation mit 2000 m<sup>2</sup> Kollektoraperturfläche mit Glykol als Wärmeträgermedium

Mit 495  $\frac{kWh}{m^2}$  erzielt der Flachkollektor den geringsten jährlichen Ertrag. Mit dem Vakuumröhrenkollektor von Ritter steigt der jährliche Ertrag auf knapp 670  $\frac{kWh}{m^2}$ . Den höchsten

Kollektorertrag für den Standort Lüneburg konnte mit dem Hochleistungskollektor der Firma TVP erzielt werden. In der Simulation wurde ein spezifischer Ertrag von  $694 \frac{kWh}{m^2}$  erreicht.

## 4.5. Regelungstechnische Einflussgrößen auf die Speichereffizienz

Ein wesentlicher Bestandteil der Untersuchungen ist die Bewertung von Einflussgrößen auf die Speichereffizienz des Aquiferwärmespeichers im Betrieb. Unter der Voraussetzung von geeigneten hydrogeologischen Bedingungen im Untergrund hängt die Effizienz des Aquifers von anlagentechnischen, regelungstechnischen und exogenen Einflussgrößen (Abschnitt 5.4) ab.

Das Effizienzkriterium des Aquiferwärmespeichers ist sein Wärmerückgewinnungsgrad  $HRF$  (engl.: *Heat Recovery Factor*). Er beschreibt das Verhältnis von ausgespeicherter Wärme zu eingespeicherter Wärme über einen Betrachtungszeitraum von einem Jahr [64].

$$HRF = \frac{Q_{aus}}{Q_{ein}} = \frac{\int [\dot{m}_{aus}(t) \cdot c_p \cdot (T_{out,warm}(t) - T_{out,cold}(t))] dt}{\int [\dot{m}_{ein}(t) \cdot c_p \cdot (T_{in,warm}(t) - T_{in,cold}(t))] dt} \quad (4.10)$$

Der  $HRF$  berücksichtigt die Energiebilanz nach Gleichung 4.10 für das Einzugsgebiet bzw. den thermisch aktiven Radius der warmen und kalten Bohrung der Speicherformation.

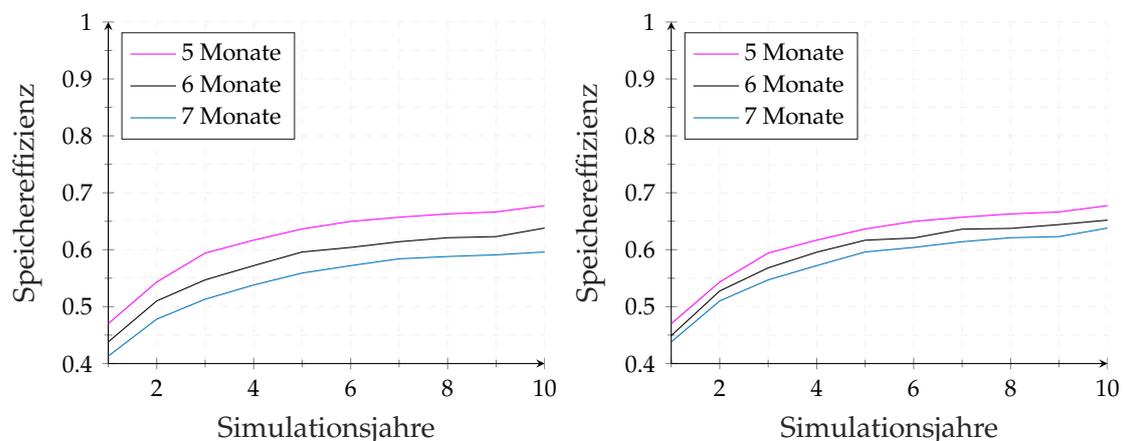
### 4.5.1. Einfluss der Einspeicherdauer

Die regelungstechnische Einbindung eines Aquiferwärmespeichers in ein Wärmesystem ist eine standortspezifische Einzelfalllösung, da sich die Regelung sowohl an den hydrogeologischen Randbedingungen (z.B. Permeabilität und durchsetzbarer Volumenstrom) als auch an der übertägigen Erzeuger- und Abnehmerstruktur (z.B. Überschuss- und Defizitleistung) orientieren muss. Ein ATEs-System ist insofern ein starres System, als dass die erzielbare Speichereffizienz von eben dargestellten Spezifika abhängt. Vor diesem Hintergrund müssen die Simulationsergebnisse interpretiert werden. Die Abhängigkeit der Speichereffizienz von der regelungstechnischen Vorgabe der Ein- und Ausspeicherzyklen gilt für das Energiesystem in Lüneburg und kann für ein System an

einem anderen Standort gegenläufige Tendenzen aufweisen.

Die Regelung der jeweiligen Zykluslänge hat mehrere Bestandteile. Wesentlich ist die Vorgabe der Zeiträume, in denen eine Ein- bzw. Ausspeicherung ermöglicht wird, sofern die anderen Belade- und Entladekriterien erfüllt sind. Damit verknüpft ist die Vorgabe der maximalen Volumenströme, die während des jeweiligen Zykluses umgesetzt werden können. Es hat sich gezeigt, dass die Effizienz am höchsten ist, wenn der maximale Volumenstrom während der Ausspeicherung höher ist, als zu Zeiten der Einspeicherung. In der nachfolgenden Analyse des Einflusses der Einspeicherdauer wurde im Beladezeitraum ein maximaler Volumenstrom von  $30 \frac{m^3}{h}$  vorgegeben und im Entladezeitraum ein maximaler Volumenstrom von  $50 \frac{m^3}{h}$ .

Abbildung 4.16 zeigt den konzeptspezifischen Einfluss der Einspeicherdauer auf die Speichereffizienz. Links für das Konzept I ohne Solarthermie und rechts für das Konzept II mit einer  $2000 m^2$  Solarthermieanlage (Flachkollektoren). Es wurden drei verschiedene Zykluslängen untersucht. Eine Einspeicherung über einen Zeitraum von 5 Monaten und entsprechend eine Ausspeicherung über 7 Monate, eine gleichlange Ein- und Ausspeicherphase sowie eine Einspeicherung über 7 Monate und eine Ausspeicherung über 5 Monate.



**Abb. 4.16.:** Einfluss der regelungstechnischen Vorgabe der Einspeicherdauer auf die Speichereffizienz für das Gesamtsystem ohne (links) und mit Solarthermie (rechts)

In beiden Konzepten bewirkt eine kürzere Einspeicherphase eine höhere Speichereffizienz, wobei die Sensitivität der Einspeicherdauer auf die Speichereffizienz mit der Solarthermieanlage (rechts) geringer ist als ohne Solarthermie (links).

Begründet werden kann das Effizienzverhalten des Aquifers mit der Erzeuger- und Abnehmerstruktur. Der Leistungsüberschuss ist ohne der Solarthermie in den Sommermonaten nicht so groß, dass eine längere Beladung des Aquifers die Einspeichermenge in dem Maße erhöht, dass zu Zeiten des Leistungsdefizites (Auspeicherphase) die durch die längere Einspeicherdauer im Untergrund zusätzlich befindliche Wärmemenge zurückgeholt werden kann.

Über 10 Jahre hinweg können bei einer jährlichen Einspeicherdauer über 5 Monate etwa 26,5 GWh eingespeichert werden, bei einer jährlichen Einspeicherdauer über 7 Monate können etwa 33,9 GWh eingespeichert werden (ohne Solarthermie). Es werden etwa 28 % mehr an Wärmeenergie in den Untergrund eingespeichert, von denen aber nur 12 % mehr wieder aus dem Untergrund zurückgewonnen werden können. Aus diesem Grund verschlechtert sich das Effizienzverhalten des Aquifers mit zunehmender Einspeicherdauer. Dieser Effekt ist im Konzept ohne der Solarthermie deutlicher zu sehen als mit der Solarthermie.

Insgesamt wird die Ausnutzung der Kapazität des Speichers mit der Solarthermie um 10 % erhöht und das Verhältnis zwischen erhöhter Einspeichermenge bei längerer Einspeicherung im Vergleich zur erhöhten Ausspeichermenge ist günstiger. Der Einfluss der Einspeicherdauer nimmt in Kombination mit der Solarthermie daher ein geringeres Ausmaß an.

#### **4.5.2. Einfluss der regenerativen Erzeugerhierarchie auf die Speichereffizienz**

Bei mehreren, teilweise konkurrierenden regenerativen Wärmeerzeugern muss regelungstechnisch eine Erzeugerhierarchie implementiert sein, die die sequentielle Ab- und Anwahl der Erzeuger vorgibt, wenn die Summe der regenerativen Erzeugung während der Entladung des Aquiferwärmespeichers größer ist als die Wärmeabnahme der Verbraucher. Wie in Abschnitt 4.3 beschrieben ist, erfolgt die regelungstechnische Systemführung ganzjährig über die Berechnung des Pufferladezustandes und einer damit verknüpften Folgeschaltung der (konventionellen) Wärmeerzeuger. Die regenerative Erzeugerhierarchie während der Entladung des Aquiferwärmespeichers regelt, welcher Erzeuger die "Vorfahrt" während des Entladevorgangs hat. Grundsätzlich gibt es zwei Regelkonzepte:

**Priorisierung der BHKWs:** Im Entladezeitraum werden die BHKW-Laufzeiten durch entsprechende Regelhysteresen maximiert und der Aquiferwärmespeicher übernimmt die Wärme-Leistungsdifferenz zwischen regenerativer Erzeugung und Verbrauch. Aus der Laufzeitmaximierung der BHKWs können durch eine Einspeisevergütung der elektrischen Energie finanzielle Vorteile auf Kosten der Speichereffizienz des Aquifers resultieren

**Priorisierung des Aquifers:** Im Entladezeitraum deckt der Aquiferwärmespeicher den Wärmeverbrauch, die BHKWs liefern die Wärmeleistungsdifferenz zwischen regenerativer Erzeugung und Verbrauch. Diese Regelstrategie führt aufgrund einer besseren Rückkühlung des Aquifers zu einer höheren Speichereffizienz, die auf Kosten von geringeren BHKW-Laufzeiten erzielt wird.

Für den Fall, dass die Solarthermie als regenerativer Wärmeerzeuger hinzukommt, muss die Regelstrategie für den Einzelfall (in Abhängigkeit der Kollektorfeldgröße, des Kollektortyps und der Zieltemperatur) angepasst werden.

#### **4.5.3. Einfluss der Rückkühlhysterese auf die Speichereffizienz**

Die Notwendigkeit einer Rückkühlhysterese liegt in der hydraulischen Einbindung begründet und ist in Abschnitt 4.4.1 erläutert. Die Rückkühlhysterese gibt eine Mindest-Temperaturdifferenz vor, die am Wärmeübertrager zwischen aktueller Ausspeichertemperatur des Aquifers und Rückkühltemperatur des Wärmenetzes anliegen muss.

Vor dem Hintergrund der gewählten Erzeugerhierarchie ergeben sich unterschiedliche Rückkühlhysteresen. Tendenziell haben die Simulationsstudien gezeigt, dass die Rückkühlhysteresen größer sein müssen, wenn der Aquifer während des Entladezeitraums als Erzeuger gegenüber den BHKWs priorisiert wird. Die maximale Speichereffizienz konnte mit einer 20/10-Hysterese erzielt werden. Die Ausspeicherung des Aquifers wird regelungstechnisch zugelassen, solange die Temperaturdifferenz zwischen Ausspeichertemperatur und Rückkühltemperatur des Netzes mindestens 10 K beträgt. Unterschreitet die Temperaturdifferenz 10 K, schaltet die Tiefenpumpe ab. Die Entladung des Aquifers wird fortgesetzt, wenn die Temperaturdifferenz 20 K überschreitet.

Für den Fall der BHKW-Priorisierung während des Entladezeitraums muss eine niedrigere bzw. engere Hysterese gewählt werden, um eine gute Rückkühlung zu erreichen. Die maximale Speichereffizienz konnte mit einer 7/4-Hysterese erzielt werden.

## 4.6. Anlagentechnische Einflussgrößen auf die Speichereffizienz

In den durchgeführten Simulationsstudien zur Untersuchung variierender anlagentechnischer Aspekte wurden gleichlange Ein- und Ausspeicherzyklen von je 6 Monaten vorgegeben. Die Einspeicherphase beginnt am 1. April und endet am 30. September. Dementsprechend wird in dem Zeitraum zwischen dem 1. Oktober und dem 31. März im Falle eines Wärmebedarfs ausgespeichert. Die vorgegebene Rückkühlhysterese beträgt 7/4, die Priorisierung der Erzeuger, sofern nicht explizit anders erwähnt, gilt den BHKWs.

### 4.6.1. Einfluss der Einspeichertemperatur

Wie stark der Einfluss der Einspeichertemperatur auf die Speichereffizienz ist, wird in der Literatur kontrovers diskutiert. Während Schout et al. [173, 174] aus numerischen Untersuchungen schlussfolgert, dass die Einspeichertemperatur ein Schlüsselparameter für die Effizienz von Hochtemperatur-ATES-Systemen darstellt, ordnet Jeon et al. [175] die Sensitivität der Einspeichertemperatur auf die Effizienz unter. Schout et al. stützt sich bei der Validierung seines numerischen Modells auf Messdaten eines Feldtestes [176] und auf eine analytische Näherung durch Hellstrom et al. [177].

Nach Jeon et al. nehmen vornehmlich die Aquiferpermeabilität und das Einspeichervolumen einen Einfluss auf den Wärmerückgewinnungsgrad. Aufgrund der vorherrschenden Kontroverse wird der Einspeichertemperatur ein hoher Stellenwert in der nachfolgenden Analyse zugeschrieben.

Der Einfluss der Einspeichertemperatur auf die Effizienz des Aquiferwärmespeichers kann analytisch über die individuellen Rückgewinnungsfaktoren der warmen und der kalten Seite des Speichers hergeleitet werden [178]:

$$\epsilon_{warm} = \frac{\bar{T}_{out,warm} - T_{natural,Aquifer}}{\bar{T}_{in,warm} - T_{natural,Aquifer}}; \quad \epsilon_{cold} = \frac{\bar{T}_{in,cold} - T_{natural,Aquifer}}{\bar{T}_{out,cold} - T_{natural,Aquifer}} \quad (4.11)$$

mit  $0 \leq \epsilon_{warm/cold} \leq 1$

Unter der Annahme von gleichen geologischen Parametern für jede Bohrung des Speichers und gleicher Volumina in und aus dem Untergrund ( $\frac{V_{out}}{V_{in}} = 1$ ) ergibt sich

$$\epsilon_{warm} = \epsilon_{cold} = \epsilon.$$

Mit der Definition von  $\epsilon$  in Gleichung 4.11 und einer angenommenen Unabhängigkeit der korrespondierenden Injektionstemperatur kann Gleichung 4.10 umgeformt werden zu:

$$HRF = \frac{(\epsilon \cdot T_{in,warm} + (1 - \epsilon) \cdot T_{natural,Aquifer}) - T_{out,cold}}{T_{in,warm} - (\epsilon \cdot T_{out,cold} + (1 - \epsilon) \cdot T_{natural,Aquifer})} \quad (4.12)$$

Nach differenzieller Umformung der Gleichung 4.12 kann der Einfluss der Einspeichertemperatur auf die Speichereffizienz durch eine Fallunterscheidung qualitativ formuliert werden [76]. Für den Fall, dass die mittlere Ausspeichertemperatur über der natürlichen Aquifertemperatur liegt, gilt eine positive Abhängigkeit der Speichereffizienz von der Einspeichertemperatur (siehe Gleichung 4.13). Bei zunehmender Einspeichertemperatur nimmt die Speichereffizienz zu, bei abnehmender Einspeichertemperatur nimmt die Speichereffizienz ab.

$$\frac{dHRF}{dT_{in,warm}} > 0 ; \bar{T}_{out,cold} > T_{natural,Aquifer} \quad (4.13)$$

Der Speicherhorizont in Lüneburg liegt in einer Tiefe von etwa 450 m und hat eine ungestörte, natürliche Grundwassertemperatur von etwa 26 °C. In der ersten Ausspeicherphase wird die kalte Seite des Aquiferwärmespeichers zunehmend aufgewärmt, da die Eintrittstemperatur auf der kalten Seite  $\bar{T}_{in,cold}$  im Referenzfall durchschnittlich 39,4 °C beträgt. In der zweiten Einspeicherphase liegt die durchschnittliche Temperatur des Thermalwassers, das aus der kalten Seite der Bohrung gefördert wird und über den Wärmetauscher auf die Einspeichertemperatur erwärmt wird, deutlich über der natürlichen Temperatur. Nach Gleichung 4.13 müssten erhöhte Einspeichertemperaturen einen positiven Einfluss auf den Speichernutzungsgrad bewirken und dementsprechend geringere Einspeichertemperaturen einen negativen Einfluss.

Die negative Beeinflussung der Speichereffizienz bei abnehmender Einspeichertemperatur soll nachfolgend durch eine Parameterstudie belegt werden. Für die Simulationsstudie wurde das Referenzmodell verwendet. Als Lastprofil wurde eine modifizierte Version des Lastprofils aus der Machbarkeitsstudie verwendet, um eine Effektüberlagerung und Limitierung der Speicherrückkühlung zu vermeiden. In der Simulationsstudie wurden diejenigen Einspeichertemperaturen variiert, die im Bereich des Sinnvollen liegen und

für die keine Anpassung der eingangs beschriebenen Randbedingungen der Regelung notwendig war.

Die Ergebnisse aus der Simulationsstudie decken sich mit dem analytischen Ansatz aus [178] und den Untersuchungen aus [76]. Eine Erhöhung der Einspeichertemperatur um 2°C bewirkt in dem Untersuchungsgebiet zwischen 75 – 92°C eine Erhöhung der Speichereffizienz von etwa 1 % (siehe Abbildung 4.17).

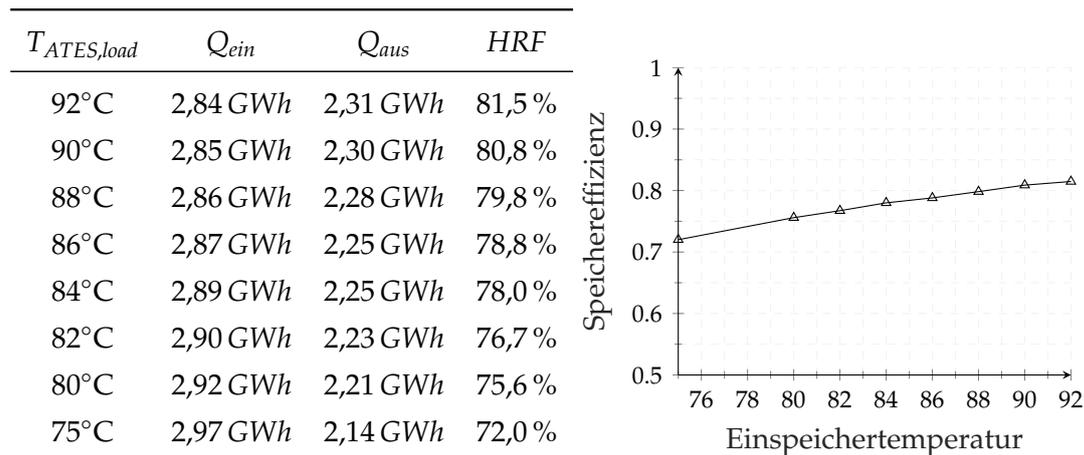


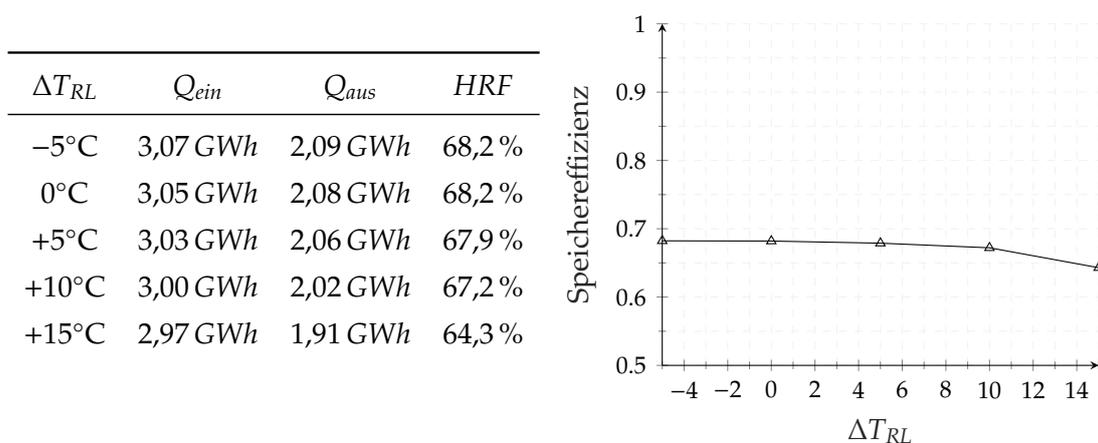
Abb. 4.17.: Einfluss der Einspeichertemperaturen auf die Speichereffizienz des Aquifers ausgewertet für das 10. Simulationsjahr

Durch eine Reduktion der Einspeichertemperatur kann geringfügig mehr Wärme in den Aquifer gespeichert werden, da ein höherer Massenstrom aus der Beimischung der Wärmeerzeugertemperatur zur Einspeichertemperatur eingeregelt wird (vgl. Abbildung 4.9). Im Gegenzug führt eine sinkende Einspeichertemperatur zu einer Reduktion an aus-speicherbarer Wärme, da die treibende Temperaturdifferenz zur Rückkühlung des Aquifers kleiner wird und der Aquifer schneller das kritische Temperaturniveau erreicht, unterhalb welchem eine Versorgung der Hochtemperatur-Abnehmersysteme nicht mehr möglich ist. Da gerade die beiden Hochtemperatur-Abnehmer *Bockelsberg* und *Universität* die Spitzenlast verursachen, fällt ein wesentlicher Mehrwert des Aquifers, nämlich die Deckung der Mittel- und Spitzenlast, weg.

Nach Gleichung 4.10 führt eine zunehmende Wärmemenge, die in den Aquifer während der Einspeicherphase eingespeichert wird, bei einer gleichzeitig reduzierten Wärmemenge, die während der Ausspeicherphase rückgewonnen werden kann, zu einer schlechteren Speichereffizienz.

#### 4.6.2. Einfluss der Rücklauf­temperatur

In Abschnitt 4.4.1 wird die hydraulische und regelungstechnische Einbindung des Aquiferwärmespeichers behandelt. Insbesondere die Rücklauf­temperatur des Abnehmersystems auf niedrigem Temperaturniveau (Low-Ex-Netz) hat einen Einfluss auf die Speichereffizienz, da die Entladung über den Niedertemperatur-Pufferspeicher erfolgt. Zuzüglich einer Verlustdifferenz am Wärmeübertrager kann der Aquiferwärmespeicher auf die Temperatur entladen werden, die im unteren Teil des Niedertemperaturspeichers vorherrscht. Diese Temperatur entspricht der Rücklauf­temperatur des Low-Ex-Netzes. Grundsätzlich kann ein Aquiferwärmespeicher im Kontext eines Nahwärmenetzes ohne Verwendung einer Wärmepumpe auf die tiefste Systemtemperatur entladen werden. Im Idealfall entspricht diese der natürlichen Hintergrundtemperatur des Aquifers. Im Referenzfall beträgt die Rücklauf­temperatur 25°C. Zur Abschätzung des Einflusses der Rücklauf­temperaturen wurden diese in der Simulationsstudie in einer realistischen Schwankungsbreite in 5°C-Schritten erhöht bzw. reduziert.



**Abb. 4.18.:** Einfluss der Rücklauf­temperaturen des Low-Ex-Netzes auf die Speichereffizienz des Aquifers ausgewertet für das 10. Simulationsjahr

Es ist zu beobachten, dass eine Änderung der Rücklauf­temperaturen des Low-Ex-Netzes um  $\pm 5^\circ\text{C}$  quasi keinen Einfluss auf die Speichereffizienz nimmt. Diese Charakteristik ist durch den Umstand zu erklären, dass der Aquiferwärmespeicher ab dem 2. Betriebsjahr keine Tiefenentladung der warmen Seite  $<40^\circ\text{C}$  mehr erfährt (vgl. Abbildung 5.12) und

somit eine Änderung der Rücklauf­temperatur unterhalb dieser Grenztemperatur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Speichereffizienz ausübt. Weiterhin entscheidend ist der mengenmäßig geringe Anteil des Low-Ex-Netzes am Gesamtwärmebedarf. Dieser Anteil beträgt mit  $1,2 \frac{\text{GWh}}{\text{a}}$  etwa 12 % des jährlichen Verbrauchs. Diesbezügliche Untersuchungen haben gezeigt, dass sich der Einfluss der Rücklauf­temperatur stärker bemerkbar macht, wenn der Anteil des Low-Ex-Netzes am jährlichen Gesamtwärmeverbrauch steigt. Gleichsam hat ein höherer Anteil auch einen positiven Einfluss auf die Speichereffizienz, da im Low-Ex-Netz die niedrigsten Systemtemperaturen auftreten. Diese sind letztlich die Grenztemperatur, auf welche der Aquifer entladen werden kann, sofern keine indirekte Entladung über eine Wärmepumpe stattfindet.

#### 4.6.3. Einfluss der Wärmeleistung der Blockheizkraftwerke

Unter der Annahme, dass die BHKW's aller Leistungsklassen (LK) die gleiche Stromkennzahl und das gleiche Teillastverhalten wie die Referenzmotoren haben (siehe Abbildung A.5), werden die Modulleistungen für die zu untersuchenden Leistungsklassen berechnet (siehe Tabelle A.2). Für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse müssen in der Systemsimulation zusätzlich die Regelparameter geändert werden, die für die Be- und Entladung des Aquiferwärmespeichers zuständig sind. Aufgrund der zunehmenden Erzeugerleistung, muss beispielsweise der maximale Belademassenstrom erhöht werden, um die Überschusswärme in den Aquifer einspeichern zu können. Bei der Entladung muss berücksichtigt werden, dass eine erhöhte Erzeugerleistung dazu führt, dass die anteilige Spitzenlast geringer wird. Ohne eine Änderung der Entladeregulierung würde der Aquiferspeicher nicht tief genug entladen werden.

In der Simulationsstudie werden die BHKW-Module einschließlich der Leistungsklasse 700 in der Erzeugerhierarchie priorisiert. Der Aquiferwärmespeicher unterstützt während der Entladung nur den Leistungsanteil, den die BHKWs nicht erbringen können. Ab Leistungsklasse 800 entlädt der Aquiferwärmespeicher auch dann, wenn die Leistung der BHKWs ausreichend wäre. Die überschüssige Entladeleistung des Aquiferwärmespeichers führt zu einem Temperaturanstieg im HT-Speicher und damit zu einem Anstieg der Rücklauf­temperaturen zu den BHKW-Modulen. Die Limitierung der BHKW-Rücklauf­temperatur auf maximal 70°C sorgt dafür, dass die BHKW-Module nicht überhitzen. Die Regelstrategie für die Leistungsklassen 800 und 900 stellt die Erzeuger

Aquifer und BHKWs auf eine Hierarchiestufe.

Je größer die Leistung der BHKW-Module ist, desto geringer wird die anteilige Spitzenlast, die nicht gedeckt werden kann. Sie nimmt für die untersuchten Leistungsklassen von 19,1 % auf 1,5 % ab. Korrespondierend dazu steigt der KWK-Deckungsanteil von 80,9 % auf 98,5 % an.

Allerdings besteht ab einer Leistungsklasse von 800 ein Missverhältnis aus Erzeuger- und Abnehmerleistung, das zu einem Effizienzeinbruch des Aquiferwärmespeichers führt. Zwar wird mit zunehmender BHKW-Erzeugerleistung mehr Wärme in den Aquifer eingespeichert, dieser Zusatz an Wärme kann aber im Entladezyklus trotz der regelungstechnisch angeordneten geringeren Laufzeit der BHKWs nicht wieder rückgewonnen werden (siehe Abbildung 4.5).

**Tab. 4.5.:** Einfluss der BHKW-Erzeugerleistung auf die Effizienz des Aquiferwärmespeichers und den KWK-Deckungsanteil ausgewertet für das 10. Simulationsjahr

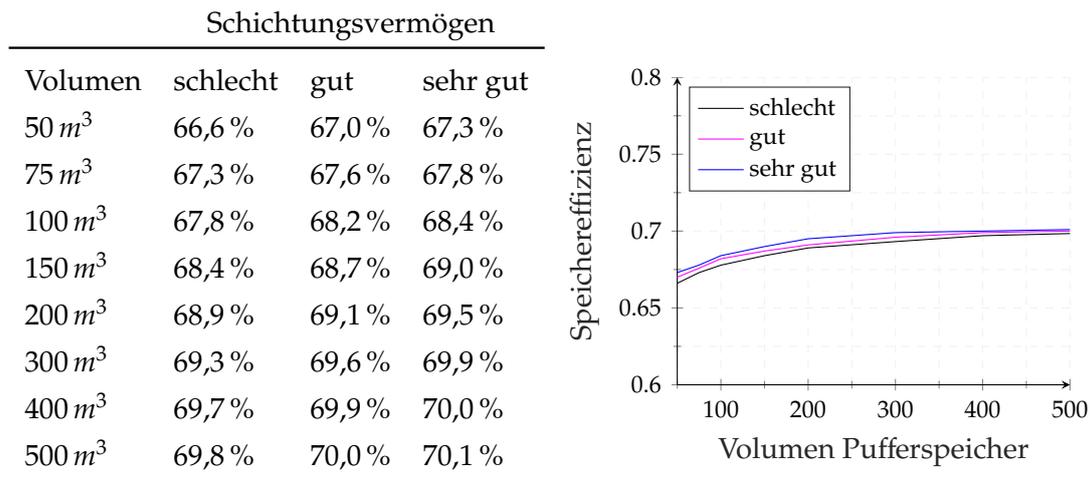
LK	$Q_{ch}$	$Q_{disch}$	HRF	KWK-Anteil	Kessel	$W_{el,Modul}$	$t_{Vollast}$
600	2,36 GWh	1,61 GWh	0,68	80,9 %	2,12 GWh	4,12 GWh	8733 h
700	3,3 GWh	2,19 GWh	0,66	93,2 %	0,76 GWh	4,77 GWh	8669 h
800	4,35 GWh	2,21 GWh	0,51	98,1 %	0,22 GWh	5,38 GWh	8555 h
900	5,35 GWh	2,13 GWh	0,4	98,5 %	0,17 GWh	5,84, GWh	8251 h

#### 4.6.4. Einfluss des Pufferspeichervolumens und des Schichtungsvermögens

Um eine möglichst hohe Speichereffizienz zu erzielen, erfolgt die Entladung des Aquiferwärmespeichers über den Niedertemperaturspeicher und die Beladung über den Hochtemperaturspeicher. So wird sichergestellt, dass die maximal auftretenden Systemtemperaturen für die Beladung vorgehalten werden und die minimal auftretenden Systemtemperaturen für die Rückkühlung des Aquifers genutzt werden. Da die Wärmeerzeugerfolgeschaltung über den Pufferladezustand des Hochtemperatur-Pufferspeichers geregelt ist, wird der Einfluss seines Volumens und seines Schichtungsvermögens auf die Speichereffizienz näher untersucht.

In der Simulationsstudie wird von einem konstanten Höhe-zu-Durchmesser (H/D)-Verhältnis von 2 : 1 und einer volumenabhängigen Wärmeverlustrate gemäß Glei-

chung 4.1 ausgegangen. Die untersuchten Speichervolumina zwischen  $50 - 500 \text{ m}^3$  wurden jeweils für verschiedene Schichtungsvermögen untersucht. Dabei wurde für einen Speicher mit schlechtem Schichtungsvermögen angenommen, dass er drei isotherme Temperaturfronten pro Meter Speicherhöhe ausbilden kann. Ein gut geschichteter Speicher kann fünf Temperaturfronten pro Meter Speicherhöhe ausbilden und ein sehr gut geschichteter Speicher zehn. Diesen Annahmen entsprechend wurde die Anzahl der Speicherknotten  $N$  (vgl. Abbildung 4.3) für jede Simulationsvariante vorgegeben



**Abb. 4.19.:** Einfluss des Speichervolumens und des Schichtungsvermögens des Hochtemperatur-Pufferspeichers auf die Speichereffizienz des Aquifers

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass das Speicherschichtungsvermögen des HT-Pufferspeichers einen geringeren Einfluss auf die Speichereffizienz des Aquifers hat als das Volumen. Da die Regelung der Beladung und Entladung des Aquifers über die Berechnung des Pufferladezustandes erfolgt, lässt sich erklären, dass die Speicherschichtung in Bezug auf die Effizienz des Aquifers eine untergeordnete Rolle spielt, da der Ladezustand den Energieinhalt über die minimale bzw. maximale Temperatur berücksichtigt. Insofern werden die Be- und Entladekriterien für die gleichen Energieinhalte im Speicher erfüllt. Somit kann eine bessere Speicherschichtung zwar zu einer größeren nutzbaren Kapazität führen, durch die gleichbleibenden Be- und Entladekriterien aber nicht zu einer wesentlich effizienteren Be- und Entladung des Aquifers beitragen. Das Volumen des HT-Pufferspeichers hat ebenfalls einen relativ geringen Einfluss auf die Speichereffizienz des Aquifers. Bei einem 10-Mal größeren Volumen des HT-

Pufferspeichers kann die Effizienz des Aquifers um etwa 3 % erhöht werden.

Bei einem Volumen von  $50 \text{ m}^3$  (sehr gut geschichtet) wurden 178 Startvorgänge der beiden BHKWs aufgezeichnet.  $1,02 \text{ GWh}$  des jährlichen Gesamtwärmeverbrauchs (= 9,1 %) müssen konventionell gedeckt werden. Die Verluste des HT-Pufferspeichers betragen  $317 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}$ .

Vergrößert man das Volumen auf  $500 \text{ m}^3$  (sehr gut geschichtet), starten die BHKWs in Summe nur noch 27 mal. Mit  $1140 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}$  sind die Speicherverluste derart groß, dass die (regenerativen) Wärmeerzeuger zunehmend gegen die Verluste des Speichers arbeiten müssen und der konventionell gedeckte Wärmeverbrauch auf Gesamtsystemebene mit  $1,58 \text{ GWh}$  auf über 14,2 % ansteigt.

Je größer das Speichervolumen ist, desto geringer ist der Einfluss der Speicherschichtung auf die Effizienz des Aquifers (vgl. Abbildung 4.19).

#### 4.6.5. Einfluss des Temperaturniveaus der Kollektoren

Grundsätzlich sind Leistung und Effizienz von Kollektoren gemäß der Wirkungsgradkennlinie umso höher, je geringer die Differenz zwischen der mittleren Kollektorfluidtemperatur  $\vartheta_m$  und der Umgebungstemperatur  $\vartheta_{amb}$  ist [179]. Daher sind niedrige (mittlere) Kollektortemperaturen prinzipiell zu bevorzugen.

Dem entgegen steht die Forderung, die Solarthermie so einzubinden, dass sie als vollwertiger Erzeuger betrachtet werden kann. Vor diesem Hintergrund wurde der Einfluss des Temperaturniveaus der Kollektoren untersucht, um eine optimale Regeltemperatur zu finden. Die optimale Kollektortemperatur steht wie eingangs erwähnt im Spannungsfeld von einem möglichst hohen solaren Nutzwärmeanteil ( $Q_{sol,N}$ ) bei einem vertretbar guten Kollektorwirkungsgrad. In der Parametervariation wurde die Kollektorzieltemperatur für eine Anlagenkonfiguration mit  $2000 \text{ m}^2$  Flachkollektoren zwischen  $60 - 95 \text{ }^\circ\text{C}$  variiert. Um Zieltemperaturen  $T_{set,coll}$  bis  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  untersuchen zu können, wurde die sekundärseitige Pumpenregelung im Vergleich zu Abschnitt 4.4.2 verändert. Die sekundärseitige Pumpe geht an, wenn die Eintrittstemperatur in den Wärmeübertrager mindestens  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  beträgt und bleibt solange in Betrieb, bis die Eintrittstemperatur  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  unterschreitet.

Für die Parameterstudie wurde ein  $2000 \text{ m}^2$  Kollektorfeld mit Arcon-Sunmark Flachkollektoren (ID: SP SC0842-14) simuliert. Als Wärmeträgermedium im Solarkreislauf wurde ein Glykol-Wassergemisch verwendet.

Mit den Simulationsergebnissen konnte nachgewiesen werden, dass sich niedrigere Kollektortemperaturen positiv auf die Effizienz des Kollektors und des Aquifers auswirken. Die Netzdienlichkeit im Sinne der solaren Nutzwärme, die dem anlagenseitigen Wärmenetz übertragen werden kann, nimmt hingegen mit sinkenden Kollektortemperaturen von über  $420 \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$  auf knapp  $245 \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$  ab (siehe Tabelle 4.6).

**Tab. 4.6.:** Einfluss der eingeregelter Kollektorzieltemperatur auf spezifische Kollektorkennzahlen [Bezug: Aperturfläche] und auf das Effizienzverhalten des Aquifers ausgewertet für das 10. Simulationsjahr

$T_{set,coll}$	$Q_{coll,spez}$	$Q_{sol,N}$	$Q_{ch}$	$Q_{disch}$	HRF
60 °C	539,9 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	244,9 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	3,33 GWh	2,37 GWh	71,1 %
70 °C	522,9 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	261,2 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	3,36 GWh	2,39 GWh	71,2 %
80 °C	503,3 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	341,6 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	3,53 GWh	2,46 GWh	69,8 %
85 °C	492,6 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	415,2 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	3,64 GWh	2,53 GWh	69,4 %
90 °C	484,4 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	424,9 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	3,65 GWh	2,54 GWh	69,5 %
95 °C	476,6 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	420,1 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	3,64 GWh	2,53 GWh	69,5 %

Eine Reduktion oder Substitution des fossil bereitgestellten Anteils der Spitzenlastkessel kann maßgeblich nur durch die solar gewonnene Wärme erfolgen, die auch tatsächlich als Systemertrag in Erscheinung tritt. Die Maximierung von  $Q_{sol,N}$  konnte mit einer Zieltemperaturregelung des Kollektors auf 90 °C erreicht werden und ist aus energetischer Sicht auf Gesamtsystemebene sinnvoll, auch wenn der Kollektorwirkungsgrad bei niedrigen Temperaturen höher ist. Bei einem maximalen solaren Systemertrag von  $424,9 \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$  verbleibt in Kombination mit dem Aquifer ein fossil gedeckter Gesamtwärmeverbrauch von unter 4 %. Für alle anderen Simulationen ist der fossile Anteil am Gesamtwärmeverbrauch größer.

Mit einer Zieltemperaturregelung auf 90 °C können knapp 88 % der im Kollektorkreislauf umgewandelten Solarwärme an das Wärmenetz übertragen werden. Bei einer Zieltemperaturregelung auf 60 °C beträgt der Anteil nur noch etwa 45 %.

#### 4.6.6. Einfluss der Kollektorfeldgröße

Solar unterstützte Nahwärmesysteme mit solaren Deckungsanteilen von etwa 35 % am Gesamtwärmebedarf ermöglichen die Einsparung eines beträchtlichen Anteils fossiler Brennstoffe bei gleichzeitig moderaten Investitionskosten verglichen mit Systemen mit einem solaren Deckungsanteil von > 50 % [148].

Für die bilanzielle Deckung des gesamten Wärmeverbrauchs der drei Sommermonate (Juni, Juli und August) durch die Solarthermie, sind bei vorliegendem Lastprofil und der Rückkühlung des Kollektorkreislaufes über den NT-Speicher gemäß Abbildung 4.13 etwa  $4000 \text{ m}^2$  notwendig. In einer Voruntersuchung wurden die Kollektorerträge und die Rückkühlung des Aquifers in einer Systemsimulation mit Aquifer und Solarthermie untersucht. Überträgt man die Dimensionierungsrichtlinien aus [148] für ein solar unterstütztes Nahwärmesystem mit einer Wärmelast von  $10 \frac{\text{GWh}}{\text{a}}$  und einem erdvergrabenen Heißwasserspeicher als Saisonspeicher, wäre für den Standort Hamburg eine Kollektoraperturfläche von etwa  $17000 \text{ m}^2$  notwendig, um einen solaren Deckungsbeitrag  $f_{\text{sol}}$  von 35 % zu erreichen.

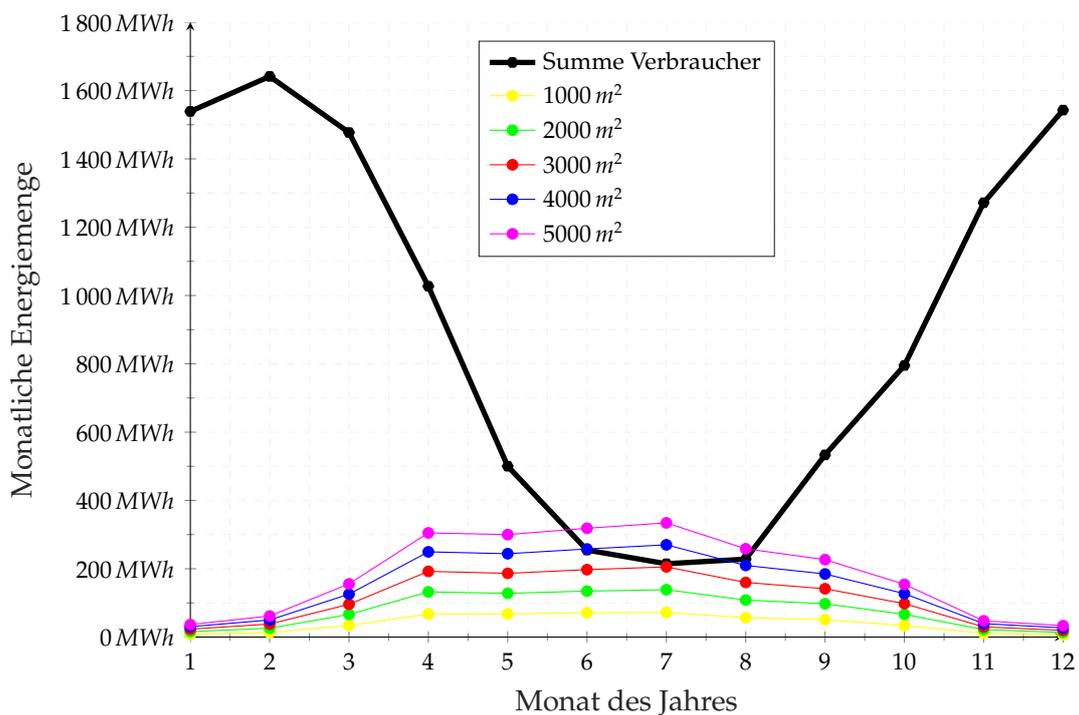


Abb. 4.20.: Solarthermische Erträge aus den Kollektoren (Arcon Sunmark) für unterschiedliche Kollektorfeldgrößen [Bezugsfläche: Aperturfläche]

Mit zunehmender Kollektorfeldgröße steigt die Nutzungskonkurrenz von Aquifer und Solarthermie, welche beide durch das Niedrigtemperatursystem rückgekühlt werden. Ein vermeintlich wirtschaftliches Optimum mit einem solaren Deckungsanteil von 35 % kann für das in dieser Arbeit untersuchte Anlagensystem auf Grundlage der durchgeführten Simulationsergebnisse nicht erreicht werden.

Bei näherer Betrachtung der Rückkühlproblematik konnte festgestellt werden, dass die warme Bohrung des Aquiferwärmespeichers in Kombination mit einer  $5000 \text{ m}^2$  Solarthermieanlage im 10. Simulationsjahr nur noch auf  $T_{A,RK} = 74,5^\circ\text{C}$  entladen werden kann. Der HRF beträgt dabei 59,2 %. Da das Niedrigtemperatursystem bis zu einer Temperatur von etwa  $60^\circ\text{C}$  direkt versorgt werden kann, verbleibt im Entladezyklus ein gewisser Temperaturüberhang ungenutzt im Einzugsgebiet der warmen Bohrung. Der ungenutzte Temperaturüberhang führt zu Effizienzeinbußen. In anderen Worten ist der Temperaturüberhang eine verschenkte Energiemenge im Untergrund, die nicht genutzt wird, obwohl das Temperaturniveau ausreichend wäre, um die Hochtemperaturabnehmer zu versorgen.

Im Vergleich dazu kann die warme Bohrung des Aquifers in Kombination mit einer  $500 \text{ m}^2$  Solarthermieanlage im 10. Simulationsjahr auf  $61,2^\circ\text{C}$  entladen werden und es verbleibt praktisch kein Temperaturüberhang im Untergrund, mit dem das Hochtemperatur-Abnehmersystem weiter versorgt werden könnte. Die Speichereffizienz ist in dieser Anlagenkonfiguration mit 77,1 % um knapp 18 % höher (Tabelle 4.7).

**Tab. 4.7.:** Einfluss der Kollektorfeldgröße auf spezifische Kollektorkennzahlen [Bezug: Aperturfläche] und auf das Effizienzverhalten des Aquifers ausgewertet für das 10. Simulationsjahr

$A_{coll,AP}$	$Q_{coll,spez}$	$Q_{sol,N}$	$f_{sol}$	$Q_{ch}$	$Q_{disch}$	HRF	$T_{A,RK}$
$500 \text{ m}^2$	$509,1 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$	$454 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$	2,1 %	2,77 GWh	2,14 GWh	77,1 %	$61,2^\circ\text{C}$
$1000 \text{ m}^2$	$493,7 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$	$446,4 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$	4 %	3,22 GWh	2,31 GWh	71,7 %	$64,5^\circ\text{C}$
$2000 \text{ m}^2$	$474,8 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$	$432,5 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$	7,7 %	3,57 GWh	2,48 GWh	69,5 %	$67,2^\circ\text{C}$
$3000 \text{ m}^2$	$462,6 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$	$423,9 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$	11,2 %	3,99 GWh	2,67 GWh	66,9 %	$69,5^\circ\text{C}$
$4000 \text{ m}^2$	$453,8 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$	$416,1 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$	14,6 %	4,34 GWh	2,74 GWh	63,1 %	$72,1^\circ\text{C}$
$5000 \text{ m}^2$	$462,66 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$	$410,7 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$	17,9 %	4,6 GWh	2,72 GWh	59,2 %	$74,5^\circ\text{C}$

Je größer die Aperturfläche des Kollektorfeldes wird, desto größer wird die überschüssige

Wärmemenge, die während des Beladezeitraumes in den Aquifer eingespeichert werden kann. Aufgrund der limitierten Rückkühlung des Aquifers durch das Niedrigtemperatursystem, fällt die Effizienz des Aquiferwärmespeichers ab einer Kollektorfeldgröße von etwa  $3000\text{ m}^2$  ab. Deshalb erscheint eine genauere Untersuchung der Kollektorfeldgröße nur im Bereich zwischen  $500\text{ m}^2$  und  $5000\text{ m}^2$  sinnvoll. Weiterhin muss ab einer Fläche von  $2000\text{ m}^2$  die Regelung in Bezug auf die Erzeugerhierarchie und die maximalen Be- und Entlademassenströme angepasst werden, was die Vergleichbarkeit der Ergebnisse in gewisser Weise relativiert.

Tendenziell lässt sich der solare Deckungsbeitrag  $f_{sol}$  im Untersuchungsgebiet durch den Zubau von  $500\text{ m}^2$  an Kollektorfläche um etwa 2 % steigern. Der durch die Entladung des Aquifers verursachte Temperaturanstieg, v.a. im Niedrigtemperatursystem, gewinnt mit steigender Kollektorfläche an Bedeutung. Die mittleren Kollektortemperaturen steigen mit zunehmender Kollektorfläche an und lassen die Kollektor- bzw. Systemerträge sinken.

In dieser Arbeit beschränkt sich das Untersuchungsintervall deshalb auf Kollektorfeldgrößen zwischen  $500 - 5000\text{ m}^2$ , auch wenn sich gerade Anlagengrößen  $> 5000\text{ m}^2$  durch Skalierungseffekte besonders kostengünstig realisieren ließen (vgl. Berechnung der spezifischen Grenzkosten in Abschnitt 6.2.1.2).

## **5. Erhöhung der Prognosegenauigkeit durch die Entwicklung eines wahrscheinlichkeitsbasierten Lastprofilgenerators**

Die zunehmende Komplexität von Energiesystemen auf Einzelobjektebene und Quartiersebene erfordert bei deren Planung und Entwicklung oftmals den Einsatz von Simulationssoftware. In diesem Zusammenhang nehmen die zu Grunde gelegten Lastprofile (Wärmeverbrauch, Wärmeleistung, Temperaturniveau, Stromverbrauch, usw.) großen Einfluss auf energetische und finanzielle Planungswerte. Häufig kommen Standardlastprofile, Referenzlastprofile oder detaillierte physikalische Modelle zum Einsatz. Im Bereich von Quartieren müssen eine Vielzahl von Gebäuden betrachtet, Aggregationen von Lastspitzen vermieden und ausgleichende Effekte berücksichtigt werden [180]. Diese Aspekte sind bei der Wahl der Lastprofile teilweise vernachlässigt, nicht verfügbar oder erfordern im Falle von detaillierten physikalischen Modellen einen zu hohen Rechenaufwand für eine Parameterstudie.

Die verwendeten Lastprofile nehmen Einfluss auf die energetischen Simulationsergebnisse und damit auf die Wirtschaftlichkeit. Insbesondere bei einer Langzeitbetrachtung des Systems - die angenommene Nutzungsdauer des Aquiferwärmespeichers beträgt 50 Jahre - sind mit sich überlagernden Effekten und Einflüssen auf energetische Aspekte zu rechnen, wenn jährlich verschiedene Lastprofile verwendet werden.

Der Lastprofilgenerator nutzt das Markov-Chain-Monte-Carlo-Verfahren (MCMC), um mit Hilfe von gemessenen Temperaturen unter Ausnutzung der Korrelation zwischen Umgebungstemperatur und Wärmeleistung individuelle Lastprofile zu erzeugen.

## 5.1. Aufbau und Funktionsweise des Lastprofilgenerators

Der Lastprofilgenerator besteht aus Haupt- und Unterprogrammen, die in Matlab programmiert sind. Im Workflow bildet Matlab die Schnittstelle zwischen Excel und TRNSYS. Excel ist dem Lastprofilgenerator vorgelagert. In Excel wurden die csv-Dateien des Deutschen Wetterdienstes für den Export in Matlab vorbereitet. Die im Lastprofilgenerator erzeugten Lastprofile werden im Anschluss an TRNSYS übergeben und als externe Datei eingelesen (Abbildung 5.1).

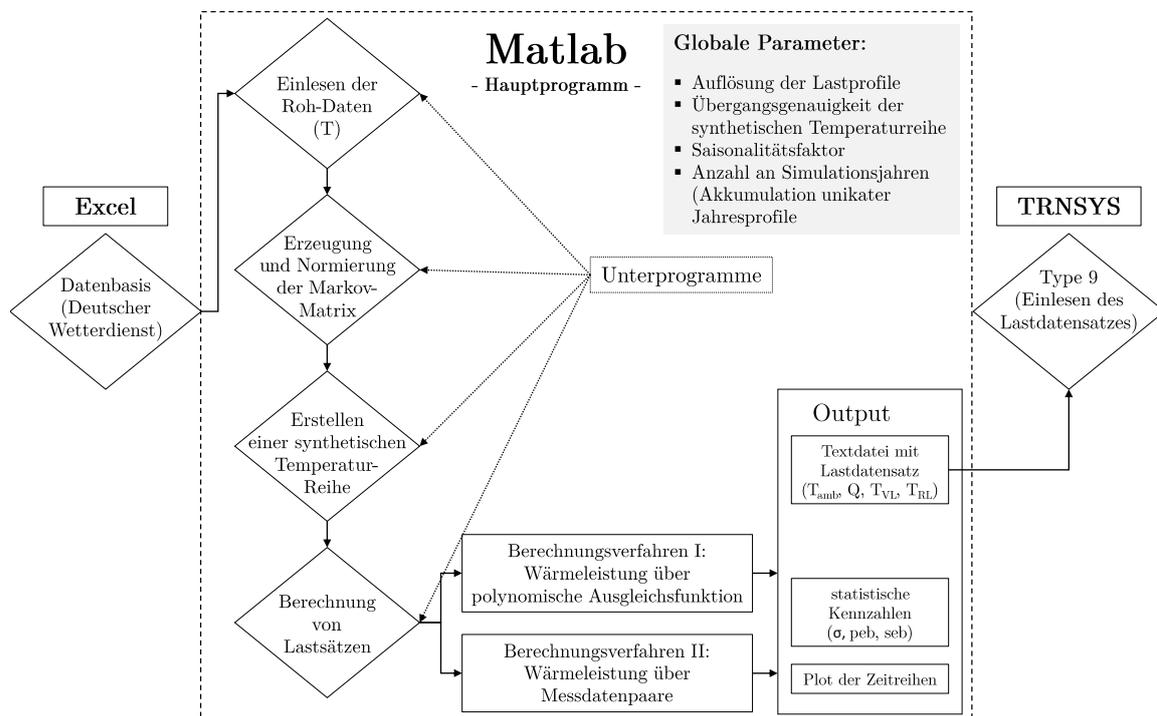


Abb. 5.1.: Aufbau des Lastprofilgenerators

Im Hauptprogramm von Matlab können globale Parameter eingestellt werden, die anschließend für jedes Unterprogramm verwendet werden. Die Standardeinstellungen der Auflösung der synthetischen Zeitreihe und Lastprofile beträgt 10 Minuten und erfasst eine Übergangsgenauigkeit der Temperaturen von  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Grundsätzliche Transformationsmöglichkeiten und Parametereinstellungen sind anschließend in Abschnitt 5.3 erläutert.

### 5.1.1. Datengrundlage und Datenaufbereitung

Grundlage für die Funktionsweise des Lastprofilgenerators ist eine hinreichend große Datenbasis, auf der die synthetischen Temperaturreihen erzeugt werden. Im ersten Schritt wurden hierfür Rohdaten beim Deutschen Wetterdienst gekauft. Für die Wittersation in Lüneburg-Mitte lagen in Bezug auf die gewünschte Auflösung und in Bezug auf den gewünschten Zeitraum keine konsistenten Wetterdaten vor, weswegen der Standort Wendisch-Evern (Stations-ID 6093) gewählt wurde. Der Abstand der Wetterstation zum Untersuchungsgebiet, für welches standortspezifische Lastprofile erstellt werden, beträgt weniger als 5 km. Das Datenpaket des Deutschen Wetterdienstes beinhaltet die gemessenen Lufttemperaturen der Wetterstation in 2 m Höhe als 10-minütlich aufgelöste Messwerte mit einer erfassten Genauigkeit von 0,1°C. Der Aufzeichnungszeitraum des Datenpaketes beginnt am 31.03.2003 und endet am 05.10.2016. Der Datenlog umfasst über 710 000 Messzeitpunkte und wurde für die Verwendung als Datenbasis für den Lastprofilgenerator leicht verändert. Zum einen wurden nur ganze Jahre betrachtet, zum anderen wurden die Datenpunkte des 29. Februar der Schaltjahre 2004, 2008 und 2012 gelöscht, um eine einheitliche zeitliche Länge der Jahre zu erhalten. In der Logik des Lastprofilgenerators besteht jedes Jahr aus genau 8760 h. Die genaue Berechnungsmethodik wird in Abschnitt 5.1.3 behandelt.

Die aufbereiteten Daten werden in einer Datei gespeichert und für jedes synthetisch erstellte Lastprofil des Standortes eingelesen. Im ersten Unterprogramm des Lastprofilgenerators liest Matlab die gemessene Temperaturabfolge der Jahre 2004 bis einschließlich 2015 ein und spannt einen Temperatur-Vektor  $A$  mit 630 720 Temperatureinträgen auf. Die minimale Temperatur, die in diesem Zeitraum gemessen wurde, beträgt  $-18,1^{\circ}\text{C}$ , die maximale Temperatur beträgt  $37,3^{\circ}\text{C}$ . In Abhängigkeit der gewünschten Übergangsgenauigkeit (*resolution*) der Lastprofile, welche im Hauptprogramm von Matlab festgelegt wird, ergibt sich der Betrachtungsraum  $B$  zu:

$$B = \text{abs}(\min(A)) + \max(A) + \text{resolution}(A) \quad (5.1)$$

Mit  $\text{resolution}(A) = 0,1^{\circ}\text{C}$ ,  $\min(A) = -18,1^{\circ}\text{C}$  und  $\max(A) = 37,3^{\circ}\text{C}$  ergibt sich ein Betrachtungsraum von  $B = 55,5^{\circ}\text{C}$ . Die Dimension des Zustandsraumes vergrößert sich gemäß

der Übergangsgenauigkeit zu

$$N = \frac{B}{\text{resolution}(A)} = 555 \quad (5.2)$$

Einschließlich des Zustandes der minimalen Temperatur von  $-18,1^\circ\text{C}$  und des Zustandes der maximalen Temperatur von  $37,3^\circ\text{C}$  können bei einer Übergangsgenauigkeit von  $0,1^\circ\text{C}$  555 Temperatur-Zustände angenommen werden. Die Dimension des Zustandsraumes beträgt  $N = 555$ .

Im nächsten Abschnitt wird das zweite Unterprogramm von Matlab beschrieben. In dem Unterprogramm findet die Überführung des Temperaturvektors  $A$  in eine Übergangsmatrix  $P$  statt.

### 5.1.2. Markov-Chain-Monte-Carlo-Verfahren

Die Nutzung des MCMC-Verfahrens ist ein an Bedeutung gewinnendes Verfahren, um zukünftige Erwartungswerte für komplexe Systeme schätzen zu können [181, 182]. Im Falle des Lastprofilgenerators wird das Verfahren angewendet, um basierend auf den in 5.1.1 beschriebenen Messdaten eine wahrscheinlichkeitsbasierte, synthetische Temperaturreihe erzeugen zu können.

Dabei entsteht ein System mit bedingter Wahrscheinlichkeit ohne absorbierende Zustände. Konkret bedeutet das, dass ein Temperaturwechsel zwischen endlich vielen Zuständen betrachtet wird und dabei ausgeschlossen ist, dass beim Erreichen einer bestimmten Temperatur kein weiterer Übergang stattfindet, obgleich mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit im nächsten Zeitschritt die gleiche Temperatur angenommen werden kann.

Das MCMC-Verfahren ist ein stochastischer Prozess, der die Folge einer diskreten Zufallsgröße  $X_t$  beschreibt.  $X_t$  repräsentiert dabei eine Temperatur in einem endlichen Zustandsraum  $\Omega = \{1,2,3,\dots,N\}$ . Unter der Prämisse einer endlichen Markov-Kette mit bedingter Wahrscheinlichkeit, können alle im Zustandsraum auftretenden Übergangswahrscheinlichkeiten von Zustand  $i$  auf Zustand  $j$  für  $i \geq 1$  und  $j \leq N$  als Matrixelemente geschrieben werden [183]:

$$P(X_{t+1} = j | X_t = i) = p_{ij} \quad (5.3)$$

Die Matrixelemente definieren eine  $N \times N$  Übergangsmatrix  $P$ :

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1N} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{N1} & p_{N1} & \dots & p_{NN} \end{pmatrix}$$

Jede Zeile der normierten Übergangsmatrix  $P$  beschreibt eine bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung von Temperaturübergängen. Die Zeilensumme von  $P$  beträgt 1. Eine Übergangswahrscheinlichkeit  $p_{ij}$  kann aus

$$p_{ij} = \frac{N_{ij}}{N_i} \quad (5.4)$$

berechnet werden, wobei  $N_{ij}$  die Anzahl der Übergänge innerhalb einer Sequenz  $s = \{X_t\}$  von Zustand  $i$  zu Zustand  $j$  beschreibt und  $N_i$  für die gesamte Anzahl des Zustandes  $i$  in der betrachteten Sequenz  $s = \{X_t\}$  steht. Unter der Annahme einer Normalverteilung kann man bei der Übergangswahrscheinlichkeit  $p_{ij}$  von einem *Maximum Likelihood Estimator* (MLE) sprechen, dem wahrscheinlichsten Temperaturübergang von Zustand  $i$  zu Zustand  $j$  [184, 185].

Im Falle des Lastprofilgenerators wird eine weitere Dimension eingeführt, um qualitativ sinnvolle Ergebnisse zu ermöglichen - der Saisonalitätsfaktor  $SF$ . Der Saisonalitätsfaktor  $SF$  teilt das Jahr in gleichmäßige Sequenzen  $s$  auf, um den jährlichen Temperaturverlauf besser abbilden zu können. Aus einem Saisonalitätsfaktor von  $SF = 1$  und der Dimension des Zustandsraumes von  $N = 555$  resultiert die eingangs dargestellte Übergangsmatrix  $P$ . Im Regelfall wird der Saisonalitätsfaktor  $SF = 12$  verwendet. Dabei wird das Jahr in 12 gleiche Zeitintervalle aufgeteilt, wobei eine Sequenz einem Monat entspricht. Es resultiert eine  $555 \times 555 \times 12$  - Übergangsmatrix. Entsprechend der Saisonalität werden die Übergänge des Temperaturvektors  $A$  erfasst und in die jeweilige Matrix geschrieben. Alle Übergänge der gemessenen Temperaturen, die in die Sequenz  $s = 1$  fallen, also dem Januar, werden in die Übergangsmatrix  $555 \times 555 \times 1$  geschrieben. Für die Sequenz  $s = 2$  werden die Temperaturübergänge in die Übergangsmatrix  $555 \times 555 \times 2$  geschrieben. Die folgenden Sequenzen  $3 \leq s \leq SF$  stellen die analogen Temperaturübergänge in ihre korrespondierende Dimensionen dar. Allgemein entsteht

eine  $N \times N \times SF$  - Übergangsmatrix.

### 5.1.3. Erstellung einer synthetischen Temperatur-Zeit-Reihe

Im Folgenden wird das Unterprogramm in Matlab beschrieben, das auf Basis der normierten und zeilensummierten Markov-Matrix eine synthetische Temperatur-Zeit-Reihe zusammensetzt. In Abhängigkeit der in den globalen Parametern festgelegten Anzahl an Simulationsjahren, setzt der Lastprofilgenerator eine Temperatur-Reihe zusammen, die die jeweiligen Übergangswahrscheinlichkeiten innerhalb der jeweiligen Sequenz  $1 \leq s \leq SF$  berücksichtigt. Der Startwert wird als Mittelwert der Sequenz  $s = 1$  initialisiert. Für jedes Reihenglied innerhalb der Sequenz erfolgt die Temperaturzuweisung durch eine gewürfelte, gleichmäßig verteilte Zufallsvariable  $x$  im Intervall zwischen 0 und 1. Für jedes  $x$  sucht das Programm in der Markov-Übergangsmatrix der jeweiligen Sequenz den Eintrag  $p_{ijs} \geq x$ , mit  $1 \leq s \leq SF$ . Anschließend wird der Eintrag  $p_{ijs}$ , der eine bestimmte Temperatur repräsentiert, durch die zugehörige Temperatur ersetzt und dem Reihenglied für den Zeitpunkt übergeben. Fortan bewegt sich die Reihenentwicklung in der Sequenz, bis das letzte Reihenglied der Sequenz erreicht ist. Wenn das letzte Reihenglied erreicht ist, wird die nächste Sequenz betrachtet und in die Dimension der Markov-Matrix gewechselt, die der Sequenz entspricht. Beim Wechsel in die neue Dimension wird der letzte Übergangswert als Startwert für den nächsten Abschnitt angenommen, das heißt der Initialwert der Reihenentwicklung in der neuen Sequenz ist gleich dem letzten Wert aus der vorherigen Sequenz. Diese sequentielle Reihenentwicklung wiederholt sich, bis die Reihe das  $n$ -te Glied erreicht hat.

$$n = \frac{Y \cdot 8760 \cdot 60}{r_{LP}} \quad (5.5)$$

Die Anzahl der Reihenglieder  $n$  ist abhängig von den in den globalen Parametern festgelegten Simulationsjahren  $Y$  und der gewünschten Auflösung der Lastprofile  $r_{LP}$ .

### 5.1.4. Berechnung von Wärmelastprofilen

Ein Lastsatz, der das Wärmelastprofil definiert, beinhaltet die Wärmeleistung  $\dot{Q}$  in  $kW$ , den Massenstrom  $\dot{m}$  in  $kg/h$  sowie die Vorlauftemperatur  $T_{VL}$  und die Rücklauftemperatur  $T_{RL}$ . Sie stehen über die als konstant angenommene spezifische Wärmespeicherkapazität

des Wassers  $c_p$  in folgendem Zusammenhang:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{VL} - T_{RL}) \quad (5.6)$$

Die Einzelwerte des Lastsatzes werden für jeden Zeitschritt und für jedes Teilnetz als Zeilenwerte in eine Matrix geschrieben. Abhängig von den in den globalen Parametern vorgegebenen Simulationsjahren  $Y$  und der gewählten Auflösung  $F(r)$ , hat der Lastsatz eine variierende Anzahl an Zeileneinträgen. Die Matrix des Wärmelastprofils wird von Matlab als text-Datei abgespeichert und kann von TRNSYS über den *Type 9* eingelesen werden. Für die Teilnetze *Campus* und *Bockelsberg* werden für jeden Zeitschritt jeweils die Wärmeleistung, die Vorlauftemperatur, die Rücklauftemperatur und der Massenstrom berechnet. Die Berechnungsmethodik der Wärmeleistung in Abhängigkeit der Außentemperatur erfolgt über zwei unterschiedliche Ansätze, die im Anschluss erläutert werden.

#### 5.1.4.1. Berechnungsverfahren I: Wärmeleistung über polynomische Ausgleichsfunktion

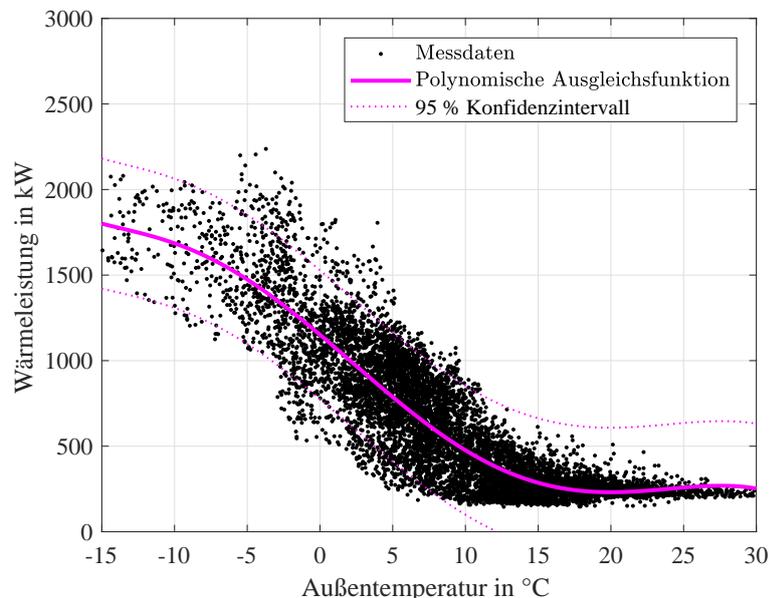
Das Berechnungsverfahren I verwendet zwei netzindividuelle Ausgleichsfunktionen, um die Wärmeleistung aus der Außentemperatur abzuleiten. Die Ausgleichsfunktion nähert sich über die Korrelation zwischen der Außentemperatur  $T_{amb}$  und der Wärmeleistung  $\dot{Q}$ . Die Ausgleichsfunktion wird aus einer nichtlinearen Regressionsanalyse mit dem *Matlab Curve Fitting Tool* bestimmt. Die Regressionsanalyse ist eine Anwendung in Matlab, welche die Methode der kleinsten Fehlerquadrate als Näherung verwendet. Als Lösungsmethode können mehrere Regressionsalgorithmen (z.B. Polynome, Fourier-Transformation, Gauß-Algorithmus) und Verfahren zur robusten Regression angewendet werden, um den bestmöglichen *fit* zu erhalten. Ein Maß für die Güte der Regression ist das Bestimmtheitsmaß. Das Bestimmtheitsmaß gibt an, wieviel Prozent der Variation der Wärmeleistung durch die polynomische Abhängigkeit mit der Außentemperatur  $T_{amb}$  erklärt werden kann.

Für beide Teilnetze wurde die Ausgleichsfunktion gewählt, mit der zum einen ein hohes Bestimmtheitsmaß erreicht wurde und zum anderen eine möglichst geringe Abweichung zu den Wärmeverkaufszahlen des jeweiligen Wärmenetzes nachgewiesen werden konnte (Vgl. Tabelle 5.3).

### Ausgleichsfunktion für das Wärmenetz der Universität (Campus)

Der Korrelationskoeffizient des Wärmenetzes der Universität zwischen gemessenen Außentemperaturen und gemessener Wärmeleistung beträgt für das Referenzjahr  $r = -0,85$ . Aus dieser stark negativen Korrelation wurde eine polynomische Ausgleichsfunktion sechsten Grades abgeleitet, die einen Zusammenhang von Außentemperatur und Heizlast mit einem Bestimmtheitsmaß von  $B = 0,79$  herstellt. Durch die Übergabe der Außentemperaturen können mit der polynomischen Ausgleichsfunktion 79 % der Varianz der Wärmeleistung erklärt werden.

In Abbildung 5.2 ist die polynomische Ausgleichsfunktion und das 95 % Konfidenzintervall der Messdaten dargestellt, d.h. 95 % der gemessenen Daten liegen innerhalb dieses Intervalls.



**Abb. 5.2.:** Korrelation zwischen Wärmeleistung und Außentemperatur, dargestellt für das Wärmenetz *Campus* mit einer polynomischen Ausgleichsfunktion 6. Grades und dem Konfidenzintervall von 95 %

Die polynomische Ausgleichsfunktion für das Teilnetz *Campus* ist in Gleichung 5.7 parametrisiert. Da für diese Parametrierung die beste Übereinstimmung mit den Wärmeverkaufszahlen des Energieversorgers nachgewiesen werden konnte (siehe Tabelle 5.3),

wird sie innerhalb des Lastprofilgenerators für die Berechnung der außentemperaturgeführten Wärmeleistung des Abnehmersystems Campus verwendet.

$$\dot{Q}_{\text{Campus}} = p_1 \cdot (T_{\text{amb}})^6 + p_2 \cdot (T_{\text{amb}})^5 + p_3 \cdot (T_{\text{amb}})^4 + p_4 \cdot (T_{\text{amb}})^3 + p_5 \cdot (T_{\text{amb}})^2 + p_6 \cdot (T_{\text{amb}}) + p_7 \quad (5.7)$$

mit

$T_{\text{amb}}$  = Außentemperatur in °C,

$\dot{Q}$  = Heizlast in kW und

$$p_1 = 1,521e - 06$$

$$p_2 = -0,0001477$$

$$p_3 = 0,001293$$

$$p_4 = 0,1278$$

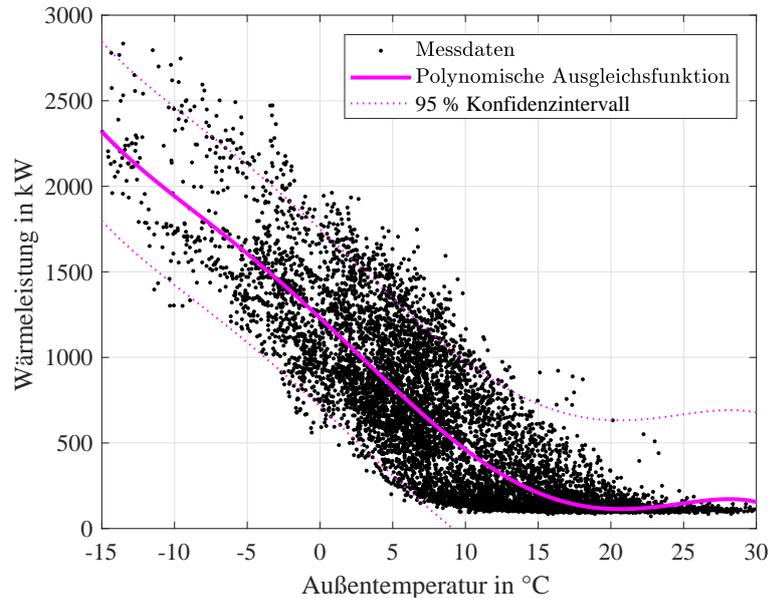
$$p_5 = -0,8475$$

$$p_6 = -71,76$$

$$p_7 = 1151;$$

### **Ausgleichsfunktion für das Teilnetz des Wohngebietes Bockelsberg**

Der Korrelationskoeffizient des Wärmenetzes des Wohngebietes Bockelsberg zwischen gemessenen Außentemperaturen und gemessener Wärmeleistung beträgt für das Referenzjahr  $r = -0,83$ . Aus dieser stark negativen Korrelation konnte eine polynomische Ausgleichsfunktion fünften Grades abgeleitet werden, die einen Zusammenhang von Außentemperatur und Heizlast mit einem Bestimmtheitsmaß von  $B = 0,75$  herstellt (siehe Abbildung 5.3).



**Abb. 5.3.:** Korrelation zwischen Wärmeleistung und Außentemperatur, dargestellt für das Wärmenetz *Bockelsberg* mit einer polynomischen Ausgleichsfunktion 5. Grades und dem Konfidenzintervall von 95 %

Die polynomische Ausgleichsfunktion für das Teilnetz *Bockelsberg* ist in Gleichung 5.8 parametrisiert und wird innerhalb des Lastprofilgenerators für die Berechnung der außentemperaturgeführten Wärmeleistung des Abnehmersystems *Bockelsberg* verwendet.

$$\dot{Q}_{\text{Bockelsberg}} = b_1 \cdot (T_{\text{amb}})^5 + b_2 \cdot (T_{\text{amb}})^4 + b_3 \cdot (T_{\text{amb}})^3 + b_4 \cdot (T_{\text{amb}})^2 + b_5 \cdot T_{\text{amb}} + b_6 \quad (5.8)$$

mit  $T_{\text{amb}}$  = Außentemperatur in °C,

$\dot{Q}$  = Heizlast in kW und

$$b_1 = -0,0001211$$

$$b_2 = 0,003544$$

$$b_3 = 0,07222$$

$$b_4 = -0,6225$$

$$b_5 = -78,85$$

$$b_6 = 1185;$$

#### 5.1.4.2. Berechnungsverfahren II: Wärmeleistung aus Messdatenpaar

Zwischen den beiden Berechnungsverfahren kann in den globalen Einstellungen in Matlab ausgewählt werden. Das Berechnungsverfahren II bietet sich an, wenn das Wärmenetz geringe Korrelationskoeffizienten zwischen Außentemperatur und Wärmeleistung aufweist. Da das Berechnungsverfahren deutlich rechenintensiver ist und die Korrelationskoeffizienten der beiden Teilnetze hoch sind, wird es nicht für die Energiesystem- und Wirtschaftlichkeitsanalysen in Kapitel 6 verwendet.

Das Berechnungsverfahren II verwendet Messdatenpaare, die die Außentemperatur  $T_{amb}$  und die korrespondierende Wärmeleistung  $\dot{Q}$  zum gleichen Messzeitpunkt beinhalten. Das Messdatenpaar wird als Matrix mit variabler Zeilenanzahl (abhängig von der Menge an verfügbaren Messdaten) und zwei Spalten eingelesen. Der Vektor besteht aus einem gemessenen Temperatureintrag, der in der ersten Spalte des Vektors steht und einem zum gleichen Zeitpunkt gemessenen Wärmeleistungseintrag, der in der zweiten Spalte des Vektors steht. Anschließend ordnet Matlab die Messdatenpaare absteigend nach der Temperatur als Führungsgröße. Es entsteht eine Messdaten-Matrix mit den absteigend geordneten Temperaturen in der ersten Spalte und den zugehörigen Wärmeleistungen in der zweiten Spalte.

Für jedes synthetisch erstellte Temperatur-Reihenglied eines Zeitschritts spannt das Programm einen Wertevektor mit Messdatenpaaren auf, dessen Temperatur gleich der synthetisch erzeugten Temperatur des Zeitschrittes ist. Anschließend wird ein Wertepaar zufällig, mit *gleichmäßig verteilter Wahrscheinlichkeit*, ausgewählt. Der Prozess eines Zeitschrittes endet, indem die der Temperatur zugehörige Heizleistung in die Matrix des Lastsatzes geschrieben wird. Dieser Prozess findet separat für beide Teilnetze statt und wiederholt sich für jedes synthetisch erstellte Temperatur-Reihenglied.

Da die absolute Häufigkeit der Temperaturen über einen längeren Betrachtungszeitraum näherungsweise normalverteilt ist (vgl. Abbildung 5.5), gibt es zu den Temperaturen, die häufig auftreten, viele ( ggf. verschiedene) korrespondierenden Wärmeleistungen. Gleichsam ist es bei einer geringen Messdatenbasis oder einer extremen Temperatur möglich, dass zu einer synthetisch erzeugten Temperatur keine Wärmeleistung vorliegt. In diesem Fall sucht das Programm iterativ nach der nächstkleineren Temperatur, für die Messdaten vorliegen (Code-Redundanz).

**Anmerkung:** Wenn man die historischen Wetterdaten der letzten 12 Jahre zu Grunde legt, können 99,1 % der aufgetretenen Außentemperaturen durch Messdaten abgedeckt werden. Für den Temperaturbereich, für die es keine Messdaten zur jeweiligen Temperatur gibt (0,9 % der Datengrundlage), werden die Ausgleichsfunktionen angewendet, um die Heizleistung zu berechnen.

Gibt es für eine Temperatur mehrere Heizleistungen, erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass ein Messdatenpaar ausgewählt wird, das mehrfach vorliegt, proportional zur Häufigkeit des Auftretens innerhalb des Vektors. Der Ausdruck *gleichmäßig verteilte Wahrscheinlichkeit* beschreibt, dass die Auswahl eines Randwertes des Vektors gleich wahrscheinlich ist, wie die Auswahl eines im mittleren Spektrum des Vektors befindlichen Wertes.

#### 5.1.4.3. Berechnung der außentemperaturgeführten Netztemperaturen

Das dynamische Verhalten von Wärmeerzeugern ist zusätzlich zu der Wärmeleistung bestimmt durch das Temperaturniveau, auf dem die Wärmeleistung vorgehalten werden muss. Deshalb werden die Vor- und Rücklauftemperaturen für den Lastsatz in Abhängigkeit von den Außentemperaturen vorgegeben. Prinzipiell besteht die Möglichkeit diese über die Heiznetzkurve der technischen Anschlussbedingungen zu bestimmen. Im Einklang mit der in Kapitel 4.2 vorgestellten Modellierung der Wärmeübertragung, wurden für die Berechnung der sekundärseitigen Vorlauftemperaturen  $T_{VL,sek}$  die Heiznetzkurve aus Abbildung 5.4 verwendet. Die Heiznetzkurve ist eine begrenzte Geradengleichung, die die Vorlauftemperatur  $T_{VL}$  in Abhängigkeit der Außentemperatur  $T_{amb}$  beschreibt.

Um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass die Temperaturspreizung an der Wärmeübergabestation mit abnehmender Außentemperatur zunimmt, wurden die Rücklauftemperaturen über die gemessenen Temperaturdifferenzen berechnet. Die Differenzbänder  $\Delta T$  bzw. die Rücklauftemperaturen  $T_{RL}$  wurden über Messdaten des Energieversorgers berechnet (Gleichungen 5.9-5.14).

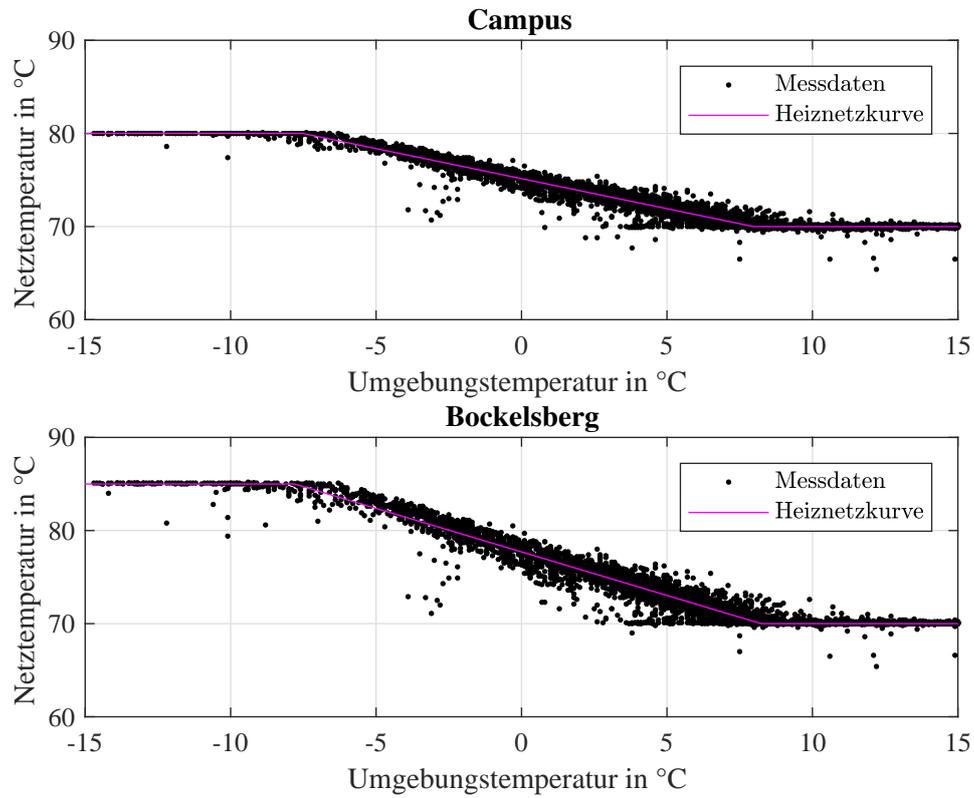


Abb. 5.4.: Vergleich der gemessenen Vorlauftemperatur in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur mit der Heiznetzkurve für die Berechnung der Vorlauftemperatur

$$T_{VL,Campus,sek} = \max(\min((-0,646 \cdot T_{amb}) + 75,144, 80), 70) \quad (5.9)$$

$$\Delta T_{Campus} = \max(\min(-0,678 \cdot T_{amb}) + 28,571, 35), 17) \quad (5.10)$$

$$T_{RL,Campus} = T_{VL,Campus,sek} - \Delta T_{Campus} \quad (5.11)$$

$$T_{VL,Bockelsberg,sek} = \max(\min(-0,935 \cdot T_{amb}) + 77,703, 85), 70) \quad (5.12)$$

$$\Delta T_{Bockelsberg} = \max(\min(-1,115 \cdot T_{amb}) + 30,077, 35), 15) \quad (5.13)$$

$$T_{RL,Bockelsberg} = T_{VL,Bockelsberg,sek} - \Delta T_{Bockelsberg} \quad (5.14)$$

Die Analyse der Messdaten des Energieversorgers zeigte, dass die technischen Anschlussbedingungen nicht durchgängig eingehalten werden konnten und die Rücklauftemperaturen im Sommer zeitweise höher waren, als für den Auslegungszustand vorgesehen. Des Weiteren korrelierten die Rücklauftemperaturen nicht in jedem Jahr gleich stark mit der Außentemperatur, weshalb die Differenzbänder aus Gleichung 5.10 und Gleichung 5.13 gemittelt wurden.

Aus den berechneten Vor- und Rücklauftemperaturen stehen alle notwendigen Zusammenhänge fest, um die Gleichung 5.6 nach dem Massenstrom aufzulösen. Der Wert des berechneten Massenstroms wird in die Matrix geschrieben und der Lastsatz ist vollständig. Der Lastsatz wird als *txt.-Datei* gespeichert und anschließend von TRNSYS über den *Type 9* eingelesen.

## 5.2. Validierung des Lastprofilgenerators

Dass die Anwendung von MCMC-Verfahren zur Schätzung von Wetterzuständen grundsätzlich geeignet ist, wurde bereits für andere Anwendungen nachgewiesen [185, 186]. Für die Validierung des MCMC-Schätzers zur Berechnung von Lastprofilen werden die synthetischen Temperaturreihen quantitativ und qualitativ validiert. Hierfür wurden statistische Kenngrößen verwendet, welche die statistische Qualität des Temperaturschätzers bewertet.

Im Anschluss an die statistische Validierung werden die auf der Grundlage von künstlichen Temperaturreihen geschätzten Wärmemengen mit den Wärmeverkaufszahlen des Energieversorgers verglichen. Abschließend werden Simulationen mit den Lastprofilen aus dem Lastprofilgenerator durchgeführt, um den Einfluss auf das Gesamtsystem zu untersuchen.

### 5.2.1. Statistische Kenngrößen zur Validierung der synthetischen Temperaturreihe

Um die mit dem MCMC-Verfahren erzeugten Temperaturreihen quantitativ validieren zu können, werden statistische Kenngrößen verwendet. Die verwendeten Kenngrößen aus der Statistik quantifizieren die Charakteristik der Datengrundlage sowie die Güte und Streuung der Schätzwerte in Bezug auf die Messdaten.

Die zur Validierung herangezogenen statistischen Kenngrößen sind nachfolgend definiert und charakterisiert.

$$\text{Standardabweichung : } \sigma_p = \sqrt{\text{Var}(p)} \quad (5.15)$$

Die Standardabweichung ist ein Maß für die Streuung eines Parameters um seinen Erwartungswert und berechnet sich aus der Wurzel der Varianz (Gleichung 5.15). In Bezug auf die Temperatur bedeutet eine große Standardabweichung, dass die Temperatur weit um den durchschnittlichen Erwartungswert streut. Die Auswertung der historischen Temperaturen hat ergeben, dass die Standardabweichung der Temperatur vom langjährigen Mittel im April mit  $\pm 5,00^\circ\text{C}$  am größten ist (vgl. Tabelle 5.1). Im Allgemeinen ist die monatliche Standardabweichung der gemessenen Temperaturen mit durchgängig mehr als  $\pm 3^\circ\text{C}$  relativ groß.

Die Wahrscheinlichkeit, zum Erwartungswert verzerrte Temperaturwerte zu schätzen, ist für große Standardabweichungen größer, als dies bei kleinen Standardabweichungen der Fall ist. Unter der Annahme eines erwartungstreuen Schätzers besitzt die synthetisch erzeugte Temperaturreihe ebenfalls eine relativ große Standardabweichung, da das MCMC-Schätzverfahren auf die Messdatengrundlage angewendet wird.

$$\text{Standardfehler : } \sigma(\hat{\theta}_p) = \sqrt{\text{Var}(\hat{\theta}_p)} \quad (5.16)$$

Der Standardfehler  $\sigma(\hat{\theta}_p)$  gibt unter der Annahme unendlich vieler Stichproben aus der Grundgesamtheit die theoretische Streubreite der Mittelwerte an. Der Standardfehler beschreibt in dem Zusammenhang das Streuungsmaß eines Schätzers  $\hat{\theta}_p$  und liefert eine Aussage über die Präzision des geschätzten Parameters  $p$ . Der Standardfehler ist abhängig von der Stichprobengröße. Je größer die Stichprobe ist, desto kleiner ist der Standardfehler.

**Tab. 5.1.:** Auswertung der statistischen Kenngrößen für die Temperaturen von Lüneburg  
im Zeitraum zwischen 2004 und 2015

Monat	Ø Temp	$\sigma_T$	Standardfehler
Januar	1,35°C	±4,07°C	6,14%
Februar	1,42°C	±3,79°C	5,73%
März	4,51°C	±4,35°C	6,58%
April	9,56°C	±5,00°C	7,55%
Mai	12,89°C	±4,89°C	7,39%
Juni	15,83°C	±4,69°C	7,08%
Juli	18,63°C	±4,69°C	7,09%
August	17,46°C	±4,2°C	6,35%
September	14,53°C	±3,94°C	5,95%
Oktober	10,06°C	±3,7°C	5,59%
November	5,99°C	±3,77°C	5,70%
Dezember	2,73°C	±3,45°C	5,21%

Tabelle 5.1 zeigt die Temperaturen und die Standardabweichung sowie den Standardfehler. Die Standardabweichung beträgt in jedem Monat mehrere Grad Celsius. Bei der erwartungstreuen Schätzung der Temperaturen begeht man somit ebenfalls Standardfehler von mehreren Prozent. Wegen der hohen Grundvarianz der Temperaturen ist es sinnvoll, die Verzerrung des MCMC-Schätzers über den *parameter estimation bias* (*peb*) zu ermitteln.

$$\text{parameter estimation bias : } peb_p = \frac{|\frac{1}{n_{rep}} \sum_{t=1}^{n_{rep}} (\hat{\theta}_{p,t} - \theta_p)|}{\theta_p} \quad (5.17)$$

Dabei ist  $\hat{\theta}_{p,t}$  die Parameterschätzung der *t-ten* Monte-Carlo Replikation und  $\theta_p$  ist der tatsächliche Populationswert des Parameters  $p$  [187]. Der *peb* gibt die Verzerrung  $\hat{\theta}_{p,t}$  des geschätzten Parameters  $p$  in Bezug auf den tatsächlichen Erwartungswert  $\theta_p$  an und ist ein Maß für den systematischen Fehler, den man unter Verwendung des Schätzers begeht [188]. Je kleiner der *peb* ist, desto geringer ist die Verzerrung. In der Literatur werden

Toleranzwerte bzw. Grenzwerte (*cut-off-values*) für den *peb* verwendet, innerhalb derer die *peb*-Werte akzeptiert sind. Allgemein werden *peb*-Werte  $\leq 0,1$  als sehr gut bewertet, *peb*-Werte  $\leq 0,3$  sind akzeptabel [187, 189, 190].

In Anlehnung an [191] wurde der *standard error bias* (*seb*) berechnet. Der *seb* berechnet sich aus dem durchschnittlichen Standardfehler von  $n$  Monte Carlo Replikationen in Bezug auf den empirischen Standardfehler.

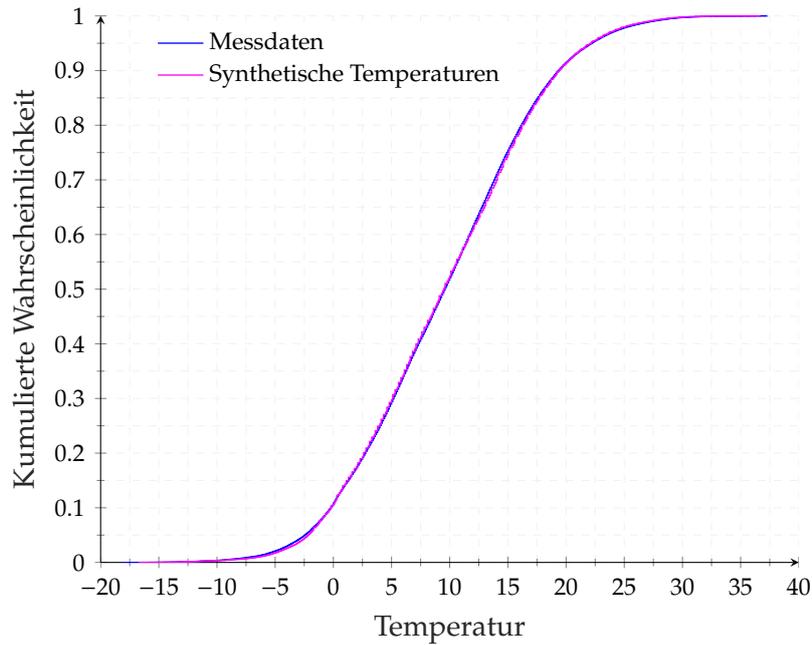
$$\text{standard error bias : } seb_p = \frac{\frac{1}{n_{rep}} \sum_{t=1}^{n_{rep}} \hat{se}(\theta_{p,t})}{sd(\hat{\theta}_p)} \quad (5.18)$$

$\theta_{p,t}$  bezeichnet den geschätzten Standardfehler (*posterior SD*) des Parameters  $p$  für die Replikation  $t$  und  $sd(\hat{\theta}_p)$  kennzeichnet die Standardabweichung der Parameterschätzung über alle  $n$  Replikationen (*empirical SD*).

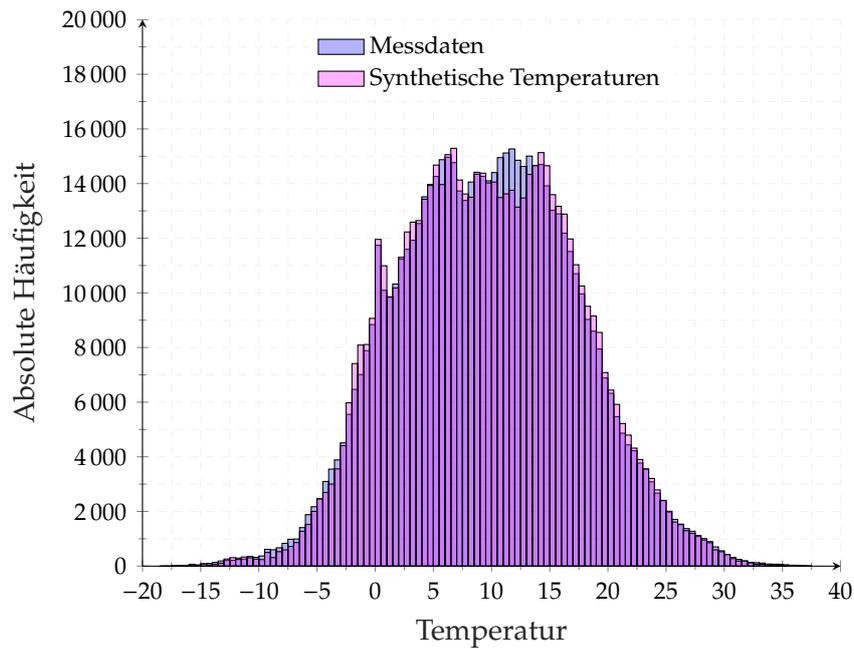
Wenn der geschätzte mittlere Standardfehler nahe des empirischen Standardfehlers liegt, ist das Verhältnis nahe 1. Der begangene *seb* kann als vernachlässigbar angesehen werden, wenn das Verhältnis der Standardfehler im Bereich zwischen  $0,83 \leq seb \leq 1,2$  liegt [189]. Für die Bewertung der erzeugten Temperaturverläufe werden die Temperaturreihen im Anschluss quantitativ und qualitativ ausgewertet.

### 5.2.1.1. Quantitative Validierung der synthetischen Temperaturreihe

Eine quantitative Aufbereitung, die sich für einen direkten Vergleich zwischen einer synthetischen Temperaturreihe und Messdaten anbietet, ist die Darstellung der Verteilung beider Temperaturverläufe. In Abbildung 5.5a ist die kumulierte Wahrscheinlichkeitsverteilung (*CDF*) und die absolute Häufigkeit der Temperaturen (Abbildung 5.5b) für die gemessenen Temperaturen Lüneburgs im Zeitraum zwischen 2004 und 2015 sowie eine zufällig mit dem Matlab-Tool erstellte Temperaturreihe über den gleichen Zeitraum dargestellt.



(a) Kumulierte Wahrscheinlichkeitsverteilung



(b) Histogramm der Temperaturen

**Abb. 5.5.:** Vergleich der kumulierten Wahrscheinlichkeitsverteilung (a) und absolute Häufigkeit der Temperaturen (b) zwischen den Messdaten und einer synthetischen Temperaturreihe

Es ist zu erkennen, dass die Temperaturen in den Bereichen zwischen  $-2^{\circ}$  und  $+5^{\circ}$  sowie zwischen  $+15^{\circ}$  und  $+25^{\circ}$  überschätzt wurden. Der übrige Temperaturbereich wurde hingegen tendenziell unterschätzt. Über den ganzen Temperaturbereich hinweg ist die quantitative Übereinstimmung der Temperatur-Häufigkeiten sehr gut.

Da durch den Monte-Carlo-Ansatz einzigartige Temperaturreihen entstehen, ist diese Darstellung eine Momentaufnahme. Für empirische Aussagen bezüglich der quantitativen Übereinstimmung zwischen synthetischen Temperaturen und gemessenen Temperaturen, war eine Simulationsstudie notwendig. In der Simulationsstudie wurde untersucht, inwiefern die Anzahl an durchgeführten Simulationen und die Zeitschrittweite der Temperaturen (*Timestep*) den systematischen Fehler (*peb*) und den relativen Standardfehler (*seb*) beeinflussen. Des Weiteren wurde untersucht, wie häufig vorgegebene Toleranz- und Grenzwerte eingehalten bzw. nicht eingehalten werden, um die qualitative Zuverlässigkeit des Tools einschätzen zu können.

Durch eine Simulationsstudie mit knapp 700 unabhängig voneinander generierten Temperaturprofilen konnte nachgewiesen werden, dass der Temperaturschätzer mittels MCMC-Verfahren bereits bei wenigen Temperaturprofilen näherungsweise erwartungstreu ist und die jeweiligen *cut-off values* im Mittel sehr gut eingehalten werden (Tabelle 5.2). Der mittlere jährliche *peb* betrug bei 10 durchgeführten Jahressimulationen 8%. Der Erwartungswert der Schätzfunktion (MCMC-Verfahren) wich im Durchschnitt 8% vom wahren Wert ab. In der Auswertung zeigte sich beispielsweise, dass im 6. Simulationsjahr der exakte Wert geschätzt (minimaler *peb*), im 7. Simulationsjahr betrug die Abweichung hingegen 18% (maximaler *peb*). Von den 150 generierten Temperaturprofilen lag die Verzerrung aller *peb*-Werte weit unter dem maximal zulässigen Grenzwert von 30%. Bei einer Zeitschrittweite von 10 Minuten liegen die *peb*-Werte bei 120 von 150 erstellten Profile (80%) im Bereich von  $peb \leq 10\%$ , bei einer Zeitschrittweite von 5 Minuten erfüllen sogar 135 von 150 erstellten Profilen (90%) das sehr gute Verzerrungskriterium (siehe Anhang A.9a).

Die Verzerrung (*peb*) eines Jahres gegenüber dem langjährigen Temperatur-Mittel betrug im Rahmen aller durchgeführten Simulationsjahren maximal 19%. Mit Hilfe des mittleren jährlichen *standard error bias* (*seb*-Werte) konnte ebenfalls gezeigt werden, dass der statistische Fehler gering ist, da das Verhältnis des Standardfehlers der Reihenentwicklung zum empirischen Standardfehler (siehe Berechnung der Gleichung 5.18) im Mittel nahe 1 liegt. Die *cut-off values* der *seb*-Werte wurden bei einer Zeitschrittweite von

10 Minuten in 143 von 150 (95,3 %) Simulationen eingehalten, bei einer Zeitschrittweite von 5 Minuten lagen 147 von 150 (98 %) Simulationen im sehr guten Toleranzbereich (siehe Anhang A.9b).

**Tab. 5.2.:** Validierung der synthetischen Temperaturreihen und Einfluss der Anzahl an Simulationsjahren und Einfluss der Zeitschrittweite auf den jährlichen *parameter estimation bias* und den *standard error bias*

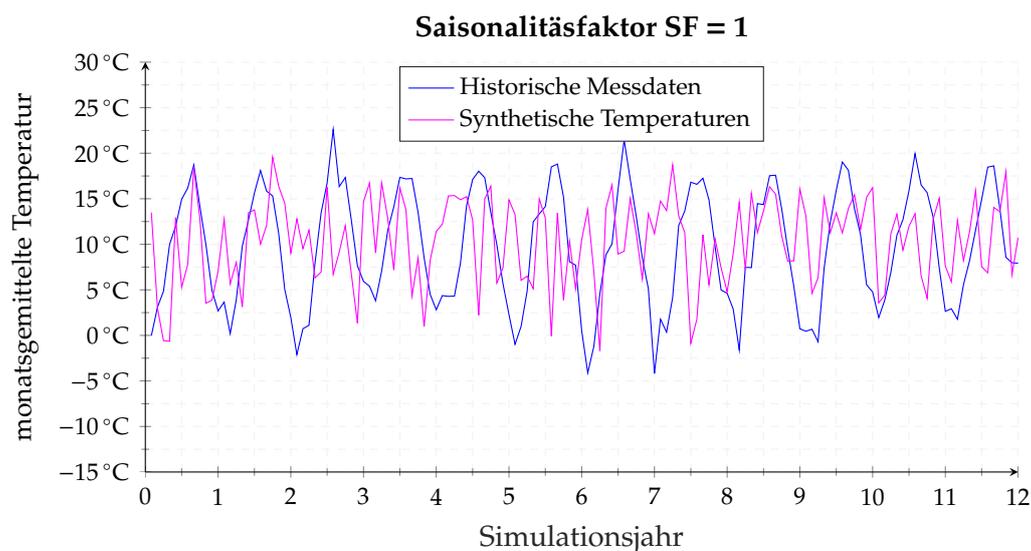
Timestep	Anzahl Simulationen	<i>peb</i> [ $peb \stackrel{!}{\leq} 0.3$ ]			<i>seb</i> [ $0.83 \stackrel{!}{\leq} peb \stackrel{!}{\leq} 1.2$ ]		
		min	max	$\emptyset$	min	max	$\emptyset$
10 min	10	0.00	0.18	0.08	0.74	1.16	0.99
10 min	25	0.01	0.19	0.07	0.82	1.19	0.99
10 min	50	0.00	0.16	0.06	0.79	1.24	0.99
10 min	100	0.00	0.16	0.06	0.77	1.22	0.99
10 min	150	0.00	0.18	0.06	0.75	1.28	0.99
5 min	10	0.02	0.14	0.07	0.8	1.15	0.99
5 min	25	0.00	0.14	0.05	0.87	1.14	1.00
5 min	50	0.00	0.15	0.05	0.84	1.14	0.99
5 min	100	0.00	0.16	0.05	0.78	1.25	0.99
5 min	150	0.00	0.19	0.05	0.80	1.25	0.99

Eine mittlere Verzerrung (*peb*) von 6 % erreicht man, wenn bei einer Zeitschrittweite von 10 Minuten mindestens 50 unabhängige Jahressimulationen durchgeführt werden. Die Simulationsstudie weist nach, dass die erzeugten Temperaturreihen in ihrer Übereinstimmung mit dem wahren Wert differieren, aber der mittlere *peb* und *seb* bereits bei einer geringen Anzahl von 10 Simulationen nahe an ihren empirischen Erwartungswerten liegen. Ob man die mittlere Verzerrung zwischen Schätzwert und wahren Wert auf Basis von 10 Simulationen oder auf Basis von 150 Simulationen berechnet, hat eine Auswirkung von etwa 2 %. Das bedeutet, dass bei Inkaufnahme einer 2 %-igen statistischen Abweichung vom empirischen Erwartungswert bereits 10 unabhängige Lastprofile ausreichend sind, um eine statistische Aussage über das Verhalten des Energiesystems treffen zu können.

### 5.2.1.2. Qualitative Validierung der synthetischen Temperaturreihe und Einfluss des Saisonalitätsfaktors

Der Saisonalitätsfaktor ist in Matlab als globaler Parameter implementiert, um die Saisonalität ausreichend zu berücksichtigen und qualitativ realistische Temperaturreihen erzeugen zu können. Der Saisonalitätsfaktor beschreibt die Anzahl der zu einem Zustandsraum zusammengefassten Temperaturübergänge.

Im Folgenden wird der Einfluss des Saisonalitätsfaktors auf die Temperaturreihe für vier repräsentative Saisonalitätsfaktoren diskutiert. Im Rahmen der qualitativen Validierung der synthetischen Temperaturreihe wird untersucht, welchen Einfluss eine Vernachlässigung der Saisonalität ( $SF=1$ ), eine jahreszeitliche Berücksichtigung ( $SF=4$ ), eine monatscharfe Berücksichtigung ( $SF=12$ ) und eine wochenscharfe Berücksichtigung ( $SF=52$ ) der Saisonalität auf die Temperaturreihenentwicklung nimmt. Für die Auswertung sind jeweils im Monatsmittel gegenübergestellt die historischen Temperaturdaten aus Kapitel 5.1.1 und eine in Matlab erstellte synthetische Temperaturreihe.

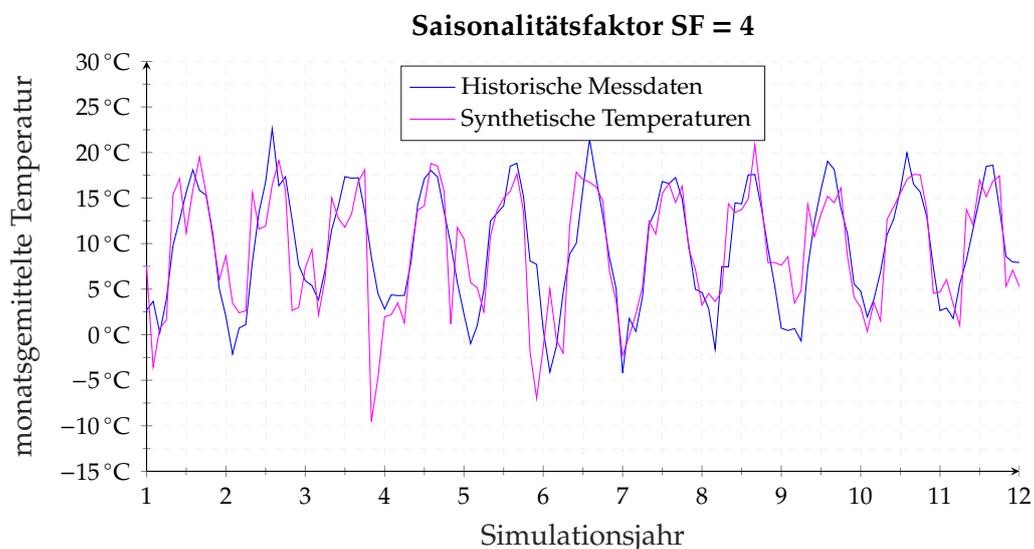


**Abb. 5.6.:** Vergleich der historischen Daten mit einer synthetisch erstellten Temperaturreihe über 12 Jahre unter Verwendung eines Saisonalitätsfaktors von  $SF = 1$

Abbildung 5.6 veranschaulicht die Auswirkungen einer Temperatur-Reihenentwicklung ohne Berücksichtigung der Saisonalität ( $SF = 1$ ). Die qualitativen Unterschiede zwischen

den Messdaten und den künstlich erzeugten Temperaturen sind sehr groß, da bei der Reihenentwicklung nur die kumulierten Übergangswahrscheinlichkeiten Berücksichtigung finden, nicht aber der Zeitpunkt innerhalb des Jahres. Vernachlässigt man die Saisonalität, ist es im Januar entsprechend der  $N \times N$  Übergangsmatrix genauso wahrscheinlich, dass die Temperatur auf 30°C übergeht, wie im Juli. Einzige Voraussetzung dafür ist, dass dieser Temperaturübergang mindestens einmal stattgefunden hat. Tatsächlich ist die Wahrscheinlichkeit von hohen Temperaturen im Sommer deutlich höher als im Winter. Aus rein statistischer Sicht ist die Übereinstimmung zwischen den Messdaten und der erzeugten Temperaturreihe relativ gut. Die kumulierten Wahrscheinlichkeiten sowie die Erwartungstreue der Schätzfunktion sind selbst für einen Saisonalitätsfaktor  $SF = 1$  akzeptabel. Die qualitative Übereinstimmung, also die zeitgeordnete Abfolge der Übereinstimmung, ist hingegen für den Anwendungsfall einer synthetischen Temperaturreihe zur Lastprofilberechnung unbrauchbar. Als Grundlage für die Berechnung von Wärmelastprofilen ist die Berücksichtigung der Saisonalität notwendig.

Um der Tatsache einer seasonspezifischen Temperaturverteilung Rechnung zu tragen, wird die Reihenentwicklung in Abbildung 5.7 unter Berücksichtigung von Sommer, Herbst, Winter und Frühjahr ( $SF = 4$ ) durchgeführt.

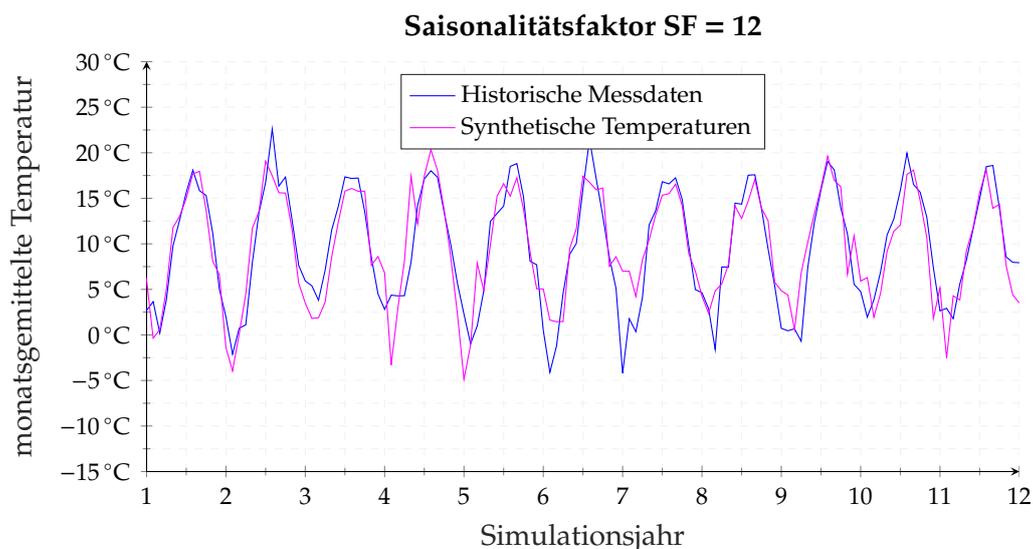


**Abb. 5.7.:** Vergleich der historischen Daten mit einer synthetisch erstellten Temperaturreihe über 12 Jahre unter Verwendung eines Saisonalitätsfaktors von  $SF = 4$

In diesem Fall wird das Jahr in vier gleichmäßige Abschnitte eingeteilt. Es entsteht eine  $N \times N \times 4$  Übergangsmatrix, in der die Temperaturübergänge zusätzlich der jeweiligen Saison zugeordnet werden. In der Reihenentwicklung werden nur die Temperaturübergänge der letzten zwölf Jahre berücksichtigt, die in den Zeitraum fallen, in dem sich das Reihenglied der Reihenentwicklung zur gleichen Zeit befindet.

Durch die Aufteilung in vier Jahresabschnitte stimmen die Realwerte mit den Schätzwerten deutlich besser überein, obgleich es beispielsweise Ende des 3. Jahres große lokale Abweichungen gibt. Für die Verwendung als Berechnungsgrundlage für die Wärmelastprofile wäre ein Saisonalitätsfaktor von vier denkbar, wenn statistische Ausreißer als zulässig bewertet werden und dementsprechend unwahrscheinliche Szenarien Bestandteil der Analyse sein sollen.

Wenn man das Jahr unter der Annahme gleichlanger Monate auf Monatsintervalle aufteilt, wird der Saisonalitätsfaktor auf  $SF = 12$  erhöht. Analog entsteht eine  $N \times N \times 12$  Übergangsmatrix und analog erfolgt die Reihenentwicklung über die statistischen Übergangswahrscheinlichkeiten der Temperatur im jeweiligen Monat (siehe Abbildung 5.8).

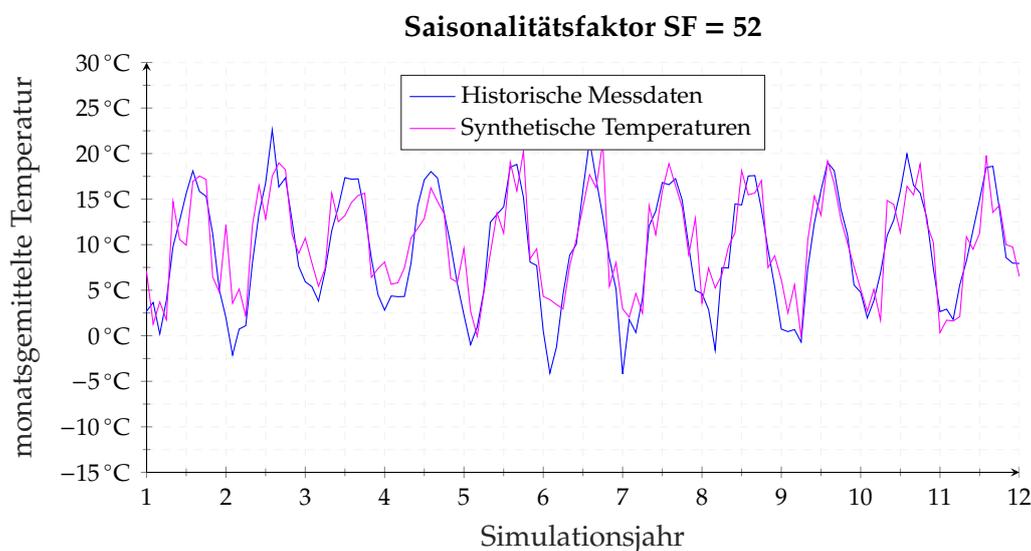


**Abb. 5.8.:** Vergleich der historischen Daten mit einer synthetisch erstellten Temperaturreihe über 12 Jahre unter Verwendung eines Saisonalitätsfaktors von  $SF = 12$

Die qualitative Übereinstimmung ist mit einem Saisonalitätsfaktor  $SF = 12$  gemessen an der hohen Standardabweichung der monatlichen Temperaturen der Datengrundlage

(siehe A.4) sehr gut. Zudem ist die Streuung der Temperaturen im Rahmen ihrer Statistik gewünscht und zweckmäßig, um eine wahrscheinlichkeitsbasierte Energiesystemanalyse unter Berücksichtigung von varrierenden, jährlichen Wärmebedarfswerten zu ermöglichen.

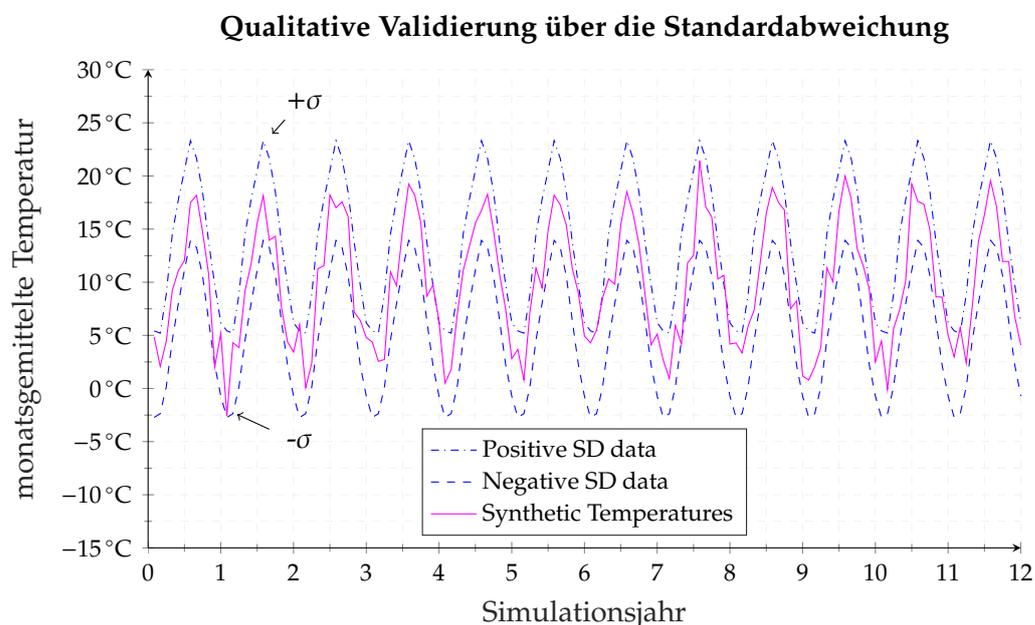
Eine weitere Erhöhung des Saisonalitätsfaktors, in dem das Jahr auf Wochenintervalle aufgeteilt wird ( $SF = 52$ ) bringt aus diesem Grund für die angestrebte Untersuchung keinen zusätzlichen Nutzen. In weiterführenden Untersuchungen hat sich die Vermutung bestätigt, dass die Standardabweichung bzw. die Erwartungstreue des Schätzers durch eine weitere Erhöhung des Saisonalitätsfaktors nicht funktional erhöht wird.



**Abb. 5.9.:** Vergleich der historischen Daten mit einer synthetisch erstellten Temperaturreihe über 12 Jahre unter Verwendung eines Saisonalitätsfaktors von  $SF = 52$

Aus der durchgeführten Parameterstudie mit Saisonalitätsfaktoren zwischen  $SF = 1$  und  $SF = 52$  geht hervor, dass die saisonale Einteilung des Jahres in Monate ( $SF = 12$ ) die Jahresverläufe der Temperaturen für den Standort Lüneburg sehr gut wiedergibt. Eine weitere Erhöhung des Saisonalitätsfaktors bringt keinen nutzbaren Mehrwert im Sinne einer besseren Übereinstimmung. Daher wird für die Erzeugung der Lastprofile, wenn nicht explizit abweichend gekennzeichnet, ein Saisonalitätsfaktor von  $SF = 12$  verwendet.

Wie zu Beginn des Kapitels erläutert ist, basiert die Temperaturschätzung auf den Messdaten einer Wetterstation in Lüneburg. Eine Referenzmöglichkeit, um die Wiedergebearbeitet der künstlich erzeugten Temperaturreihe zu bewerten, ist die Festlegung der Standardabweichung der Datengrundlage als Konfidenzintervall. Wie Abbildung 5.5b zeigt, sind die gemessenen Temperaturen im Betrachtungszeitraum näherungsweise normalverteilt. Ausgehend von dieser Normalverteilung der Lüneburger Temperaturen, liegen 68.27% aller Messdaten in dem Konfidenzbereich  $[T_{mean} \pm \sigma]$ . In der Abbildung 5.10 ist die positive Standardabweichung ( $+\sigma$ ) und die negative Standardabweichung ( $-\sigma$ ) der Datengrundlage sowie eine synthetisch erzeugte Temperaturreihe mit einem Saisonalitätsfaktor  $SF = 12$  dargestellt.



**Abb. 5.10.:** Vergleich der Standardabweichung der Messdaten mit einer synthetisch erstellten Temperaturreihe über 12 Jahre unter Verwendung eines Saisonalitätsfaktors von  $SF = 12$

Aufgrund der hohen Grundvarianz der monatlichen Durchschnittstemperaturen (siehe Tabelle 5.1) schwanken die Monatstemperaturen im Mittel relativ stark. Dennoch befindet sich die synthetische Temperaturreihe im Mittel zu jedem Zeitpunkt innerhalb des Konfidenzintervalls  $\pm \sigma$ .

### 5.2.2. Wärmeverkaufszahlen und Jahresdauerlinie zur Validierung der generierten Lastprofile

In Kapitel 5.1.4 wurde beschrieben, wie ausgehend von den synthetischen Temperaturreihen Lastprofile für die beiden Teilnetze berechnet werden. In diesem Abschnitt werden die generierten Lastprofile mit den Wärmeverkaufszahlen des Energieversorgers verglichen und validiert. Weiterhin werden die geordneten Jahresdauerlinien der Teilnetze gegenübergestellt und diskutiert.

Für den Abgleich der künstlich erzeugten Lastprofile mit den tatsächlichen Wärmeverbräuchen standen Wärmeverkaufszahlen zwischen 2012 und 2016 zur Verfügung. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden in den Lastprofilgenerator die Temperaturdaten des jeweiligen Jahres eingelesen und mit dem Polynomansatz berechnet.

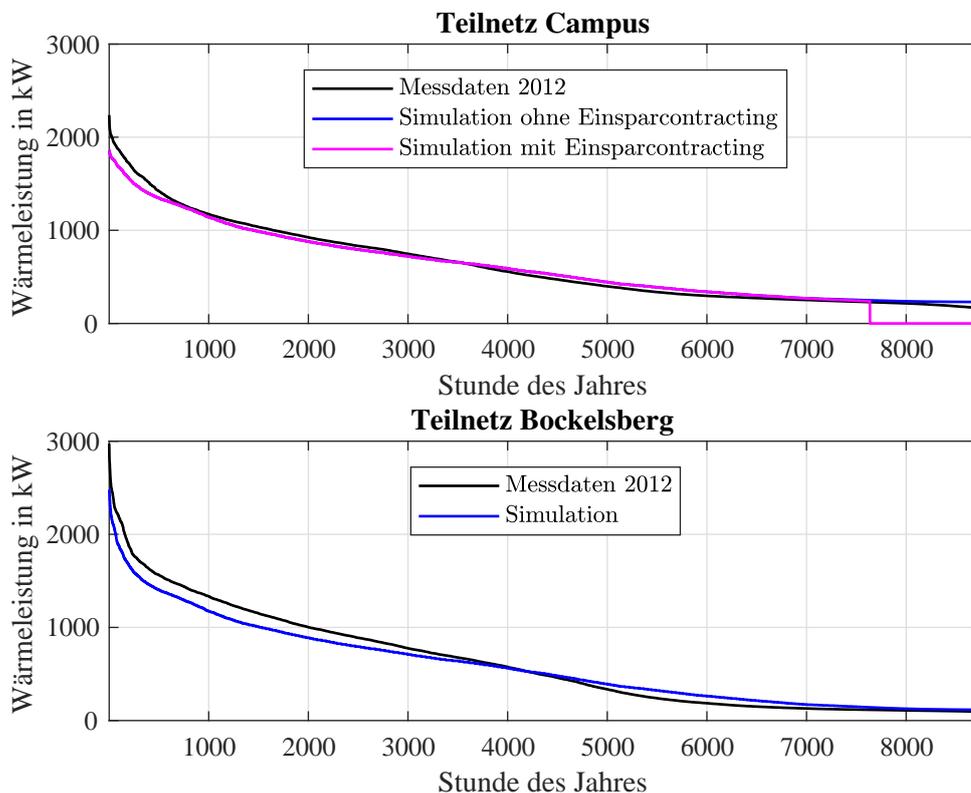
**Tab. 5.3.:** Vergleich der Lastprofile aus dem Lastprofilgenerator mit den Wärmeverkaufszahlen des Energieversorgers

Jahr	<i>Campus</i>		<i>Bockelsberg</i>	
	Wärmeverkauf	Simulation	Wärmeverkauf	Simulation
2012	5,47 GWh	5,07 GWh	5,48 GWh	5,27 GWh
2013	k.A.	5,32 GWh	k.A.	5,39 GWh
2014	4,16 GWh	4,29 GWh	4,63 GWh	4,47 GWh
2015	4,69 GWh	4,68 GWh	4,83 GWh	4,63 GWh
2016	5,30 GWh	5,37 GWh	k.A.	5,03 GWh

Wie bereits an anderer Stelle erläutert wurde, besitzen die polynomischen Ausgleichsfunktionen für die Teilnetze *Campus* und *Bockelsberg* ein Bestimmtheitsmaß von  $< 1$ , was bedeutet, dass die Funktion nur einen Teil der Varianz erklärt. Die Berechnung der Wärmeleistung allein über die Außentemperaturen kann daher nicht exakt übereinstimmen. Für die Anwendung als wahrscheinlichkeitsbasierter Lastprofilgenerator ist diese Forderung auch nicht notwendig. Dennoch ist der Unterschied zwischen simulierten und tatsächlich verkauften Wärmemengen als gering zu bewerten.

Weiterhin ist die Übereinstimmung zwischen der gemessenen, geordneten Jahresdauerlinie und der simulierten, geordneten Jahresdauerlinie qualitativ ansprechend. Unter Verwendung der Ausgleichsfunktionen können reale Verläufe der Wärmeleistung gut

abgebildet werden (Abbildung 5.11). Die polynomische Ausgleichsfunktion für das Teilnetz Campus wurde so gewählt, dass sie die Contracting-Einsparmaßnahmen berücksichtigt und eine Übereinstimmung ab dem Jahr 2014 als sehr gut bewertet werden kann (vgl. Tabelle 5.3).



**Abb. 5.11.:** Vergleich der geordneten Jahresdauerlinien von 2012 mit den über die Ausgleichsfunktionen erstellten Jahresdauerlinien für die beiden Teilnetze

### 5.3. Globale Parameter und Transformationsmöglichkeiten

Der Lastprofilgenerator ist ein leistungsstarkes und zuverlässiges Tool, um standortspezifische, individuelle und wahrscheinlichkeitbasierte Lastprofile für Langzeitstudien erstellen zu können. Im Vorfeld müssen die Randbedingungen des Lastprofilgenerators über die globalen Parameter im Hauptprogramm von Matlab definiert werden:

- Auflösung der Zeitreihe: Durch die Einstellung dieses Parameters wird festge-

legt, für welche Zeitschrittweite die Lastprofile berechnet werden. Im Regelfall werden Lastprofile in 10-Minuten Auflösung ausgegeben, theoretisch sind aber auch Lastprofile mit einer Auflösung von 1 Minute möglich. Man muss dabei berücksichtigen, dass die Rechenzeit bei sehr hoher Auflösung und einer hohen Anzahl an Simulationsjahren schnell ansteigt. Zudem werden die *\*\*\*txt.-Dateien* mit den Lastprofilen sehr groß.

- **Übergangsgenauigkeit:** Durch die Vorgabe der Übergangsgenauigkeit der Temperaturen wird festgelegt, wie viele Temperaturübergänge zu einem repräsentativen Eintrag in der Übergangsmatrix zusammengefasst werden. Entsprechend der Genauigkeit verändert sich die Dimension des Zustandsraumes  $N$ . Bei einer Übergangsgenauigkeit von  $1^\circ\text{C}$  gibt es 57 verschiedene Temperaturen, die in dem gemessenen Temperaturintervall zwischen  $T_{min,Mess}$  und  $T_{max,Mess}$  angenommen werden können. Die Dimension des Zustandsraumes beträgt  $N = 57$ . Die Ausgabe der synthetischen Temperaturreihe erfolgt in der Ausgabe ganzzahliger Temperaturen.

Im Regelfall sollte die erfasste Übergangsgenauigkeit der Übergangsgenauigkeit der Messdaten angepasst werden. Die Genauigkeit der Messdaten beträgt  $0,1^\circ\text{C}$ .

- **Saisonalitätsfaktor:** Der Einfluss des Saisonalitätsfaktors auf die Qualität der Wiedergabe ist ausführlich in Kapitel 5.2.1.2 behandelt. Die Standardeinstellung sieht einen Saisonalitätsfaktor von  $SF = 12$  vor.
- **Simulationsjahre:** Die Vorgabe der Simulationsjahre ist abhängig vom Anwendungsfall und kann zwischen 1 Jahr und theoretisch beliebig vielen Jahren variieren. Dabei gilt ein linearer Zusammenhang zwischen der Berechnungsdauer in Matlab und der Anzahl an Simulationsjahren. Je größer die Anzahl an Simulationsjahren ist, desto länger dauert die Berechnung.

Ein Vorteil, der sich aus der Programmierung mit globalen Parametern ergibt, ist die grundsätzliche Eignung für schnelle Anpassungen an andere Standorte und Wärmenetze oder die Transformation in verschiedene Anwendungsgebiete (z.B. synthetische Erstellung von Strahlungsverläufen über das Jahr).

Für die Anpassung an ein anderes Wärmenetz gibt es zwei Möglichkeiten. Wenn für den Standort und das Wärmenetz Messdaten vorliegen, aus denen eine Korrelation zwischen Außentemperatur und Wärmeleistung abgeleitet werden kann, ist die Erstel-

lung von wahrscheinlichkeitsbasierten Lastprofilen über beide Berechnungsverfahren möglich. Die Heiznetzkurve kann aus den technischen Anschlussbedingungen des Versorgers entnommen werden und die Temperaturdaten des Anwendungsgebietes können preiswert beim Deutschen Wetterdienst erworben werden. Für den Fall, dass keine Messdaten vorliegen oder ein neues Quartier/neuer Stadtteil geplant oder saniert wird, können die Lastprofile über die Vorgabe von jährlichen Wärmemengen und Heizgradtagen angepasst werden. Dieses Verfahren ist insbesondere dann interessant, wenn in Voruntersuchungen bereits geoinformationsbasierte Wärmebedarfsanalysen (Wärmebedarfskartierung) für Quartiere und/oder Stadtteile durchgeführt wurden. Der Lastprofilgenerator wäre somit die nachgelagerte Schnittstelle für die Erstellung von hochaufgelösten Profilen zur Systemsimulation.

Den Lastprofilen können zusätzlich Effekte aufgeprägt werden, wie beispielsweise steigende Durchschnittstemperaturen der Umgebung (Modellierung von klimatischen Veränderungen) oder sinkende Heiznetztemperaturen als Resultat geplanter Modernisierungsmaßnahmen eines Wärmenetzes.

---

#### **Der Lastprofilgenerator in der Übersicht (Version MATLAB R2016b):**

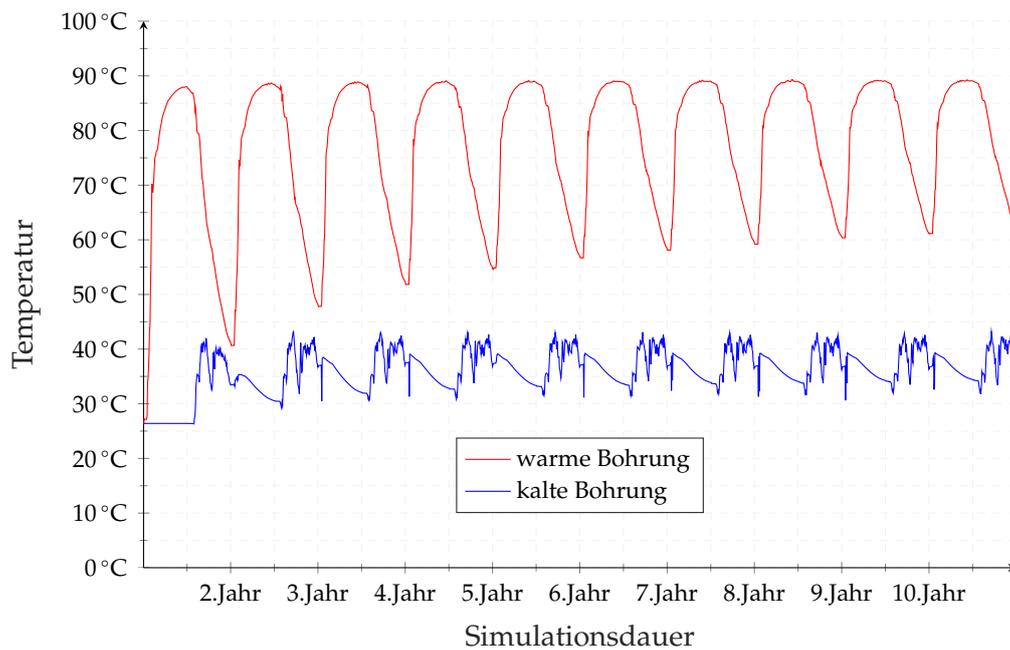
- basiert auf realen Temperaturübergängen eines Standorts (z.B. Messstation eines Wetterdienstes)
- generiert wahrscheinlichkeitsbasierte und einzigartige Lastprofile (erwartungstreuer Schätzer mit sehr geringer Verzerrung)
- es finden nur Temperaturübergänge statt, die (mindestens einmal) gemessen wurden
- berücksichtigt probabilistische Effekte bei geringer Abweichung im langjährigen Temperaturmittel zwischen Messung und Simulation ( $< 0,5\text{ °C}$ )
- Saisonalitätsfaktor (und damit Grad der Abweichung) parametrierbar
- schnell individualisierbar und universell einsetzbar für verschiedene Wärmesysteme und Standorte
- Effekte aufprägar (Erhöhung der mittleren Jahrestemperatur, Veränderung der Heiznetzkurve, Einsparcontracting)
- individuelle Zeitschrittweite der Lastprofile (1 *min* - mehrere Stunden)

- Berechnungsverfahren II ermöglicht auch Berechnung bei geringer Korrelation zwischen Temperatur und Wärmeleistung
- Schnittstelle zu vorgelagerten Planungstools wie geoinformationsbasierter Wärmebedarfsanalyse (Anpassung der Lastprofile an Jahreswärmebedarf und Heizgradtage)
- kurze Rechenzeiten (Berechnungsverfahren I < 5 min für ein Lastprofil über 20 Jahre bei einer Auflösung von 10 min)

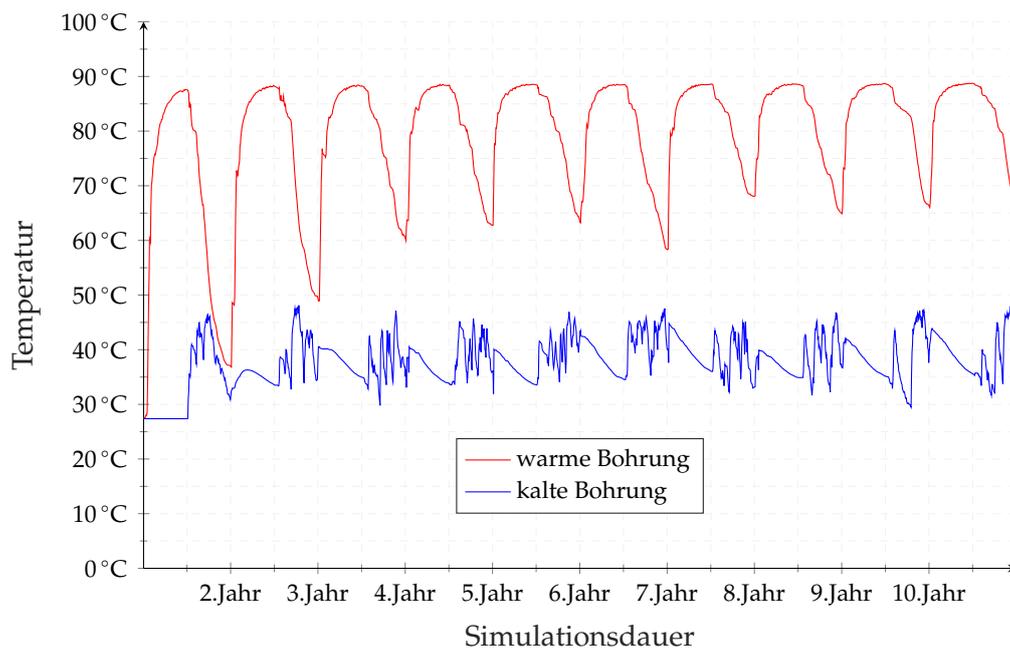
## 5.4. Einfluss der Lastprofile auf das Langzeitverhalten des Aquiferwärmespeichers

Aquiferwärmespeicher sind thermisch träge Speicher. Je höher die Differenz zwischen der Einspeichertemperatur und der natürlichen Untergrundtemperatur ist, desto länger dauert der Zustand, bis der Speicher einen thermisch quasistationären Zustand annimmt. Vornehmlich in den ersten Betriebsjahren sorgen die konduktiven Wärmeverluste an die angrenzenden Aquitarde für eine Erwärmung der Grenzflächen. Diese Wärmeverluste werden mit den Jahren durch eine Erhöhung der Grenzflächentemperatur geringer und sorgen für bessere Effizienzen. Simulationen haben gezeigt, dass diese Temperatureinschwingphase auch bei gleichbleibenden Lastfällen zwischen 10 und 20 Jahre dauert. In der sensiblen Einschwingphase führt die Annahme eines jährlich gleichbleibenden Lastszenarios zu erheblichen Fehlern. Aufgrund der thermischen Trägheit von ATES-Systemen lohnt sich die zusätzliche Berücksichtigung von unterschiedlichen Lastprofilen bzw. Temperaturabfolgen. Daraus ergeben sich Informationen über günstige klimatische Jahresabfolgen für die Speicher- und Systemeffizienz (z.B. ein heißer Sommer gefolgt von einem kühlen Winter).

Abbildung 5.12 zeigt beispielhaft die Entwicklung des Temperaturverlaufs der warmen und der kalten Bohrung, wenn jährlich das gleiche Standardlastprofil (a) bzw. jährlich unterschiedliche Lastprofile (b) eingelesen werden.



(a) Jährlich gleichbleibende Lastprofile



(b) Wahrscheinlichkeitsbasierte Lastprofile aus Matlab (Monte-Carlo-Methode)

Abb. 5.12.: Vergleich des Temperaturverlaufs unter Verwendung von jährlich gleichen Lastprofilen (a) und unter Verwendung von jährlich variierenden Profilen (b)

Die Erzeugung von wahrscheinlichkeitsbasierten, einzigartigen Lastprofilen zur thermischen Systemsimulation von HT-ATES-Systemen ist nach Kenntnis des Autors methodisch neu, da die Lastprofile bei Langzeitsimulationen im Regelfall mehrfach in jährlichem Turnus eingelesen werden, d.h. bei einer 10 Jahres Simulation eines Energiesystems würde das gleiche Lastprofil 10 Mal hintereinander eingelesen werden. Die verwendeten Profile bilden die Abnehmersysteme häufig nur im langjährigen Mittel ab, ohne jährliche Schwankungen zu berücksichtigen.

In Abbildung 5.12 zeigt sich, dass der Temperaturverlauf in Abhängigkeit des Lastprofils zum Teil deutlich variiert, auch wenn ein ähnliches thermisches Einschwingverhalten beider Simulationen zu erkennen ist. Aus den jährlich abnehmenden, konduktiven Wärmeverlusten an das angrenzende Gestein resultieren entsprechend höhere Speichereffizienzen.

Die Speichereffizienz folgt unter Verwendung von Standardlastprofilen einer Sättigungskurve und nähert sich einem asymptotischen Maximalwert der erreichbaren Speichereffizienz an. Die Speichereffizienz beträgt unter Verwendung des Standardlastprofils in Variante 1 im 30. Simulationsjahr 63,2 %. Für das Standardlastprofil der Variante 2 wurde mit einer pauschalen Rücklaufauskühlung von 10 K und einem 20 % Wärmeabschlag gerechnet. Dadurch erreicht der Speicher eine Effizienz von knapp 75 % im 30. Simulationsjahr.

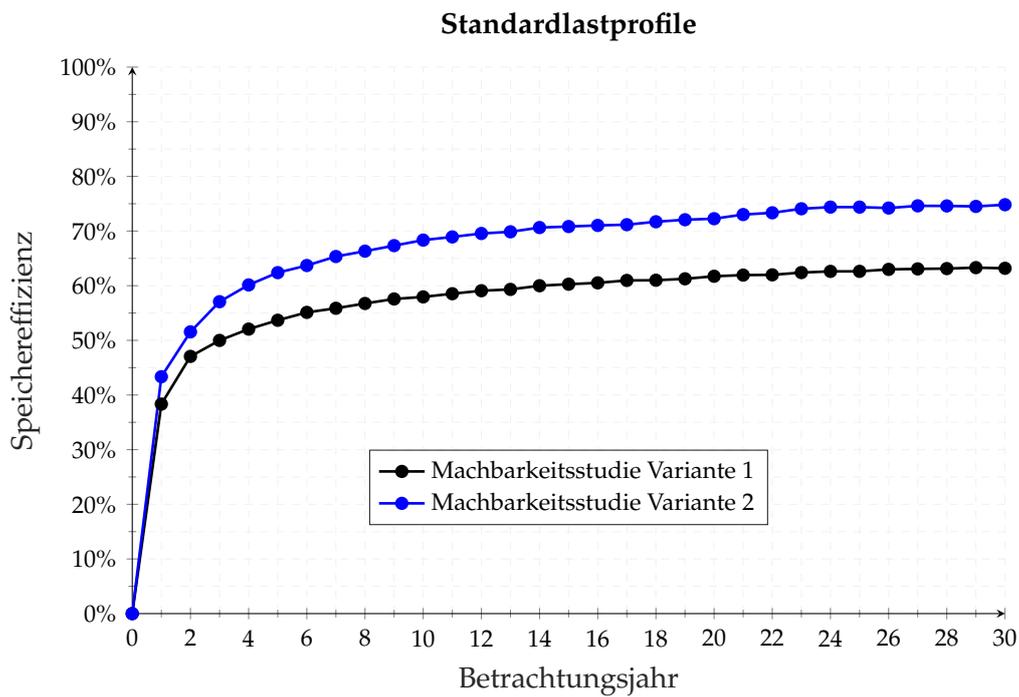
Die Speichereffizienz berechnet sich gemäß Gleichung 4.10 aus dem Verhältnis von ausgespeicherter Wärmemenge zu eingespeicherter Wärmemenge. Die zunehmende Speichereffizienz kann über diese Gleichung erklärt werden, denn bei gleichbleibenden Standardlastprofilen bleibt die eingespeicherte Wärmemenge während der Einspeicherung über die Jahre annähernd gleich. Das Verhältnis der Überschussleistung zwischen der regenerativen Erzeugung und dem Verbrauch während des Sommers bleibt im Verlauf über die Jahre konstant. Die ausspeicherbare Wärmemenge hängt vom Temperaturniveau der warmen Bohrung ab, welches wiederum bei jährlich gleichbleibendem Wärmeabnahmeprofil nur von den Wärmeverlusten im Untergrund abhängt. Aufgrund der Erwärmung des Untergrundes verbleibt die Temperatur der warmen Bohrung in Zeiten der Ausspeicherung länger auf einem Temperaturniveau, sodass größere Ausspeichermengen aus dem Aquifer an das Wärmenetz übertragen werden können. Bei Standardlastprofilen kann bei mehr oder weniger gleichbleibender Einspeichermenge über die Jahre hinweg aufgrund des ansteigenden Temperaturniveaus der warmen

Bohrung zunehmend mehr Wärme ausgespeichert werden. Dadurch verbessert sich die Effizienz stetig (Abbildung 5.13a).

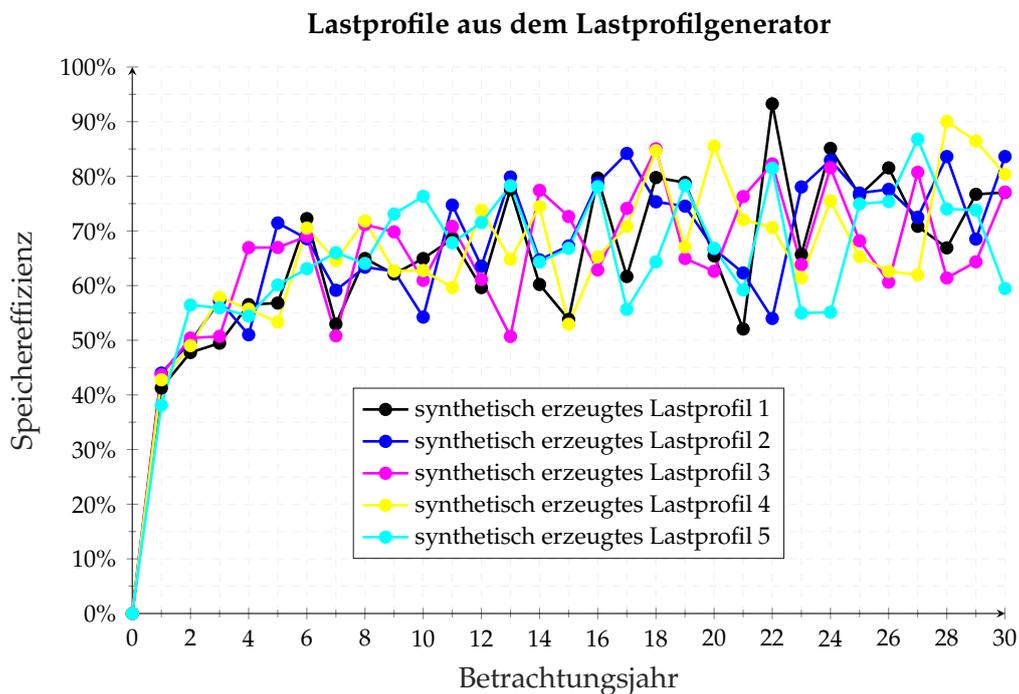
Tatsächlich schwanken die jährlichen Außentemperaturen monatsweise betrachtet sehr stark und dementsprechend variieren sowohl die Heizgradtage als auch das Verbraucherprofil während der Ein- und Ausspeicherphase. Da viele Wärmenetze außentemperaturgeführt geregelt sind, haben Außentemperaturschwankungen unmittelbaren Einfluss auf den jährlichen Wärmeverbrauch, auf die erforderliche Wärmeleistung und auf die vorzuhaltende Vorlauftemperatur. Die Modellierung des über die Jahre hinweg variierenden Verhaltens von Erzeuger- und Abnehmersystemen ist mit dem Lastprofilgenerator möglich.

Im Lastprofilgenerator ist durch den Monte-Carlo-Ansatz eine statistische Komponente implementiert, die für jedes Jahr ein einzigartiges Lastprofil berechnet. Das Lastprofil wird maßgeblich von einer synthetischen Temperaturreihe bestimmt, die zwar im langjährigen Mittel der Durchschnittstemperatur der Datengrundlage entspricht, jedoch im Ablauf der Reihenzusammensetzung unterschiedliche Temperaturen im Monatsmittel besitzt (siehe Abbildung 5.10). In Bezug auf das Langzeitverhalten des Aquiferwärmespeichers variieren aufgrund der jährlichen Temperaturschwankung sowohl die ein- als auch die ausspeicherbaren Wärmemengen. Somit ändert sich das Effizienzverhalten des Aquifers jährlich (Abbildung 5.13b). Die Abweichung gegenüber den Standardlastprofilen kann mehr als 20 % betragen, die Abweichung gegenüber einer Langzeitbetrachtung mit einem anderen synthetischen Lastprofil kann ebenfalls ähnliche Größenordnungen annehmen. Mit dem Lastprofilgenerator können zwei Effekte untersucht werden. Zum einen, wie sehr das simulierte Energiesystem von exogenen Einflüssen wie dem lokalen Wetter beeinflusst wird, zum anderen resultiert aus dem Monte-Carlo-Ansatz für jede durchgeführte Langzeitsimulation ein anderes Simulationsergebnis. Aus einer hinreichend großen Anzahl von unabhängigen Langzeitbetrachtungen kann ein statistischer oberer Erwartungswert (best-case-Szenario), ein statistisch unterer Erwartungswert (worst-case-Szenario) und ein wahrscheinlicher Erwartungswert aus der Ergebnisaggregation (siehe Abschnitt 6.4.3) abgeleitet werden.

Die Anwendung des Lastprofilgenerators zur Durchführung einer wahrscheinlichkeitsbasierten Energiesystem- und Wirtschaftlichkeitsanalyse erfolgt im Anschluss in Kapitel 6.



(a) Jährlich gleichbleibende Lastprofile



(b) Wahrscheinlichkeitsbasierte Profile aus Matlab (Monte-Carlo-Methode)

**Abb. 5.13.:** Vergleich der Speichereffizienz unter Verwendung von jährlich gleichen Lastprofilen (a) und unter Verwendung von jährlich variierenden Profilen (b)

## 6. Holistische Energiesystem- und Wirtschaftlichkeitsanalyse

Die netzgebundene Wärmeversorgung konkurriert mit der gebäudebezogenen, individuellen Einzelfeuerung. Welches Versorgungskonzept sinnvoller und wirtschaftlicher ist, hängt von mehreren Faktoren und ihrem Zusammenwirken im Einzelfall ab. Die Wirtschaftlichkeit orientiert sich an der Siedlungsstruktur (Anschlussdichte, Abnahmemenge), den Trassen- bzw. Verteilverlusten und dem Erzeugerpark, der die Energiegestehungskosten vor dem Hintergrund vielfältiger Rahmenbedingungen definiert.

Ein insgesamt sinkender Wärmebedarf durch eine steigende Gebäudeenergieeffizienz, konkurrierende Gasversorgungsnetze, komplexe Interessensgefüge der beteiligten Akteure sowie hohe Anfangsinvestitionen können dem Zubau von Wärmeversorgungssystemen entgegenstehen.

Im Gegensatz zu dem weitläufigen und zusammenhängenden Strom- und Gasnetz, sind die netzgebundenen Wärmenetze zumeist Inselnetze. Die Erzeugungs- und Transportkapazität muss so ausgelegt sein, dass die (berechnete) Spitzenlast gedeckt werden kann, auch wenn diese selten anliegt. Anders als im Stromnetz, kann keine externe Regelenergie zugekauft werden. Die Auslegung auf die maximale Wärmelast kann zu Wirtschaftlichkeitsproblemen führen, wenn Redundanzen selten oder gar nicht gebraucht werden [192]. Erfahrungsgemäß können mit 50 % der Spitzenlast etwa 90 % des jährlichen Gesamtwärmeverbrauchs abgedeckt werden.

In diesem Kapitel wird die Wirtschaftlichkeit der Konzeptvarianten abgefragt, indem die energetischen und finanziellen Bestandteile der Wirtschaftlichkeitsbewertung in einem holistischen Simulationsmodell zusammengefasst werden. Auf Grundlage des Kapitalwertes wird unter der Vorgabe wirtschaftlicher Randbedingungen berechnet, inwiefern die zwei betrachteten ATEs-Systeme ohne Förderung konkurrenzfähig sind. Im ersten Schritt erfolgen die Simulationen unter Verwendung von Standardlastprofilen

und im zweiten Schritt unter Verwendung von wahrscheinlichkeitsbasierten Profilen aus dem Lastprofilgenerator. Der Nachweis, dass variierende Lastprofile Einfluss auf die Temperaturentwicklung der warmen und kalten Bohrung nehmen und somit die Effizienz variiert, wurde in Kapitel 5 erbracht. In diesem Kapitel wird untersucht, inwiefern eine variierende Abfolge verschiedener Lastprofile die Zahlungsströme ändert und damit die Wirtschaftlichkeit beeinflusst.

### 6.1. Energiesystemanalyse

In der konzeptspezifischen Energiesystemanalyse werden die Anteile der einzelnen Erzeuger an der Gesamtwärmeerzeugung und der dafür notwendige Energieeinsatz bilanziert. Für die Berechnung des Erdgaseinsatzes wird ein konstanter Kesselwirkungsgrad von 85 % angenommen. In der Berechnung des Energieeinsatzes an Bio-Erdgas ist das Teillastverhalten der beiden BHKW-Module entsprechend Abbildung A.5 berücksichtigt. Stillstandszeiten der BHKWs aufgrund von Wartung sind nicht berücksichtigt. Die energetische Bilanzierung erfolgt über einen Zeitraum von 8760 h, zunächst unter Verwendung des Standardlastprofils aus der Machbarkeitsstudie [9]. Aus dem Standardlastprofil wurden zwei Wärmebedarfsfälle abgeleitet (siehe Abschnitt 6.3).

#### 6.1.1. Energetische Bilanzierung der Bestandsanlage (Referenzanlage)

Die vier Erzeuger setzen sich aus zwei biogasbetriebenen BHKWs und zwei mit konventionellem Erdgas betriebenen Spitzenlastkesseln zusammen. Die Erzeuger sind in Tabelle 6.1 zu den Erzeugereinheiten *Kessel* und *BHKW* zusammengefasst.

Für den Wärmebedarfswert der Variante 1 können 68,6 % des Wärmebedarfs durch die beiden BHKWs gedeckt werden. Hierfür müssen knapp 17,5 GWh an Bio-Erdgas eingesetzt werden. Im Wärmebedarfswert der Variante 2 kann der KWK-Anteil durch eine insgesamt geringere Wärmenachfrage auf 73,6 % erhöht werden. Entsprechend verbessert sich der Primärenergiefaktor  $f_p$  für die Wärmebereitstellung von 0,55 auf 0,49. Für den Wärmebedarfswert der Variante 2 ist das Einspar-Contracting durch einen pauschalen Leistungsabschlag und einer Rücklaufauskühlung des Teilnetzes der Universität berücksichtigt. Durch den Wegfall der sommerlichen Warmwasserbereitung im Teilnetz der Universität und der daraus resultierenden geringeren Wärmeabnahme in den Som-

mermonaten, nehmen sowohl die Startvorgänge als auch die Teillaststunden der beiden Blockheizkraftwerke gegenüber Variante 1 zu.

**Tab. 6.1.:** Energetische Auswertung der Simulation der Bestandsanlage unter Verwendung der Lastprofile der Machbarkeitsstudie [9]

Lastprofil	Variante 1	Variante 2
Summe Wärmeerzeugung	12 933 MWh	11 097 MWh
Kessel	4 065 MWh	2 932 MWh
BHKW	8 869 MWh	8 165 MWh
Stromerzeugung BHKW	6 943 MWh	6 387 MWh
Volllaststunden	11 618 h	10 502 h
Teillaststunden	1 937 h	2 019 h
Startvorgänge	665	740
Energieeinsatz		
Bio-Erdgas	17 453 MWh	16 062 MWh
Erdgas	4 781 MWh	3 449 MWh
Deckungsbeitrag am Wärmebedarf		
erneuerbar	68,6 %	73,6 %
konventionell	31,4 %	26,4 %
$f_P$	0,55	0,49

### 6.1.2. Nahwärmesystem mit Aquifer (Konzept I)

Durch die Einbindung des Aquiferwärmespeichers können die BHKWs annähernd ganzjährig im stromgeführten Volllastbetrieb gefahren werden. Im Durchschnitt betragen die Stillstandszeiten pro Modul und Jahr weniger als 100 h. Aufgrund der Laufzeiterhöhung können bis zu 2 800 MWh mehr Strom generiert werden. Dementsprechend steigt der jährliche mittlere Verbrauch von Bio-Erdgas um etwa 5 500 MWh an.

In Abhängigkeit des Lastgangs und des Simulationsjahres, wird der überschüssige Anteil der Wärmeerzeugung zu Zeiten niedriger Wärmelast in den Aquiferwärmespeicher eingespeichert (Einspeicherzyklus). Aufgrund der Erwärmung der angrenzenden Aquifertarde (Gesteinsgrenzflächen) im Untergrund nehmen die konduktiven Wärmeverluste des Aquiferwärmespeichers über die Jahre hinweg ab und die mittleren Ausspeicher-

temperaturen steigen. Dadurch erhöhen sich sowohl die Speichereffizienz als auch der Deckungsbeitrag des erneuerbar gedeckten Wärmebedarfs. Das steigende Temperaturniveau während der Ausspeicherphase ermöglicht weiterhin eine zunehmende Substitution der fossilen Spitzenlastkessel durch den Aquiferwärmespeicher. Der fossil gedeckte Anteil an der Wärmeversorgung kann in Variante 2 im 20. Simulationsjahr auf etwas über 9 % reduziert werden.

Im Vergleich zu der Größenordnung der eingesetzten Brennstoffe spielt der notwendige Energieeinsatz für den Betrieb der Tiefenpumpen des Aquifers (elektrische Hilfsenergie) mit < 100 MWh eine untergeordnete Rolle (siehe Tabelle 6.2) .

**Tab. 6.2.:** Energetische Auswertung der Simulation des Gesamtsystems mit Aquifer unter Verwendung der Lastprofile der Machbarkeitsstudie [9]

Lastprofil	Variante 1		Variante 2	
	1. Jahr	20. Jahr	1. Jahr	20. Jahr
Summe Wärmeerzeugung	15 757 MWh	14 289 MWh	13 420 MWh	12 315 MWh
davon Einspeicherung	2 208 MWh	2 113 MWh	2 866 MWh	2 807 MWh
Stromerzeugung BHKW	9 223 MWh	9 065 MWh	9 133 MWh	8 877 MWh
Volllaststunden	17 489 h	17 192 h	17 321 h	16 840 h
Teillaststunden	[-]	[-]	[-]	[-]
Startvorgänge	34	62	90	270
Summe Wärmebedarf	12 920 MWh	12 920 MWh	11 084 MWh	11 084 MWh
davon BHKW direkt	8 631 MWh	8 657 MWh	7 851 MWh	7 842 MWh
davon Ausspeicherung	975 MWh	1 516 MWh	1 441 MWh	2 229 MWh
davon Kessel	3 314 MWh	2 747 MWh	1 792 MWh	1 013 MWh
Energieeinsatz				
Bio-Erdgas	23 163 MWh	22 765 MWh	22 935 MWh	22 293 MWh
Erdgas	3 898 MWh	3 232 MWh	2 108 MWh	1 191 MWh
Hilfsenergie	73 MWh	81 MWh	70 MWh	71 MWh
Deckungsbeitrag am Wärmebedarf				
erneuerbar	74,3 %	78,7 %	83,8 %	90,9 %
konventionell	25,7 %	21,3 %	16,2 %	9,1 %
Speichereffizienz Aquifer	44,2 %	71,7 %	50,3 %	79,4 %

### 6.1.3. Nahwärmesystem mit Aquifer und Solarthermie (Konzept II)

In die Bilanz des Anlagenkonzeptes II gehen zusätzlich die Wärmeerträge aus der Solarthermie mit ein. Im primärseitigen Kollektorkreislauf mit einer Fläche von  $2000 \text{ m}^2$  an Flachkollektoren können etwa  $990 \text{ MWh}$  im Jahr erzielt werden. Davon werden etwa 90 % an das anlagenseitige Wärmenetz übertragen und treten als solarer Systemertrag in Erscheinung. Die niedrigen Rücklauftemperaturen aus dem NT-Pufferspeicher unterstützen hohe spezifische Systemerträge von bis zu  $450 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2_{AP} \cdot \text{a}}$ .

In den ertragsreichen Sommermonaten kann die Überschusswärme der Solarthermie genutzt werden, um gegenüber Anlagenkonzept I etwa  $600 \text{ MWh}$  mehr in den Aquifer einzuspeichern. Die Stagnationsproblematik ist somit weitestgehend ausgehebelt.

Die Nutzungskonkurrenz, die aus der gemeinsamen Nutzung des Niedrigexergiesystems zur Rückkühlung des Aquifers und der Solarthermie entsteht, begrenzt die Effizienz beider Technologien. Die zusätzlich eingespeicherte Wärmemenge im Einspeicherzyklus kann nicht in gleichem Maße ausgespeichert werden. Das Verhältnis aus Ein- und Ausspeicherung sinkt zu Ungunsten der Speichereffizienz gegenüber dem Anlagenkonzept I um etwa 4 – 7 %. Dennoch werden gegenüber dem Anlagenkonzept I Brennstoffkosten für Erdgas vermieden. Der verminderte Erdgasbezug beträgt gegenüber dem Anlagenkonzept I etwa  $400 \text{ MWh}$  im 1. Jahr und steigt auf etwa  $700 \text{ MWh}$  im 20. Simulationsjahr an.

Die notwendige elektrische Hilfsenergie für den Betrieb der Tiefenpumpen und der Umwälzpumpen im Solarkreislauf nimmt im Laufe der Jahre zu. Grund hierfür sind die steigenden Rücklauftemperaturen aus dem NT-Speicher. Angesichts einer geringeren sekundärseitigen Rückkühlung müssen die primärseitigen Pumpen einen größeren Volumenstrom fördern, um die gewünschte Zieltemperatur am Austritt des Wärmeübertragers einhalten zu können.

**Tab. 6.3.:** Energetische Auswertung der Simulation des Gesamtsystems mit Aquifer und 2000 m<sup>2</sup> Flachkollektoren unter Verwendung der Lastprofile der Machbarkeitsstudie

Lastprofil	Variante 1		Variante 2	
	1. Jahr	20. Jahr	1. Jahr	20. Jahr
Summe Wärmeerzeugung	15 707 MWh	14 798 MWh	14 197 MWh	13 018 MWh
davon Einspeicherung	2 809 MWh	2 877 MWh	3 499 MWh	3 695 MWh
davon Solarthermie <sup>2</sup>	990 MWh	954 MWh	995 MWh	973 MWh
Stromerzeugung BHKW	9 214 MWh	9 197 MWh	9 191 MWh	9 161 MWh
Volllaststunden	17 483 h	17 451 h	17 440 h	17 383 h
Teillaststunden	[-]	[-]	[-]	[-]
Startvorgänge	94	151	202	232
Summe Wärmebedarf	12 920 MWh	12 920 MWh	11 084 MWh	11 084 MWh
davon BHKW direkt	7 887 MWh	7 936 MWh	7 166 MWh	7 195 MWh
davon Ausspeicherung	1 149 MWh	1 981 MWh	1 516 MWh	2 625 MWh
davon Solarthermie <sup>3</sup>	898 MWh	869 MWh	902 MWh	884 MWh
davon Kessel	2 986 MWh	2 134 MWh	1 500 MWh	380 MWh
Energieeinsatz				
Bio-Erdgas	23 140 MWh	23 096 MWh	23 082 MWh	23 007 MWh
Erdgas	3 512 MWh	2 510 MWh	1 764 MWh	447 MWh
Hilfsenergie	93 MWh	108 MWh	84 MWh	94 MWh
Deckungsbeitrag am Wärmebedarf				
erneuerbar	76,9 %	83,5 %	86,5 %	96,6 %
konventionell	23,1 %	16,5 %	13,5 %	3,4 %
Speichereffizienz Aquifer	40,9 %	68,8 %	43,3 %	71,0 %
spez. solare Nutzwärme	449 $\frac{kWh}{m^2_{AP} \cdot a}$	435 $\frac{kWh}{m^2_{AP} \cdot a}$	451 $\frac{kWh}{m^2_{AP} \cdot a}$	442 $\frac{kWh}{m^2_{AP} \cdot a}$

<sup>2</sup>Wärmeerzeugung im Solarkreislauf

<sup>3</sup>Solarer Systemertrag

#### 6.1.4. Berechnung des Primärenergiefaktors und der Emissionsbilanz des Wärmeversorgungssystems

Der Primärenergiefaktor berücksichtigt neben dem unmittelbar messbaren Endenergieverbrauch eines Energieträgers zusätzlich die vorgelagerten Prozessketten, die zu seiner Förderung, Aufbereitung, Umwandlung und Verteilung aufgewendet werden müssen. Das Verhältnis von Primär- zu Endenergie ergibt den Primärenergiefaktor.

Im Rahmen der Baugenehmigung ist der Primärenergiefaktor erforderlich, um zusammen mit dem Wärmebedarf zur Deckung der Wärmeverluste über die Gebäudehülle die Nachweisführung der Energieeinsparverordnung (EnEV) zu komplettieren.

Nach der Auslegung der Fachkommission Bautechnik der Länderministerkonferenz kann ein Pauschalfaktor von 0,7 angelegt werden, wenn der KWK-Anteil im Wärmeversorgungssystem mindestens 70% beträgt. Allerdings ist nicht festgelegt, wie der KWK-Anteil nachgewiesen oder ausgewiesen werden soll. Weiterhin bedarf die Anwendung des Pauschalfaktors keiner Bescheinigung nach *FW 309-1*.

Nach dem Arbeitsblatt *FW 309-1* kann der Primärenergiefaktor  $f_p$  eines Wärmeversorgungssystems über die Anteile seiner Energieträger an der Wärmebereitstellung berechnet werden (einfaches Berechnungsverfahren). Dazu werden die Mengenanteile mit den Pauschalfaktoren für die jeweiligen Energieträger  $f_{p,cr}$  multipliziert (6.1)[193].

$$f_p = \sum_{cr} g_{cr} \cdot f_{p,cr} \quad (6.1)$$

mit

$f_{p,cr1} = 1,3$  für Wärme aus Kesseln (beliebiger Brennstoff)

$f_{p,cr2} = 0,2$  für Wärme aus KWK-Anlagen aus erneuerbarem Brennstoff

$f_{p,cr3} = 0,1$  für Wärme aus Solarstrahlung

Die Pauschalwerte der Primärenergiefaktoren entstammen dem Arbeitsblatt der AGFW (Stand: Februar 2017). Multipliziert mit den prozentualen Deckungsbeiträgen am Wärmebedarf (siehe Bilanzierung im Abschnitt 6.1.1) ergeben sich die Primärenergiefaktoren für die jeweiligen Anlagenkonzepte.

Aus ökologischer Sicht ist darüber hinaus die Emissionsbilanz der Anlagenkonzepte von Bedeutung. Die Universität hat sich zum Ziel gesetzt, auch unter Einbezug der

indirekten Emissionen aus Pendelverkehr und Dienstreisen klimaneutral zu sein [29]. Im Betrachtungszeitraum zwischen 2007 und 2011 wurden durchschnittlich  $8400 \frac{t}{a}$  an  $CO_2$ -Äquivalenten emittiert. Für den Nachweis der bilanziellen Klimaneutralität werden die konzeptabhängigen  $CO_2$ -Äquivalente nach Gleichung 6.2 berechnet.

$$CO_{2,eq} = \sum_{cr} f_{EM,cr} \cdot EE \quad (6.2)$$

mit

$f_{EM,BG} =$  zwischen  $50 \frac{g \cdot CO_{2,eq}}{kWh}$  und  $80 \frac{g \cdot CO_{2,eq}}{kWh}$  für Biogas [194–196],

$f_{EM,NG} = 245 \frac{g \cdot CO_{2,eq}}{kWh}$  für Erdgas [197],

$f_{EM,RE} =$  zwischen  $-821 \frac{g \cdot CO_{2,eq}}{kWh}$  und  $-921 \frac{g \cdot CO_{2,eq}}{kWh}$  Vermeidung für die Einspeisung elektrischer Energie (Gutschrift für verdrängten Grundlaststrom [198, 199])

Eine ausführliche Darstellung der Handlungsstränge in Bezug auf die Nachhaltigkeit und Klimaneutralität der Leuphana Universität haben Opel et al. in [30] veröffentlicht. Aus Sicht der Emissionsbilanz wurden für die Berechnung jeweils die für die Bilanz ungünstigen Grenzwerte aus der Literaturrecherche eingesetzt. Für das Emissionsäquivalent einer Biogasverbrennung wurden demnach  $80 \frac{g \cdot CO_{2,eq}}{kWh}$  angesetzt, für die Gutschrift einer verdrängten Kilowattstunde Grundlaststrom wurden  $-821 \frac{g \cdot CO_{2,eq}}{kWh}$  angesetzt.

## 6.2. Randbedingungen der Wirtschaftlichkeitsbewertung und Kostenpositionen

In diesem Abschnitt werden die Kostenpositionen aufgeschlüsselt und die Annahmen der Wirtschaftlichkeitsbewertung offengelegt. Als Bewertungsgröße der Wirtschaftlichkeit wird der Kapitalwert  $C_0$  herangezogen [200]. Die Kapitalwertmethode ist ein dynamisches Berechnungsverfahren, das quantifiziert, ob und in welcher Höhe eine Investition auf den Bewertungsstichtag bezogen einen Überschuss ( $C_0 > 0$ ) oder ein Defizit ( $C_0 < 0$ ) erwirtschaftet.

Unter Vorgabe eines Kalkulationszinssatzes werden die Zahlungsfolgen über den Betrachtungszeitraum erfasst und jährlich miteinander verrechnet. Die Summe der auf den Bewertungsstichtag abgezinsten Zahlungsfolgen ergibt den Kapitalwert der Investition.

Der Cashflow wird jahresscharf errechnet und ergibt sich aus der jährlichen Summe der Einzahlungen, die mit der jährlichen Summe an Auszahlungen gegengerechnet werden. Auszahlungen werden durch die einmalige Investition zu Beginn der Betrachtung ( $I_0$ ) und durch jährliche kapital- bzw. verbrauchsgebundene Kosten ausgelöst. Einzahlungen resultieren aus der Einspeisevergütung und verminderten Energiebezugskosten.

Im Zuge der Berechnung werden rechnerische Nutzungsdauern  $T_N$  und jährliche Rechen-sätze für Wartung und Instandhaltung genutzt, die sich an der VDI 2067 orientieren [13]. Durch die zeitliche Berücksichtigung der Ein- und Auszahlungen werden die jährlichen Zahlungsströme und der Kapitalwert in TRNSYS implementiert.

### 6.2.1. Investitions- und kapitalgebundene Kosten

Hinsichtlich der Investitions- und kapitalgebundenen Kosten muss zwischen den zwei untersuchten Anlagenkonzepten unterschieden werden. In beiden Fällen wird zu Beginn des Betrachtungszeitraumes eine Anfangsinvestition  $I_0$  für den Aquiferwärmespeicher und seine Einbindung in das Nahwärmenetz getätigt. Diese Anfangsinvestition ist mit dem vollen Betrag vor dem ersten Jahr der Bilanzierung anzusetzen.

Die einzelnen Kostenpositionen lassen sich in Ausrüstungskategorien zusammenfassen. Diese setzen sich zusammen aus der Bohrung, dem Anlagenbau, der Automatisierung, der Planung und sonstigen Arbeiten. Unter der Annahme eines Vollwartungsvertrages entstehen kapitalgebundene Kosten in Form von Wartung und Instandhaltung.

Die pauschalen Rechen-sätze betragen für die Wartung der Brunnen jährlich 0,2 % der Summe der Bohrkosten. Für den Anlagenbau I werden jährlich 3,5 % veranschlagt, für den Anlagenbau II und die Elektrotechnik/Automatisation sind es jeweils 2,5 % der Investitionskostenkategorie. Die einzelnen Kostenpositionen, die rechnerische Nutzungsdauer sowie die Rechen-sätze sind in Tabelle 6.4 zusammengefasst.

**Tab. 6.4.:** Kostenstruktur und Zusammenfassung der Investitionen:  
 Die Aufschlüsselung der Investitionen in Ausrüstungskategorien entstammt der Machbarkeitsstudie [9], die Rechsätze für Wartung ( $f_W$ ) und Instandhaltung ( $f_I$ ) orientieren sich an der VDI 2067 [13].

Kategorie	Kostenposition	Invest	$T_N$	$f_W$	$f_I$
Bohrkosten <sup>4</sup>	Baustelleneinrichtung	88 000 €			
	Bohrarbeiten	333 000 €			
	Ausbau Hauptbohrung	324 000 €			
	Pumpversuche/Entsandung	49 000 €			
	$\Sigma$	794 000 €	40 a	0,2 $\frac{\%}{a}$	-
Anlagenbau I	Unterwasserpumpen <sup>5</sup>	131 000 €	10 a		
	Erdverlegte Trasse	287 000 €			
	$\Sigma$	418 000 €	20 a	2,5 $\frac{\%}{a}$	1 $\frac{\%}{a}$
Anlagenbau II	Übertageinstallation (Armaturen, Rohrleitungen, Zubehör)	54 000 €			
	Installationen im Gebäude für Thermalwasserkreislauf	176 000 €			
	Slopanlage	30 000 €			
	$\Sigma$	260 000 €	25 a	1,5 $\frac{\%}{a}$	1 $\frac{\%}{a}$
Elektro/ Automatisation	Messtechnik	61 000 €			
	Automatisierung	93 000 €			
	Elektrotechnik	94 000 €			
	$\Sigma$	248 000 €	20 a	1,5 $\frac{\%}{a}$	1 $\frac{\%}{a}$
Planung	Ingenieurleistungen	151 000 €	-	-	-
Sonstiges	Gebäudeanpassungen	156 000 €			
	Inbetriebnahme, Dokumentation, Inertisierung	30 000 €			
	$\Sigma$	186 000 €	-	-	-
<b>Investitionsvolumen <math>I_0</math>:</b>		2 057 000 €			

<sup>4</sup>Richtpreisangebot

<sup>5</sup>In den Zahlungsströmen ist eine Ersatzinvestition in Höhe von 100 000 € für die Unterwasserpumpen nach 10 Jahren berücksichtigt

### 6.2.1.1. Kapitalkosten und Diskontierungszins

Grundsätzlich können Investitionsrechnungen unterschieden werden in Rechenverfahren unter Sicherheit und in Rechenverfahren unter Risiko bzw. Ungewissheit. Bei Anwendung der klassischen Verfahren der Investitionsrechnung wird häufig von der Prämisse der Sicherheit ausgegangen. Dabei wird vorausgesetzt, dass alle Rechenelemente mit Sicherheit bekannt sind. Dadurch kann aus jeder mit einer Investition verbundenen Zahlungsreihe genau ein Prognosewert (z. B. ein Kapitalwert, ein Wärmegestehungspreis, etc.) ermittelt werden, der dann formal im Rahmen der Investitionsrechnung so behandelt wird wie der (unrealistische) Fall sicherer Zahlungen. Man spricht von Investitionsbeurteilungen unter Sicherheit [201]. Eine einfache Möglichkeit zur Risikoberücksichtigung ist das Korrekturverfahren in Form von beispielsweise höheren Kalkulationszinsen. Dieses Verfahren ist in der Praxis üblich, aber aus theoretischen Gründen (u.a. Willkür bei der Bestimmung der Höhe der Korrekturen) nicht empfehlenswert [202].

Für die Wertfeststellung unter Unsicherheit geben Kruschwitz und Löffler [203] drei Ansätze vor: einen Einbezug von Sicherheitsäquivalenten (1), die Diskontierung mit einem risikolosen Zinssatz und der Beaufschlagung einer Risikoprämie (2) sowie einer Diskontierung unter Verwendung risikoneutraler Wahrscheinlichkeiten (3). Der Diskontierungszins erfüllt dabei die Zeitausgleichsfunktion und entspricht bei (1) und (3) dem risikolosen Zinssatz. In der Praxis ist eine risikolose Kapitalanlage unmöglich, dennoch kommen deutsche Staatsanleihen dieser theoretischen Forderung vergleichsweise nahe. Die in dieser Arbeit durchgeführte Wirtschaftlichkeitsanalyse geht der Frage nach, ob die untersuchten Anlagenkonzepte ohne Förderung wirtschaftlich darstellbar sind. Es wird grundsätzlich nicht von an internationalen Kapitalmärkten aktiven Investoren ausgegangen, die ein EE-Projekt als Investition mit Renditeerwartungen von  $> 10\%$  [204] tätigen. Zur Beantwortung der eingangs formulierten Forschungsfrage, müssen zukunftsfähige Energiesysteme langfristig ohne staatliche Eingriffe ihre Vollkosten decken können.

Durch den Einsatz des Lastprofilgenerators wird die stochastische Verteilung der Temperaturen über die Zusammenstellung verschiedener, unikater Lastfälle berücksichtigt. Die Unsicherheit der angesetzten Lastprofile wird somit explizit modelliert. Aus jeder Simulation über 20 Jahre wird ein Kapitalwert ermittelt. Durch eine Simulationsstudie mit 50 unterschiedlichen Lastprofilen erfolgt in Abschnitt 6.4.1 die Auswertung und Verteilung der 50 Kapitalwerte eines jeden Konzeptes.

Im Gegensatz zu den Simulationen mit generischen Lastprofilen (= ein Kapitalwert)

und der üblichen Risikobeaufschlagung durch einen hohen Kalkulationszins, wird die wirtschaftliche Prognosefähigkeit durch die zusätzliche Kenntnis über die Eintrittswahrscheinlichkeit des jeweiligen Kapitalwertes deutlich erhöht.

In der Kalkulation wird vereinfachend mit Realwerten ohne Preissteigerungsraten gerechnet. Die Auswertung der Simulationsstudie ist exemplarisch für eine Diskontierungszinsspanne zwischen 0 – 5 % durchgeführt, kann grundsätzlich aber für beliebige Kalkulationszinssätze ausgegeben werden.

### 6.2.1.2. Investitionskosten für die Einbindung der Solarthermie

Bei solarthermischen Großanlagen entfallen über 50 % des Gesamtinvests auf die Kollektoren an sich [205], wobei die Kostendegression der spezifischen Investitionskosten insbesondere bei Anlagengrößen zwischen 500 – 5000  $m^2$  sehr ausgeprägt ist. Für die Ermittlung der spezifischen Kosten wurde *SOLBEREG* verwendet, ein internes Planungstool des dänischen Ingenieur- und Beratungsunternehmens *Rambøll* [206].

Das Auslegungstool wird innerhalb des Unternehmens für die solarthermische Auslegung und Ertragsrechnung verwendet. Nach der Vorgabe der Klimazone und der Parametrierung des Kollektors über seine Wirkungsgradkennlinie können solarer Ertrag und spezifische Kosten berechnet werden. Weiterhin sind die monatscharfen Vor- und Rücklauftemperaturen aus dem Netz vorzugeben sowie die Temperaturspannung am Wärmeübertrager zwischen Netz- und Solarkreislauf.

Die spezifischen Investitionskosten für die Solarthermie setzen sich zusammen aus den Kollektoren, den erdvergrabenen Leitungen und deren Befüllung mit dem Wärmeträgerfluid, den Kosten für die Montage und MSR-Technik sowie einem pauschalen Planungsaufschlag von 10 %. Die Preiskurve für verschiedene Anlagengrößen basiert auf 20 Jahren an internationaler Projekterfahrung im Bereich der thermischen Solarenergie [207].

Nach den Berechnungen in *SOLBEREG* ergeben sich spezifische Investitionskosten (Bezugsfläche: Bruttofläche) in Höhe von

- $887 \frac{\text{€}}{m^2}$  für Anlagengrößen von 200  $m^2$
- $382 \frac{\text{€}}{m^2}$  für Anlagengrößen von 1 000  $m^2$
- $280 \frac{\text{€}}{m^2}$  für Anlagengrößen von 5 000  $m^2$

- $236 \frac{\text{€}}{\text{m}^2}$  für Anlagengrößen von  $10\,000 \text{ m}^2$ .

Für untersuchte Anlagengrößen im Zwischenbereich wird eine lineare Interpolation angesetzt. Da in TRNSYS die Aperturfläche als Bezugsfläche verwendet wird, müssen die Investitionskosten der Solarthermie über den Bezugsfaktor entsprechend auf die in TRNSYS simulierte Aperturfläche umgerechnet werden. Das Verhältnis von Brutto- zu Aperturfläche beträgt nach Herstellerangaben 1,077 [208].

Betriebsgebundene Kosten für die Einbindung der Solarthermie werden durch den Betrieb der Umwälzpumpen verursacht. Weiterhin werden jährlich 0,5 % der Investitionskosten für Wartung und Instandhaltung angesetzt [209]. Die rechnerische Nutzungsdauer der Solarthermieanlage beträgt 20 Jahre.

### 6.2.2. Verbrauchsgebundene Kosten und Erlöse

Wie aus Abschnitt 6.1.1 hervorgeht, können die Investitionskosten in den Aquiferwärmespeicher im Wesentlichen über zwei Mechanismen amortisiert werden. Erstens über die Laufzeitverlängerung der BHKWs in den Sommermonaten, die zu einer vermehrten Einspeisung erneuerbaren Stroms in das Netz führt. Zweitens über den verminderten Erdgasverbrauch, der aus der teilweisen Übernahme der Mittel- bzw. Spitzenlast durch den Aquiferwärmespeicher während seiner Ausspeicherung resultiert. Weiterhin entstehen zusätzliche Kosten aus dem Bezug von Strom für den Betrieb der Pumpen (Tiefenpumpen, Solarkreislauf), der unter dem Begriff Hilfsenergie zusammengefasst ist. BHKWs der neueren Generation bieten Serviceintervalle von bis zu 80 000 Betriebsstunden bis zur ersten Generalüberholung [210]. Aufgrund der höheren jährlichen Laufleistung der BHKWs im Zusammenspiel mit dem Aquifer, fallen die Service- und Wartungsarbeiten früher an. Es ist aus diesem Gesichtspunkt möglich, dass eine Ersatzinvestition für ein neues BHKW-Modul früher getätigt werden muss.

Im Gegenzug begünstigt die Laufzeitverlängerung bei gleichförmiger Nennlastbeanspruchung eine höhere Lebenszeit, da die Motoren als stationäre Dauerläufer ohne häufiges Anfahren betrieben werden können.

Es ist schwer abzuschätzen, wie sich die Laufzeitverlängerung auf die Kostenstruktur der BHKWs auswirkt. Vereinfachend wird davon ausgegangen, dass sich die (Mehr-) Kosten, die durch eine Ersatzinvestition zu einem früheren Zeitpunkt verursacht werden können, durch die eingesparten Kosten in Form einer Lebenszeitverlängerung des Motors in

etwa ausgleichen. In beiden Konzeptvarianten sind keine Kosten und Stillstandszeiten aufgrund von Wartung berücksichtigt.

Im Großen und Ganzen wird die Wirtschaftlichkeit stark beeinflusst von den veranschlagten Energiepreisen. Der Aquifer rechnet sich, je günstiger das Biogas und der Strom für die Hilfsenergie bezogen werden kann und je teurer der eingespeiste Strom verkauft werden kann bzw. das eingesparte Erdgas bezogen werden müsste.

Zunächst wird im Rahmen der Simulationsstudie initial mit den Energiepreisen aus Tabelle 6.5 gerechnet. Aufgrund der hohen Sensitivität der Energiepreise, werden diese nachfolgend im Abschnitt 6.4.3 genauer untersucht und variiert. Es kann bereits an dieser Stelle vorweggenommen werden, dass eine wesentliche, für die Wirtschaftlichkeit ungünstige Änderung eines Energiepreises gegenüber seines Initialwertes, die wirtschaftliche Betriebsweise nahezu ausschließt. Dies gilt für alle Energieträger außer für den Strombezugspreis, welcher in seiner Hebelwirkung auf die Wirtschaftlichkeit zu vernachlässigen ist. Die Konstellation der Energiepreise aus Tabelle 6.5 wird im weiteren Verlauf der Arbeit als Referenz herangezogen, um die Sensitivität einzelner Energiepreise auf die Wirtschaftlichkeit bewerten zu können.

Im Abschnitt 6.4.3 wird über die Ergebnisaggregation ein Gleichungssystem aufgestellt, das für eine beliebige Kombination an Energiepreisen nach dem Kapitalwert gelöst wird. Die Energiepreise sind in der wahrscheinlichkeitsbasierten Analyse Freiheitsgrade.

**Tab. 6.5.:** Referenzenergiepreise (exklusive Mehrwertsteuer) für die Untersuchung des Einflusses des Kalkulationszinssatzes und die Berechnung der aggregierten Losgrößen [9, 14–20]

Energieträger	Preis	Anmerkung
Erdgas	40 $\frac{\text{€}}{\text{MWh}}$	kalkulierter Mischpreis
Biogas	70 $\frac{\text{€}}{\text{MWh}}$	kalkulierter Mischpreis
Strom (Bezug)	150 $\frac{\text{€}}{\text{MWh}}$	Kosten für Hilfsenergie sind vernachlässigbar gering
Strom (Einspeisung)	197,3 $\frac{\text{€}}{\text{MWh}}$	Einspeisevergütung nach EEG 2012 für Einsatzstoffvergütungskategorie I

Der Vollständigkeit wegen sei erwähnt, dass das EEG über den Weg der verpflichtenden Direktvermarktung (EEG 2014) mittlerweile in ein Ausschreibungsmodell übergegangen

ist. Die in Tabelle 6.5 angenommene Vergütung bezieht sich auf die bestehenden BHKWs, die vor dem 01.01.2013 in Betrieb genommen wurden. Die EEG-Vergütung wurde als Initialwert festgelegt und später in Abschnitt 6.4.3 variiert. Durch kritische Preiskonstellationen konnte festgestellt werden, welche Einspeisevergütung in Abhängigkeit der Gasbezugpreise und des Kalkulationszinses mindestens notwendig ist, um eine wirtschaftliche Betriebsweise zu ermöglichen.

### **6.2.3. Sonstige Kosten**

In die Wirtschaftlichkeitsrechnung sind keine sonstigen Kosten einbezogen. Diese können beispielsweise durch Versicherungen, Wartungs- und Stillstandszeiten, Sicherheitsfaktoren oder Preissteigerungen entstehen.

### **6.2.4. Berechnung der Zahlungsfolgen und Kennzahlen als Indikatoren der Wirtschaftlichkeit**

Eine Investition wird getätigt, um eine Folge von Zahlungsüberschüssen auszulösen. Da die Zahlungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallen, muss dieser zeitliche Versatz durch die Auf- oder Abzinsung der Zahlungen auf einen bestimmten Zeitpunkt berücksichtigt sein.

Aus der Energiesystemanalyse in Abschnitt 6.1 geht hervor, dass sich die Energiebilanz in Abhängigkeit des Simulationsjahres ändert. Für die korrekte Berechnung aller Zahlungsfolgen, muss für jedes Simulationsjahr innerhalb des Betrachtungszeitraums eine energetische Vergleichsbilanzierung ausgewiesen sein.

Eine vergleichende Bilanzierung erfordert ein Referenzsystem. Daher wird zunächst die Bestandsanlage über den Betrachtungszeitraum simuliert, da sich unter Verwendung des Lastprofilgenerators auch die jährlichen Bilanzen der Bestandsanlage ändern. Die jährliche Energiebilanz der Referenzanlage wird in eine Datei geschrieben.

Anschließend wird das zu bewertende Anlagenkonzept in TRNSYS geöffnet und mit den entsprechenden Randbedingungen der Wirtschaftlichkeit aus Sektion 6.2 parametrisiert. Durch das Einlesen der Energiebilanz der Referenzanlage berechnet TRNSYS die jährlichen Zahlungsfolgen durch eine in die Simulation integrierte energetische Vergleichsbilanzierung zwischen Referenz und Untersuchungskonzept. Aus der internen

Berechnung folgen für jedes Jahr positive und negative Differenzen, die durch Energieeinsparungen bzw. -Mehraufwendungen ausgelöst werden. Mit den Energiekosten und Vergütungen verrechnet, ergeben sich daraus für jedes Betrachtungsjahr Einzahlungen ( $E_a$ ) und Auszahlungen ( $A_a$ ), die über den Diskontierungsfaktor  $\frac{1}{(1+i_K)^a}$  zu einem Barwert abgezinst werden.

Unter Berücksichtigung der Investitionsausgabe  $I_0$ , einer Ersatzinvestition von 100 000 € für den Pumpenwechsel nach 10 Jahren sowie einem möglichen Liquidationserlös  $LE$  zum Ende des Betrachtungszeitraums, errechnet sich der Kapitalwert aus der Summe der Barwerte:

$$C_0(i_K) = -I_0 + \sum_{a=1}^{T_B} \frac{E_a - A_a}{(1 + i_K)^a} + LE \cdot (1 + i_K)^{-T_B} \quad (6.3)$$

mit

$C_0$  = Kapitalwert bezogen auf den Bewertungsstichtag

$i_K$  = Kalkulationszinssatz

$I_0$  = Investitionsausgabe zu Beginn des Betrachtungszeitraums

$a$  = Jahr der Bilanzierung (= Simulationsjahr  $SJ$ )

$T_B$  = Betrachtungszeitraum in Jahren

$E_a$  = Summe der Einzahlungen in Periode  $a$

$A_a$  = Summe der Auszahlungen in Periode  $a$

$LE$  = Liquidationserlös bzw. Resterlös zum Zeitpunkt  $a = T_B$

In Abhängigkeit des Untersuchungskonzeptes ergeben sich unterschiedliche Investitionskosten. Im Untersuchungskonzept I bestehen die Investitionen im Wesentlichen aus den Bohrkosten, dem Anlagenbau und der Automatisierung.

In Konzept II müssen zusätzliche Investitionen für das Kollektorfeld und seine Errichtung und Einbindung aufgewendet werden.

Aus der linearen Absetzung für Abnutzung (AfA) kann nach Ablauf der rechnerischen Nutzungsdauer ein buchhalterischer Restwert (RW) verbleiben. Im letzten Betrachtungsjahr können Einzahlungen (Liquidationserlös von Einzelkomponenten oder monetärer Restwert) oder Auszahlungen (Rückbauverpflichtung) resultieren. In diesem Zusammenhang muss geklärt werden, ob ggf. Nachnutzungsmöglichkeiten existieren oder

juristische/behördliche Rückbauverpflichtungen bestehen.

Die Größenordnung eines theoretischen Liquidationserlöses ist aus heutiger Sicht schwer zu bewerten. Daher wird angenommen, dass mögliche Einzahlungen in Zusammenhang mit einem verbleibenden Restwert durch die Auszahlungen von Nachnutzungsverpflichtungen kompensiert werden. Die möglichen Ein- und Auszahlungen werden gleich gesetzt und aus Gleichung 6.3 folgt  $LE = 0$ .

Für die Berechnung der spezifischen Speicherkosten  $SSC$  wird die Summe der jährlichen durch den Speicher verursachten, diskontierten Mittelabflüsse ( $A_{a,St}$ ) auf die ausgespeicherte Wärmemenge ( $Q_{a,Discharge}$ ) bezogen. In den diskontierten Mittelabflüssen des Speichers sind die einmaligen Investitionskosten sowie die jährlichen Betriebskosten (Wartung, Instandhaltung, Pumpenbetrieb) enthalten.

Die zusätzlichen Erlöse für die Stromeinspeisung oder verminderte Gasbezugskosten sind in der Berechnung außen vor, da es sich bei den  $SSC$  um die reinen Speicherkosten für die Bilanzgrenze *Speicher* handelt. Unter dieser Prämisse geben die  $SSC$  an, zu welchem Preis eine Kilowattstunde Wärmeenergie gespeichert werden kann.

$$SSC = \frac{I_0 + \sum_{a=1}^{T_B} O_{a,St} \cdot (1 + i_r)^{-a}}{\sum_{a=1}^{T_B} Q_{a,Discharge}} \quad (6.4)$$

Eine weitere Kennzahl für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von energietechnischen Investitionsobjekten sind die Energiegestehungskosten, im Englischen *Levelized Cost of Energy* (LCOE). Die Energiegestehungskosten basieren auf den ganzheitlichen Kosten, die über die rechnerische Nutzungsdauer auf das Investitionsobjekt zurückzuführen sind und werden auf die in dem gleichen Zeitraum bereitgestellte Energiemenge bezogen [211]. Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit über die LCOE ist ein etablierter Ansatz, um verschiedene Energiekonzepte miteinander vergleichbar zu machen [212–215].

Aufgrund der Sektorkopplung treten in Zusammenhang mit der Berechnung der LCOE Schwierigkeiten auf. Da der Aquiferwärmespeicher in ein Energieverbundsystem integriert ist und die Wirtschaftlichkeit im Wesentlichen über den Mechanismus der EEG-Vergütung erzielt wird, müssten die LCOE differenziert nach Energieform berechnet werden. Hierfür gibt es unterschiedliche Ansätze, die Gestehungskosten für eine Kilowattstunde Wärme bzw. die Gestehungskosten für eine Kilowattstunde Strom zu allozieren [216].

Im Lüneburger Verbundsystem steht die Versorgung des Nahwärmenetzes im Fokus.

Unter den Marktbedingungen eines Wärmecontractors soll vor dem Hintergrund der Zukunftsfähigkeit untersucht werden, welchen Einfluss die beiden Anlagenkonzepte auf den Wärmepreis ausüben. Für die Bewertung verschiedener Wärmeerzeuger werden zumeist die jeweiligen Wärmegestehungskosten  $LCOH$  (engl.: *Levelized Cost of Heat*) miteinander verglichen [217].

Unter Einbezug aller Effekte auf Systemebene, wird für die Bilanzgrenze *Energieverbundsystem* die **Änderung** der  $LCOH$  berechnet. In der Bilanz sind sämtliche Wärmeverluste (z.B. Pufferspeicher, Rohrleitungen) und Übertragungsverluste in den Wärmeübertragern (zumeist 3 K Temperaturverlust) berücksichtigt.

Die Änderung ergibt sich aus der Summe der Barwerte in Bezug auf die Summe der gelieferten Energiemenge an die Verbraucher (siehe Gleichung 6.5).

$$LCOH_{add}|LCOH_{sub} = \frac{-I_0 + \sum_{a=1}^{T_B} (E_a - A_a) \cdot (1 + i_K)^{-a}}{\sum_{a=1}^{T_B} Q_{a,Demand}} = \frac{-I_0 + \sum_{a=1}^{T_B} B_a}{\sum_{a=1}^{T_B} Q_{a,Demand}} \quad (6.5)$$

Für den Fall eines negativen Kapitalwertes beschreiben die  $LCOH_{add}$  den notwendigen additiven Preiszuschlag pro kWh Wärme, um den Kapitalwert zu Null zu egalisieren. Für den Fall eines positiven Kapitalwertes beschreiben die  $LCOH_{sub}$  den möglichen subtraktiven Preisnachlass pro kWh Wärme, um gerade noch einen Kapitalwert von Null zu erhalten.

Während die  $SSC$  eine isolierte Betrachtung des Speichers auf Komponentenebene beinhalten, berücksichtigen die  $LCOH$  alle im Verbundsystem auftretenden Änderungen, die auf die Dienstleistung des Aquiferwärmespeicher zurückzuführen sind. Es gilt für die Anlagenkonzepte stets  $|SSC| > |LCOH|$ .

### 6.3. Implementierung der Zahlungsströme in TRNSYS - Vom Lastprofil zum Kapitalwert

Grundlage der Wirtschaftlichkeitsbewertung sind die mit der Integration des Aquifers und der Solarthermie einhergehenden Einsparungen und Mehraufwendungen gegenüber der Bestandsanlage. Die notwendigen Prozessabläufe vom Lastprofil bis hin zu den Auswertungsgrößen des holistischen Modells sind in Abbildung 6.1 zusammengefasst. Für die Energiesystem- und Wirtschaftlichkeitsanalyse des Abschnitts 6.4 werden die

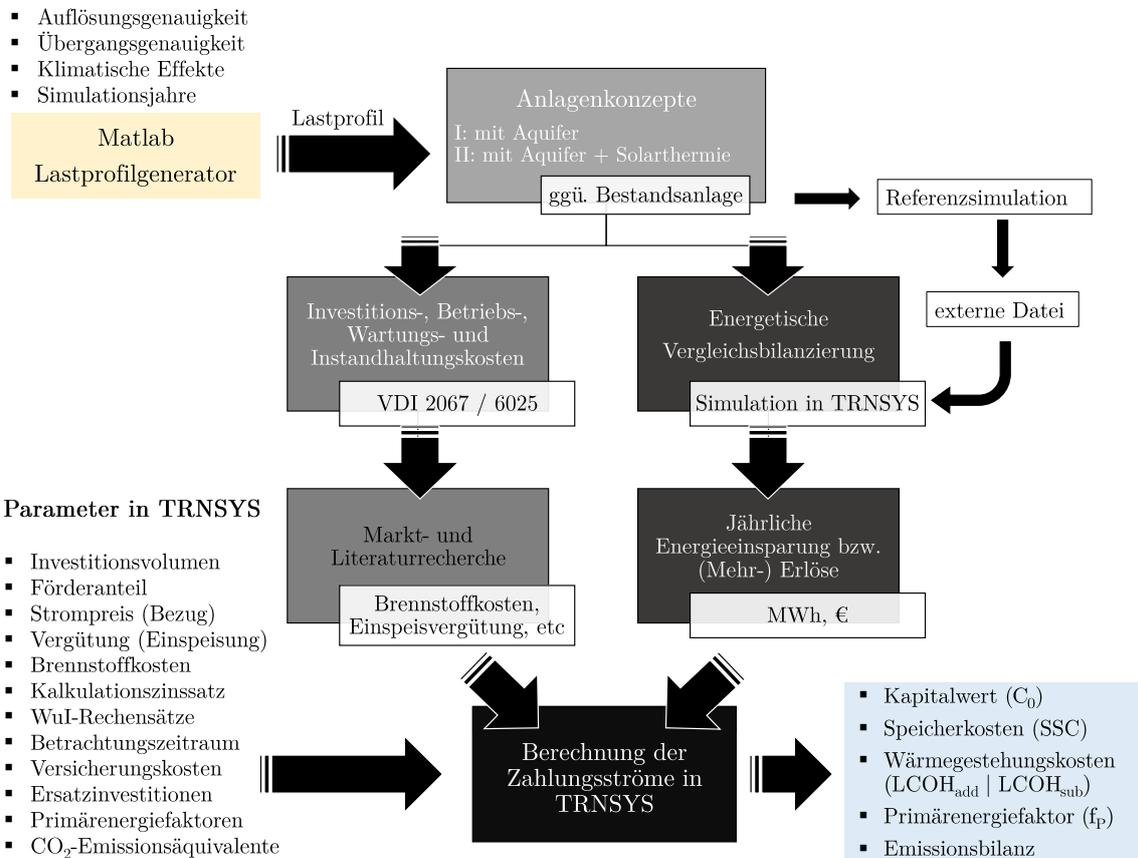
in Matlab berechneten Lastprofile in TRNSYS eingelesen und anschließend für die Simulation der Bestandsanlage über den Betrachtungszeitraum  $T_B$  übergeben. Die für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit notwendigen Auswertungsgrößen wie Gasverbräuche der Erzeuger, Stromproduktion der BHKWs, KWK-Anteil etc. werden für jedes Simulationsjahr integriert und in einer externen Datei jahresscharf zusammengefasst. Im zweiten Schritt wird das zu untersuchende Anlagenkonzept mit dem gleichen Lastprofil über den Betrachtungszeitraum  $T_B$  simuliert. Über eine Vergleichsbilanzierung werden die Auswertungsgrößen parallel zur Simulation mit den Ergebnissen der Referenzsimulation verrechnet und zu jahresscharfen Zahlungsströmen zusammengefasst. Im Anhang sind konzeptspezifische Zahlungsströme dargestellt, wie sie in einer TRNSYS-Simulation über 20 Jahre berechnet werden: Einmal unter Verwendung von Standardlastprofilen (siehe Abbildung A.6 und Abbildung A.7) und einmal in aggregierter Form nach Verwendung von wahrscheinlichkeitsbasierten Profilen (siehe Abbildung A.8 und Abbildung A.9).

Da Letztere auf Monte-Carlo-Temperaturreihen basieren, ergibt sich für jede Simulation ein Prognosewert. Die Durchführung von mehreren Simulationen ergibt eine (Wahrscheinlichkeits-) Verteilung der Prognosewerte.

Die verbrauchsgebundenen Kosten und Erlöse aus Abschnitt 6.2.2 können zusammengefasst werden zu einem resultierenden Zu- und Abfluss an Zahlungsströmen. Die Differenz aus den Zahlungsströmen bildet den jährlichen Cashflow (Gleichung 6.8), der auf den Startzeitpunkt abgezinst als Barwert ausgewiesen wird. Der Restwert  $RW$  wird aus der linearen Abschreibung von steuerrechtlich ansatzfähigen Komponenten über ihre rechnerische Nutzungsdauer bestimmt. Die Summe der Barwerte ergibt den Kapitalwert  $C_0$ . Als Kennzahlen der Wirtschaftlichkeitsbewertung werden die spezifischen Speicherkosten  $SSC$  und die Änderung der Wärmegestehungskosten  $LCOH$  berechnet. TRNSYS schreibt die Zahlungsfolgen in eine Datei und berechnet parallel zur energetischen Simulation Auswertungsgrößen wie Kapitalwert oder Speicherkosten. Die wirtschaftlichen Randbedingungen können als Parameter in das Modell eingegeben werden. Am Ende einer Simulation können die gewünschten Größen (blauer Kasten in Abbildung 6.1) direkt ausgelesen werden, ohne dass eine separate Berechnung im Nachgang notwendig ist.

Nachfolgend soll zunächst anhand der Lastfälle aus der Machbarkeitsstudie [9] belegt werden, dass die Wirtschaftlichkeit des Aquifers in beiden Anlagenkonzepten signifikant

durch das Lastprofil beeinflusst wird.



**Abb. 6.1.:** Methodik und Parameter der ganzheitlichen Energiesystem- und Wirtschaftlichkeitsanalyse in TRNSYS

In der Machbarkeitsstudie wurde ein auf Messdaten basierendes Lastprofil in zwei Wärmebedarfsfällen untersucht. In Variante 1 wurde die Bedarfscharakteristik des Jahres 2012 durch eine polynomische Ausgleichsfunktion genähert. Durch eine Anpassung mit einem über das Jahr einheitlichen Faktor an die mittleren Jahresbedarfszahlen aus den Jahren 2008-2012 wurde das Profil temperaturbereinigt.

In Variante 2 wurde mit einem 25%-Abschlag auf alle thermischen Leistungen des Uni-Teilnetzes und dem Wegfall der sommerlichen Warmwasserbereitung gerechnet. Die Rücklauftemperaturen wurden pauschal um 10 K abgesenkt.

In Anlagenkonzept I (mit Aquifer) unterscheiden sich die Kapitalwerte je nach Lastprofilvariante um etwa 435 000 €, in Anlagenkonzept II (mit Aquifer und Solarthermie)

sind es knapp 650 000 € (siehe Tabelle 6.6).

**Tab. 6.6.:** Exemplarische Punktprognose einer Energiesystem- und Wirtschaftlichkeitsanalyse unter Verwendung von zwei Standardlastprofilen aus der Machbarkeitsstudie [9] für einen Kalkulationszinssatz von  $i_K = 2\%$

Anlagenkonzept Lastprofil	mit Aquifer		mit Aquifer+Solarthermie	
	Variante 1	Variante 2	Variante 1	Variante 2
Kapitalwert	-744 701 €	-309 046 €	-1 287 823 €	-639 869 €
SSC	8,48 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$	6,72 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$	5,87 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$	4,54 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$
$LCOH_{add}$	0,29 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$	0,14 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$	0,50 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$	0,29 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$
$HRF_{av}$	67,3 %	70,8 %	62,7 %	64,7 %
$f_{P,av}$	0,42	0,31	0,4	0,26
$CO_{2,eq,av}$	-3515 $\frac{t}{CO_2}$	-3818 $\frac{t}{CO_2}$	-3587 $\frac{t}{CO_2}$	-4064 $\frac{t}{CO_2}$

Die spezifischen Speicherkosten bewegen sich im Bereich zwischen 4,5 – 8,5  $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$ , wobei die spezifischen Speicherkosten unter Verwendung des Lastprofils der Variante 2 aufgrund eines günstigeren Rückkühlverhaltens grundsätzlich niedriger sind als in Variante 1. Die wegfallende Warmwasserbereitung während der Sommermonate erhöht in Variante 2 die einspeicherbare Wärmemenge in den Aquifer. Durch den im Vergleich zu Lastprofil 1 gesteigerten Wärmeüberschuss während der Einspeicherphase erhöht sich sowohl das mittlere Temperaturniveau als auch das eingespeicherte Volumen. Das höhere Temperaturniveau ermöglicht eine längere Ausspeicherphase, da die regelungstechnisch vorgegebene Temperaturdifferenz zur Rückkühlung (siehe Abschnitt 4.5.3) länger eingehalten werden kann. Aus dem Speicher kann somit konzeptspezifisch zwischen 26 – 32 % mehr Wärme ausgespeichert werden.

Aufgrund der in Abschnitt 4.6.6 und 6.1.3 beschriebenen Nutzungskonkurrenz ist die Speichereffizienz des Aquifers in dem Konzept mit der Solarthermie grundsätzlich niedriger als in dem Anlagenkonzept ohne der Solarthermie.

## 6.4. Wahrscheinlichkeitsbasierte Energiesystem- und Wirtschaftlichkeitsanalyse

Im weiteren Verlauf der Analyse wird die Prognosefähigkeit und die Prognosegenauigkeit erhöht, indem die beiden Konzepte mit 50 wahrscheinlichkeitsbasierten Lastprofilen über jeweils 20 Simulationsjahre hinweg simuliert und ausgewertet werden. Durch den Monte-Carlo-Ansatz des Lastprofilgenerators werden die lokalen Wettereinflüsse über eine Variation an jährlichen Temperaturen explizit simuliert. Insgesamt besteht die Simulationsstudie aus 2000 simulierten Jahresverläufen, die in einer Simulationsschrittweite von 5 Minuten durchgeführt wurden.

Im Gegensatz zu einer mit Standardlastprofilen entstehenden Punktprognose (vgl. Tabelle 6.6), entsteht durch den Monte-Carlo-Ansatz der Analyse ein Intervall an Prognosewerten für den Kapitalwert. Der anschließende Nachweis der Normalverteilung der Kapitalwerte in Abhängigkeit des Kalkulationszinssatzes erlaubt die Ableitung einer Verteilungsfunktion, mit der eine Aussage darüber getroffen werden kann, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine wirtschaftliche Betriebsweise des Aquifers aus Sicht eines Anlagenbetreibers möglich ist.

Durch die Aggregation der Simulationsergebnisse zu dem wahrscheinlichsten Eintrittsszenario, kann ein Gleichungssystem aufgestellt werden, das eine individuelle Wirtschaftlichkeitsanalyse mit den Freiheitsgraden *Erdgasbezugspreis*, *Biogasbezugspreis*, *Einspeisevergütung*, *Kalkulationszins* und *Förderanteil* ermöglicht. Das Lösen des Gleichungssystems mit den erwähnten Freiheitsgraden verbessert die Fähigkeit der Prognose insofern, als dass beliebige Preis- und Kalkulationszinssätze für das wahrscheinlichste Szenario untersucht werden können, indem das aufgestellte Gleichungssystem nach Vorgabe der Freiheitsgrade gelöst wird, ohne dass weitere Simulationen durchgeführt werden müssen.

Abschließend wird die Sensitivität der Gasbezugpreise und die Sensitivität der Einspeisevergütung auf die Wirtschaftlichkeit über kritische Energiepreiskonstellationen herausgearbeitet. Die kritischen Energiepreiskonstellationen ergeben in Abhängigkeit des Kalkulationszinssatzes den Kapitalwert 0. Der Kalkulationszinssatz entspricht für diesen Fall dem internen Zinsfuß der Investition.

### 6.4.1. Ergebnisse und Auswertung der Simulationsstudie

Aus der Simulationsstudie erhält man für jeden Kalkulationszinssatz eine individuelle Verteilung der gewünschten Auswertungsgrößen. Eine Änderung des Kalkulationszinssatzes führt für beide Anlagenkonzepte zu unterschiedlichen und in der Verteilungshäufigkeit variierenden Verteilungsprofilen. Im Anhang befindet sich die konzeptspezifische Darstellung der Kapitalwertverteilungen für Kalkulationszinssätze zwischen 0 – 5 % (Abbildung A.8a-f).

In Tabelle 6.7 sind die Auswertungsgrößen exemplarisch für den Kalkulationszinssatz von  $i_K = 2\%$  dargestellt. Bei einem Kalkulationszinssatz von  $i_K = 2\%$  konnte für das Konzept mit einer  $2000\text{ m}^2$  Solarthermieanlage kein Szenario nachgewiesen werden, das wirtschaftlich ist. Ohne der Solarthermie (Konzept I) waren lediglich 3 von 50 untersuchten Langzeitsimulationen wirtschaftlich. Nach Verwendung der Normalverteilungsfunktion aus Abschnitt 6.4.2 konnte die Eintrittswahrscheinlichkeit einer wirtschaftlichen Betriebsweise des Konzeptes ohne der Solarthermie und für einen Kalkulationszinssatz von 2 % berechnet werden. Diese lag bei 6 %.

In Bezug auf den Kapitalwert  $C_0$  unterscheidet sich das konzeptspezifische *best-case-Szenario* gegenüber dem *worst-case-Szenario* um fast 950 000 € (Konzept mit Aquifer) bzw. um über 937 000 € (Konzept mit Aquifer und Solarthermie).

**Tab. 6.7.:** Bandbreite der Simulationsergebnisse für verschiedene Auswertungsgrößen für den Kalkulationszins  $i_K = 2\%$

Konzept	mit Aquifer			mit Aquifer+Solarthermie		
	min	max	Ø	min	max	Ø
$C_0$	-826 204 €	123 730 €	-389 355 €	-1 260 986 €	-323 095 €	-814 445 €
SSC	5,7 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$	8,1 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$	6,8 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$	3,8 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$	7,6 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$	4,7 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$
$LCOH_{add}$	0,02 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$	0,31 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$	0,17 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$	0,15 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$	0,57 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$	0,36 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$
$HRF_{av}$	61,9 %	69,1 %	65,6 %	57,2 %	66,8 %	62,7 %
$f_P$	0,28	0,49	0,34	0,25	0,45	0,3
$CO_{2,eq,av}$	-3960 $\frac{t}{CO_2}$	-3176 $\frac{t}{CO_2}$	-3744 $\frac{t}{CO_2}$	-4019 $\frac{t}{CO_2}$	-3323 $\frac{t}{CO_2}$	-3855 $\frac{t}{CO_2}$

Die spezifischen Speicherkosten SSC sind in dem Anlagenkonzept ohne der Solarthermie

im Durchschnitt um 44 % höher, die mittlere Speichereffizienz ist hingegen um etwa 5 % niedriger. Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass der Minimalwert und der Maximalwert der spezifischen Speicherkosten und der Speichereffizienz stark schwanken und somit von der zeitlichen Aneinanderreihung der Lastprofile abhängen.

Würde man die konzeptabhängigen Mehrkosten auf die Energiegestehungskosten umlegen, so würden diese im Konzept mit dem Aquifer im Durchschnitt um  $0,17 \frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$  ansteigen und in dem Konzept mit dem Aquifer und der Solarthermie durchschnittlich um  $0,36 \frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$ .

Der Primärenergiefaktor  $f_p$  ließe sich gegenüber der Bestandsanlage im Durchschnitt auf 0,34 bzw. 0,30 verbessern. Das entspricht einem Einsparpotential um bis zu 25 %.

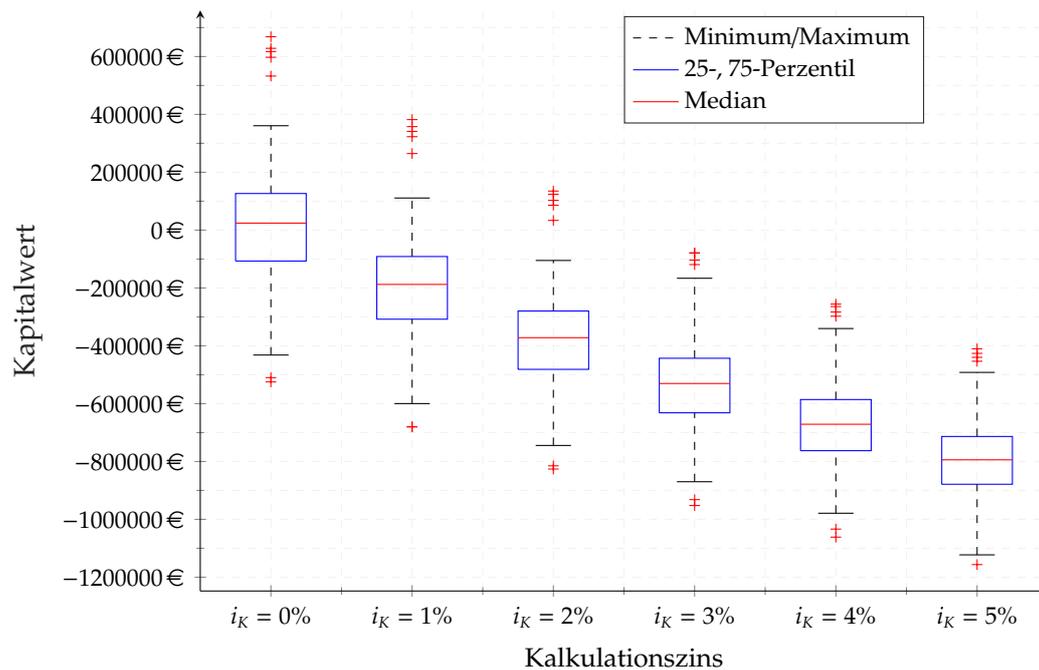
Sowohl für energetische Auswertungsgrößen als auch für die Wirtschaftlichkeit eines Aquiferwärmespeichers ist offensichtlich wichtig, wann und in welchem Ausmaß exogene Wettereinflüsse auf das Gesamtsystem einwirken. Beispielsweise können milde Jahre in den ersten Betriebsjahren dazu beitragen, dass sich das thermische Einschwingverhalten (siehe Abschnitt 5.4) der Wirtschaftlichkeit zuträglich verhält. Gleichsam könnten ungünstige Temperaturjahresverläufe dazu führen, dass sich das thermische Langzeitverhalten zu Ungunsten der Wirtschaftlichkeit ändert. Ähnlich wie bei Zahlungsströmen, bei denen die zeitliche Abfolge Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit nimmt, nehmen unterschiedliche Abfolgen der Temperatur-Jahresverläufe unterschiedlichen Einfluss auf das thermische Langzeitverhalten des Aquifers und auf die Zahlungsströme. Im ersten Schritt der Ergebnisauswertung werden die Referenzenergiekosten aus Tabelle 6.5 verwendet, um den Einfluss des Kalkulationszinssatzes auf die Verteilung der Kapitalwerte und die Verteilung der spezifischen Speicherkosten zu untersuchen. Aus dieser Untersuchung geht hervor, welches Konzept grundsätzlich wirtschaftlicher ist und welcher interne Zinsfuß für ein derartiges Investitionsvorhaben maximal angelegt werden dürfte. In Abbildung 6.2 ist die konzeptspezifische Verteilung der Kapitalwerte für Kalkulationszinssätze zwischen 0 – 5 % als Boxplot dargestellt. Der Boxplot zeigt durch die blaue Box an, in welchem Bereich die mittleren 50 % der Simulationsergebnisse liegen. Innerhalb der Whisker (schwarze gestrichelte Antennen) liegen 95 % der Ergebnisse, außerhalb liegen die von Matlab als Ausreißer (rote Pluszeichen) bewerteten Simulationsergebnisse. Der rote Strich in der blauen Box kennzeichnet den Median der Simulationsergebnisse [218, 219].

Grundsätzlich können zunächst zwei Forschungsergebnisse festgehalten werden: Erstens

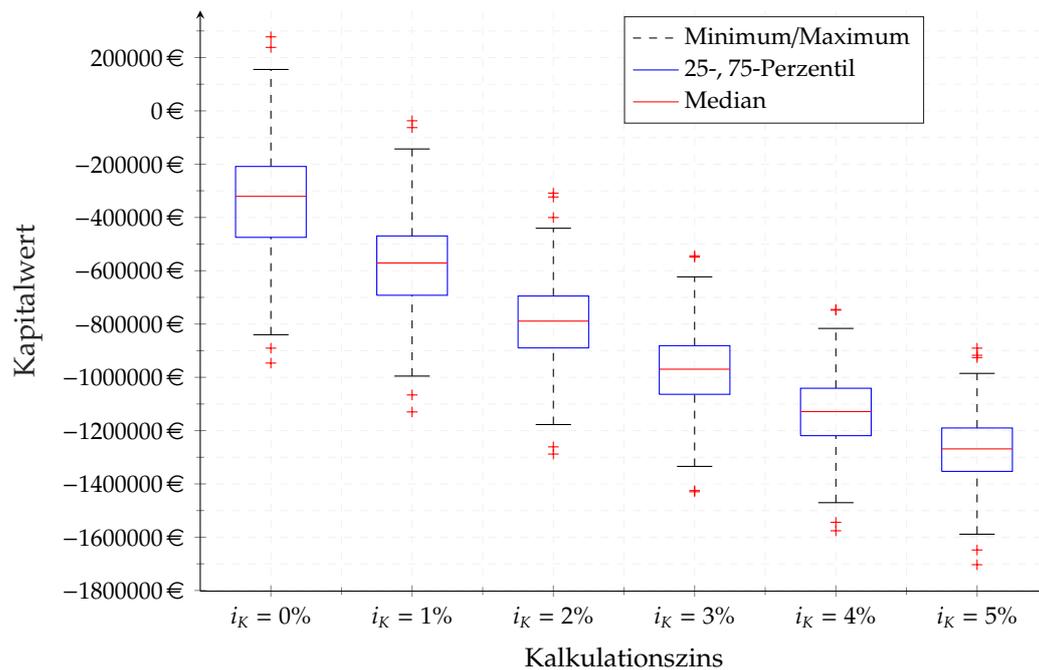
weist das Konzept ohne Solarthermie gegenüber dem Konzept mit der Solarthermie einen Versatz in Richtung höherer Kapitalwerte auf. Das bedeutet, dass die Solarthermie in dem untersuchten System mit  $2000 \text{ m}^2$  Flachkollektoren die Wirtschaftlichkeit negativ beeinflusst, da die dafür notwendigen Zahlungsrückflüsse über eine Amortisationszeit von 20 Jahren nicht erreicht werden. Diese Erkenntnis hängt mit der Ambivalenz zusammen, dass größere Bruttokollektorflächen zwar deutlich geringere spezifische Investitionskosten zur Folge hätten, aber der solare Systemertrag mit zunehmender Kollektorfläche systembedingt abnimmt. Zusätzlich zum solaren Systemertrag nimmt die Speicherffizienz des Aquifers mit zunehmender Kollektorfläche ab, so dass die Einsparung für geringere spezifische Investitionskosten durch einen Effizienznachlass der Solarthermie und des Aquifers überkompensiert wird (vgl. Tabelle 4.7). Diese Verhaltensweise ist ein Spezifikum des Wärmesystems und resultiert aus dem begrenzten Rückkühlvermögen des Niedertemperatursystems. Des Weiteren konkurriert die Solarthermieanlage gegen die sehr geringen Wärmegestehungskosten der erdgasbefeuerten Bestandskessel. Würde man ein neues Quartier planen und müssten ohnehin Investitionen in die Wärmeerzeugung getätigt werden, wäre die Solarthermie unter Umständen konkurrenzfähig.

Über den Top-Down-Ansatz kann man statisch überschlagen, welchen spezifischen Systemertrag eine  $2000 \text{ m}^2$  große Solarthermieanlage jährlich leisten muss, wenn sie sich über die Verdrängung erdgasbefuener Kessel mit einem Bezugspreis von  $40 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$  amortisieren soll. Die Anfangsinvestition von  $663\,000 \text{ €}$  würde bei einer kalkulierten Nutzung über 20 Jahre statisch amortisiert werden können, wenn jährlich  $829 \text{ MWh}$  aus der Solarthermieanlage an das Wärmenetz übertragen werden. Umgerechnet auf die spezifische Aperturfläche eines Kollektors ergibt sich ein Beitrag von etwa  $414 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$ , damit sich die Anfangsinvestition für die Solarthermieanlage über die Erdgaseinsparung selbst trägt. Tatsächlich sind es in Abhängigkeit des Lastprofils zwischen  $390 - 410 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$ .

Die statische Amortisationszeit der Solarthermieanlage liegt nicht weit über der geplanten Nutzungsdauer. Aufgrund der abnehmenden Effizienz bei zunehmender Anlagengröße können größere Kollektorflächen nicht zu einer wirtschaftlicheren Betriebsweise beitragen. Selbst bei einem Kalkulationszinssatz von  $0 \%$  liegt die Eintrittswahrscheinlichkeit einer wirtschaftlichen Betriebsweise unter  $25 \%$  (vgl. Abbildung 6.2b).



(a) Kapitalwertverteilung des Konzeptes I (mit Aquifer) auf Basis von 50 Simulationen über 20 Jahre unter Verwendung der Referenzenergiekosten aus Tabelle 6.5



(b) Kapitalwertverteilung des Konzeptes II (mit Aquifer und 2000  $m^2$  Flachkollektoren) auf Basis von 50 Simulationen über 20 Jahre unter Verwendung der Referenzenergiekosten aus Tabelle 6.5

**Abb. 6.2.:** Konzeptspezifische Verteilung der Kapitalwerte in Abhängigkeit des Kalkulationszinssatzes

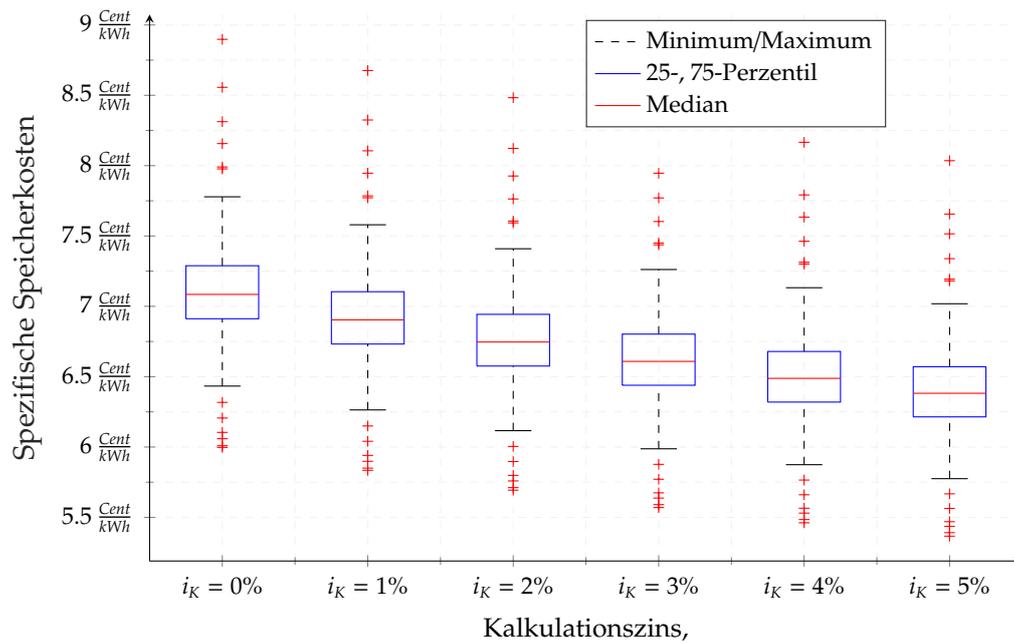
Als zweite wesentliche Erkenntnis ist zu konstatieren, dass eine wirtschaftliche Betriebsweise beider Konzepte, wenn überhaupt, nur bei sehr geringen internen Zinsfüßen des Investors möglich ist. Bei einem Kalkulationszinssatz von 2 % ist der Eintritt einer wirtschaftlichen Betriebsweise für Konzept I sehr unwahrscheinlich (nur die Ausreißer in Abbildung 6.2a befinden sich im Bereich positiver Kapitalwerte), für Konzept II sogar ausgeschlossen.

Begründet werden kann dieser Sachverhalt zum einen damit, dass beide Konzepte die Erweiterung einer Bestandsanlage vorsehen und somit in der Wirtschaftlichkeitsprüfung gegen bestehende Erzeugungsanlagen ohne Anfangsinvestition zu konkurrieren ist. Hinzu kommt, dass der Mechanismus einer Amortisation über eine Erdgaseinsparung bei den derzeitigen Energiepreisen schwer darstellbar ist.

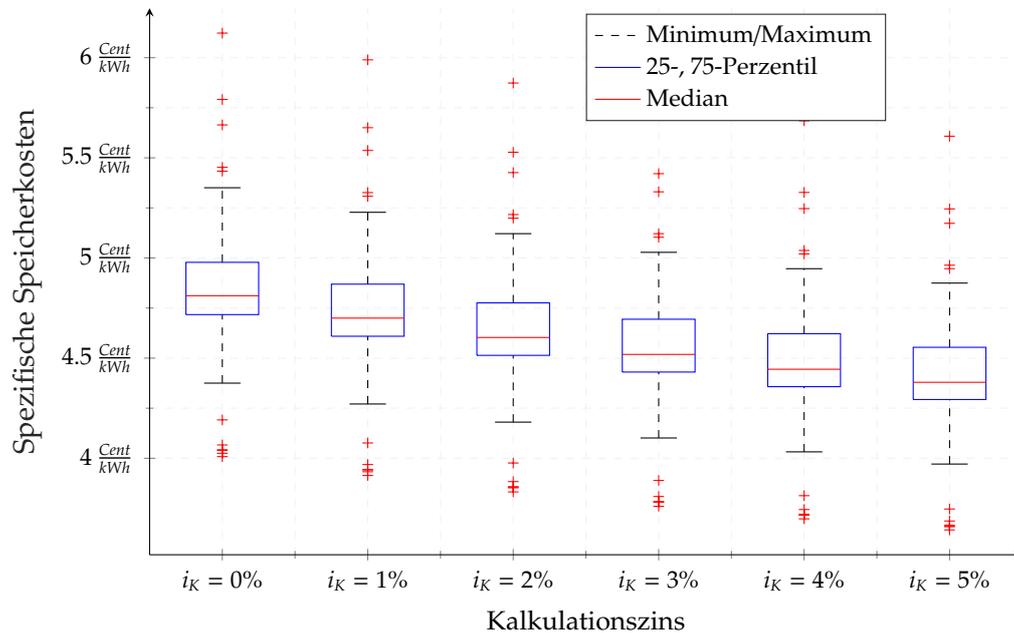
Betrachtet man die spezifischen Speicherkosten, zu denen eine Kilowattstunde Wärme gespeichert werden kann, zeigt sich, dass die Speicherkosten in beiden Konzepten in einer Größenordnung liegen, die eine wirtschaftliche Betriebsweise des Aquiferwärmespeichers an sich kaum zulässt (siehe Abbildung 6.3). Aufgrund der geringeren kapazitiven Ausnutzung des theoretisch vorhandenen Speichervermögens, sind die spezifischen Speicherkosten in Konzept I im Durchschnitt um etwa 44 % höher als in Konzept II. Aufgrund der sich stärker auswirkenden Diskontierung der Abflüsse sinken die spezifischen Speicherkosten mit zunehmendem Kalkulationszinssatz.

Die Höhe der spezifischen Speicherkosten muss jedoch relativiert vor dem Hintergrund verstanden werden, dass in der Berechnungsformel für die spezifischen Speicherkosten (siehe Gleichung 6.4) nur die Kosten für die Dienstleistung der Wärmespeicherung enthalten sind. Im Lüneburger Energieverbundsystem muss der Wärmespeicher prinzipiell als Einheit mit den flexibilisierten BHKWs gedacht werden, deren Laufzeitverlängerung einen erheblichen Beitrag zur finanziellen Kostendeckung leistet. Außerdem konnte in Simulationen nachgewiesen werden, dass die spezifischen Speicherkosten etwa halbiert werden können, wenn ein weiterer Verbraucher auf niedrigem Temperaturniveau angeschlossen würde.

Letztlich sind die relativ hohen Speicherkosten zum einen auf die geringe kapazitive Ausnutzung des Speichers zurückzuführen, zum anderen auf das begrenzte Vermögen des Niedertemperaturabnehmers zur Speicherrückkühlung. Dort besteht ein weitreichendes und von den Energiekosten unabhängiges Optimierungspotential der Speichereffizienz und generellen Systemeinbindung.



(a) Verteilung der spezifischen Speicherkosten des Konzeptes I (mit Aquifer) auf Basis von 50 Simulationen über 20 Jahre unter Verwendung der Referenzenergiekosten aus Tabelle 6.5



(b) Verteilung der spezifischen Speicherkosten des Konzeptes II (mit Aquifer und 2000 m<sup>2</sup> Flachkollektoren) auf Basis von 50 Simulationen über 20 Jahre unter Verwendung der Referenzenergiekosten aus Tabelle 6.5

**Abb. 6.3.:** Konzeptspezifische Verteilung der spezifischen Speicherkosten in Abhängigkeit des Kalkulationszinssatzes

### 6.4.2. Nachweis der Normalverteilung und Bestimmung der Verteilungsfunktion

Der Anderson-Darling Test gehört zur Gruppe der Tests auf Verteilungsanpassung (engl.: *goodness-of-fit statistics*), mit denen man überprüfen kann, ob Daten einer bestimmten Verteilung entsprechen. Das Prinzip der Anpassungstests beruht auf dem Vergleich zwischen einer empirischen Verteilungsfunktion einer Stichprobe  $F_n(X)$  und der hypothetisch angenommenen Verteilung  $F(X)$  [220]. Der Anderson-Darling-Test kann dazu verwendet werden, die Annahme einer Normalverteilung statistisch zu prüfen, wobei unter der Nullhypothese angenommen wird, dass die empirische Verteilungsfunktion einer Normalverteilung folgt. Ein statistisch signifikantes Ergebnis ( $p < .05$ ) bedeutet, dass die Nullhypothese ( $H_0$ : die Kapitalwerte sind normalverteilt) verworfen werden muss.

Die Vorgabe des Signifikanzniveaus  $\alpha$  bestimmt die statistische Wahrscheinlichkeit, mit welcher man die Nullhypothese fälschlicherweise zurückweist. Für ein Signifikanzniveau von  $\alpha = 5\%$  würde die Nullhypothese demnach in 5 von 100 durchgeführten Anderson-Darling-Tests zurückgewiesen werden, obwohl die Nullhypothese in Realität gilt. In Bezug auf die Kapitalwerte bedeutet das, dass bei einer hohen Anzahl an durchgeführten Tests, statistisch gesehen in 5% der Untersuchungen die Teststatistik zu dem Ergebnis kommt, dass die Kapitalwerte nicht normalverteilt sind, obwohl diese tatsächlich normalverteilt sind. Man legt mit dem Signifikanzniveau somit fest, mit welcher Wahrscheinlichkeit man den Fehler 1. Art begeht.

Für den Nachweis, dass die Kapitalwerte aus der Simulationsstudie normalverteilt sind, wird die Verteilung der Kapitalwerte  $F_{50}(X)$  mit der hypothetischen Normalverteilungsfunktion der Kapitalwerte  $F_X(x; \theta)$  verglichen.  $\theta$  ist ein Vektor, der mit zwei Parametern in die Verteilungsfunktion eingeht. Der Vektor  $\theta$  bestimmt die Normalverteilungsfunktion über den Mittelwert  $\mu$  und die Varianz  $\sigma^2$ .

Die Anderson-Darling Teststatistik zählt zur Statistik der quadratischen empirischen Verteilungsfunktion und wird über eine spezielle Gewichtungsfunktion berechnet, die in der Form

$$A_{n,1-\alpha}^2 = -n - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n 2i - 1 \cdot \left[ \ln(F(X_i)) + \ln(F(X_{n+1-i})) \right] \quad (6.6)$$

dargestellt werden kann [221]. Der Zustandsraum  $\{X_1 < \dots < X_n\}$  steht für die geordneten Kapitalwerte,  $n$  für die Anzahl der Kapitalwerte. Als Prüfgröße zur Entscheidungsfindung wird der Abstand der transformierten Stichprobendaten zur Verteilungsfunktion der hypothetischen Normalverteilung herangezogen. Die Nullhypothese wird verworfen, wenn die Teststatistik  $A_{n,1-\alpha}^2$  größer ist als der kritische Wert. Für die Berechnung des kritischen Wertes, müssen nach Stephens [222, 223] drei Fälle für die Parametrierung von  $\theta$  unterschieden werden:

1. Der Populationsmittelwert  $\mu$  ist unbekannt und wird über den Mittelwert der Stichprobe  $\bar{x}$  geschätzt, die Varianz  $\sigma^2$  hingegen ist bekannt
2. Der Populationsmittelwert  $\mu$  ist bekannt und die Varianz  $\sigma^2$  wird geschätzt über  $s^2 = \sum_i \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n}$
3. Beide Parameter sind unbekannt und müssen über den Stichprobenmittelwert  $\bar{x}$  und  $s^2 = \sum_i \frac{(x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}$  geschätzt werden

Die Kapitalwerte wurden über die Simulationsergebnisse geschätzt. Eine Aussage über die Verteilung der wahren (realen) Kapitalwerte kann nicht getroffen werden. Da der Populationsmittelwert und die Populationsstandardabweichung der Kapitalwerte nicht bekannt sind, müssen diese Parameter über die Stichprobe geschätzt werden (Fall 3). In diesem Fall muss die Teststatistik  $A_{n,1-\alpha}^2$  modifiziert werden zu  $A^* = A_{n,1-\alpha}^2 \cdot (1 + \frac{0,75}{n} + \frac{2,25}{n^2})$ . Der kritische Wert der theoretischen Prüfgröße  $A^*$  ist abhängig vom Signifikanzniveau und von der Stichprobengröße. Für ein Signifikanzniveau von  $\alpha = 5\%$  und einer Stichprobengröße von  $n = 50$  (Anzahl an durchgeführten Simulationsvarianten) liegt der kritische Wert der theoretischen Prüfgröße  $A^*$  bei 0,752. Die Verteilung der Kapitalwerte kann als normalverteilt angenommen werden, wenn gilt:

$$A^* < 0,752$$

Der Vergleich zwischen der kritischen und empirischen Prüfgröße korrespondiert mit dem  $p$ -Wert. Ist der  $p$ -Wert kleiner als 0,05, so muss die Nullhypothese verworfen werden. Ist der  $p$ -Wert größer als 0,05, so kann die Normalverteilung beibehalten werden. Die Berechnung des  $p$ -Wertes aus  $A^*$  ergibt sich über folgende Gleichungen [224]:

- für  $A^* > 0,6$ :  $p = e^{(1,2937 - 5,709 \cdot A^* + 0,0186 \cdot A^{*2})}$
- für  $0,34 < A^* \leq 0,6$ :  $p = e^{(0,9177 - 4,279 \cdot A^* - 1,38 \cdot A^{*2})}$
- für  $0,2 < A^* \leq 0,34$ :  $p = 1 - e^{(-8,318 + 42,796 \cdot A^* - 59,938 \cdot A^{*2})}$

■ für  $A^* \leq 0,2$ :  $p = 1 - e^{(-13,436+101,14 \cdot A^* - 223,73 \cdot A^{*2})}$

Der  $p$ -Wert beschreibt das Signifikanzniveau, unterhalb dessen das Testergebnis als signifikante Abweichung zu interpretieren ist. Beträgt der berechnete  $p$ -Wert weniger als 0,05, so liegt statistische Signifikanz zum Niveau  $\alpha = 5\%$  vor und die Nullhypothese ist zu verwerfen. Demgegenüber verbleibt bei einem  $p$ -Wert  $> .05$  die Unsicherheit, einen Fehler 2. Art ( $\beta$ -Fehler) zu begehen. Ein Fehler 2. Art wird begangen, wenn die Nullhypothese ( $H_0$ : Die Kapitalwerte sind normalverteilt) fälschlicherweise verifiziert wird, obwohl die Alternativhypothese ( $H_A$ : Die Kapitalwerte sind nicht normalverteilt) in Realität zutrifft. Die Wahrscheinlichkeit, einen Fehler 2. Art zu begehen kann über den Annahmebereich berechnet werden.

Aus der Simulationsstudie (Abschnitt 6.4.1) ergeben sich in Abhängigkeit des Konzeptes und in Abhängigkeit des angesetzten Kalkulationszinssatzes verschiedene Verteilungen der Kapitalwerte (Abbildung A.8a-f). Anhand der Prüfgrößen  $A^*$  und  $p$  ist der Nachweis der Normalverteilung der Kapitalwerte in Tabelle 6.8 erbracht. Bis auf die Stichprobe des Konzeptes I bei einem Kalkulationszins von  $i_K = 0\%$  können alle Kapitalwertverteilungen als normalverteilt angenommen werden.

**Tab. 6.8.:** Nachweis der Normalverteilung der Kapitalwerte für ein Signifikanzniveau von  $\alpha = 5\%$  in Abhängigkeit des Kalkulationszinssatzes

Konzept	Konzept I (mit Aquifer)		Konzept II (mit Aquifer+Solarthermie)	
$i_K$	$A^*$	$p$	$A^*$	$p$
0 %	0,754	0,050	0,666	0,082
1 %	0,747	0,051	0,604	0,116
2 %	0,736	0,055	0,611	0,112
3 %	0,730	0,057	0,624	0,104
4 %	0,723	0,059	0,574	0,137
5 %	0,705	0,066	0,670	0,080

Aus Tabelle 6.8 geht hervor, dass die Bedingungen für den Nachweis der Normalverteilung in nur einem Test nicht eingehalten werden (Kennzeichnung durch schwarze Box). In allen anderen Tests unterschreitet die Prüfgröße  $A^*$  den kritischen Wert bzw. überschreitet die Prüfgröße  $p$  das Signifikanzniveau. Werden mehrere Tests am gleichen

Datensatz durchgeführt, ist eine  $\alpha$ -Adjustierung zulässig. Dabei wird das Signifikanzniveau durch die Anzahl der durchgeführten Tests geteilt [225]. Die  $\alpha$ -Adjustierung trägt der Tatsache Rechnung, dass durch multiples Testen die Wahrscheinlichkeit erhöht wird, einen Fehler 1. Art zu begehen. In Tabelle 6.8 wurden 12 Tests am gleichen Datensatz durchgeführt. Ein Herabsetzen des Signifikanzniveaus auf  $\frac{0,05}{12} = 0,00417$  wäre zulässig. Eine  $\alpha$ -Adjustierung auf ein Signifikanzniveau von 0,417 % hätte zur Folge, dass in den Tests alle  $p$ -Werte das Signifikanzniveau deutlich überschreiten. Aus inferenzstatistischer Sicht ist die Annahme der Normalverteilung daher zulässig.

Weiterhin konnte beobachtet werden, dass die Normalverteilung insbesondere auch für Kalkulationszinssätze  $> 5\%$  nachgewiesen werden konnte. Es ist davon auszugehen, dass der Nachweis durch weitere Simulationsvarianten (Erhöhung von  $n$ ) noch eindeutiger ausfällt.

#### 6.4.2.1. Nachweis der verbesserten Prognosegenauigkeit durch Verteilungsfunktion

Da die 50 Kapitalwerte  $C_{0,1}, \dots, C_{0,50}$  für jeden Kalkulationszinssatz als normalverteilt angenommen werden können, kann für beide Konzepte in Abhängigkeit des Kalkulationszinssatzes eine spezifische Verteilungsfunktion abgeleitet werden. Die Verteilungsfunktion  $y_P$  wird über den Mittelwert  $\mu$  und die Standardabweichung  $\sigma$  bestimmt. Mit der Verteilungsfunktion kann bestimmt werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Kapitalwert (=Untersuchungspunkt) erreicht wird (siehe Gleichung 6.7).

$$y_P(x(i_K)) = \min \begin{pmatrix} C_{0,1(i_K)} \\ C_{0,2(i_K)} \\ \dots \\ C_{0,50(i_K)} \end{pmatrix} + \max \begin{pmatrix} C_{0,1(i_K)} \\ C_{0,2(i_K)} \\ \dots \\ C_{0,50(i_K)} \end{pmatrix} \cdot \exp \left( \frac{-(x(i_K) - \mu(i_K))^2}{2 \cdot \sigma(i_K)^2} \right) \quad (6.7)$$

mit  $x$  = Untersuchungspunkt

$i_K$  = Kalkulationszinssatz

$\mu$  = Mittelwert der Kapitalwerte

$\sigma$  = Standardabweichung der Kapitalwertverteilung

$y_P$  = berechnete Eintrittswahrscheinlichkeit des Kapitalwertes

Aus der spezifischen Normalverteilungsfunktion 6.7 kann der wahrscheinlichste Eintrittsfall über den Mittelwert abgelesen werden. Aus einer relativen Häufigkeit wird eine

Eintrittswahrscheinlichkeit.

Aus der Verteilungsfunktion kann die Eintrittswahrscheinlichkeit eines bestimmten Kapitalwertes berechnet werden. Hierfür wählt man für den Untersuchungspunkt  $x$  denjenigen Kapitalwert, der dem Kapitalwert entspricht, der unter Verwendung eines Standardlastprofils bei sonst gleichen Randbedingungen wie Energiepreise, Kalkulationszins und kalkulierter Nutzungsdauer, berechnet wurde. Als Ausgabe erhält man die berechnete Eintrittswahrscheinlichkeit des Kapitalwertes für den Untersuchungspunkt. Die Energiesystem- und Wirtschaftlichkeitsanalyse gewinnt somit eine 2. Dimension (siehe Abbildung 2.2).

Durch die Verteilungsfunktion konnte nachgewiesen werden, dass man unter Verwendung eines Standardlastprofils teilweise sehr unwahrscheinliche Szenarien prognostiziert. Die Eintrittswahrscheinlichkeit des prognostizierten Kapitalwertes lag in manchen Szenarien bei 2 %. Die wahrscheinlichsten Eintrittsfälle der prognostizierten Kapitalwerte unter Verwendung von wahrscheinlichkeitsbasierten Lastprofilen bewegen sich in einer Größenordnung von über 40 %. In diesen Fällen erhöht man die Prognosefähigkeit um den Faktor 20.

### 6.4.3. Aggregation und kritische Werte der Energiepreise

Über die Aggregation der Mittelwerte der Simulationsergebnisse wird das wahrscheinlichste Szenario bestimmt. Durch die Ergebnisverdichtung zu einem repräsentativen Szenario können die kritischen Energiepreiskonstellationen für den wahrscheinlichsten Eintrittsfall berechnet werden.

Die Methodik der Berechnung der kritischen Energiepreise geht von einem risikoneutralen Investor aus, welcher die kritischen Werte der Energiepreise für den wahrscheinlichsten Eintrittsfall betrachtet. Die kritischen Energiepreise sind definiert als diejenigen Energiepreiskonstellationen, die gerade noch eine wirtschaftliche Betriebsweise erlauben. Eine geringfügige Änderung eines Energiepreises würde zur Unwirtschaftlichkeit führen.

Basis der anschließenden Analyse der kritischen Energiepreise sind die Simulationsergebnisse aus den durchgeführten Simulationsläufen, die den wahrscheinlichsten Eintrittsfall in Abhängigkeit des Kalkulationszinssatzes definieren. Für jedes Jahr des Betrachtungszeitraumes kann aus der Mittelwertbildung der 50 Simulationsvarianten ein jährlicher

aggregierter Cashflow ( $CF_{a,agg}$ ) berechnet werden, indem die jährlichen aggregierten Zu- und Abflüsse bestimmt werden (siehe Gleichung 6.8).

$$\sum_{a=1}^{T_B} CF_{a,agg} = \overbrace{\text{Einspeisung} \cdot x_1 + \text{verm. Erdgasbezug} \cdot x_2}^{\text{Zufluss}_{a,agg}} - \underbrace{\text{Abfluss}_{a,agg}}_{\text{zus. Biogasverbrauch} \cdot x_3 + \text{WuI} + \text{Hilfsenergie} \cdot x_4} \quad (6.8)$$

mit

$x_1$  = Stromvergütung

$x_2$  = Erdgasbezugspreis

$x_3$  = Biogasbezugspreis

$x_4$  = Strombezugspreis

Der aggregierte Zufluss eines Jahres besteht aus den aggregierten Losgrößen der Einspeisung und des vermiedenen Erdgasbezuges, welche als Mittelwert der 50 Simulationsläufe des jeweiligen Simulationsjahres berechnet und mit den jeweiligen Preisen multipliziert werden.

Der aggregierte Abfluss eines Jahres besteht im Wesentlichen aus der aggregierten Losgröße des zusätzlichen Biogasverbrauches, die mit einem Biogasbezugspreis multipliziert wird.

Im Verhältnis zu den Kosten, die aus dem zusätzlichen Biogasverbrauch entstehen, fallen die Kosten für die Hilfsenergie und die Kosten für Wartung und Instandhaltung (WuI) mit < 5 % unwesentlich ins Gewicht der Berechnung des Abflusses. Zudem sind nur die Kosten der Hilfsenergie, die etwa ein Drittel der Kosten für Wartung und Instandhaltung betragen, variabel. Die Variabilität der Kosten wird verursacht durch unterschiedliche Förderleistungen der Tiefenpumpen, befindet sich insgesamt jedoch in einem relativ kleinen Schwankungsbereich. Des Weiteren hat der Strombezugspreis eine sehr kleine Hebelwirkung auf den jährlichen Abfluss. Eine Preissteigerung des Strombezugspreises um 30 % hätte eine finanzielle Änderung von weniger als 5 000 € im Jahr als Folge.

Aufgrund der geringen Hebelwirkung der Variabilität sowie der geringen Schwankungsbreite, werden die Kosten für die Hilfsenergie sowie Wartung und Instandhaltung zusammengefasst zu konzeptspezifischen Fixkosten. Diese betragen in Konzept I jährlich 37 200 €, in Konzept II sind sie aufgrund höherer Volumenströme und der zusätzlichen

Pumpe für den Solarkreislauf mit 42 500 € etwas höher. Aus der Festlegung der Fixkosten wird das Gleichungssystem um die Variable  $x_4$  bereinigt. Aus der Variablenreduktion folgt zudem, dass alle für die Berechnung des Cashflows notwendigen Losgrößen  $a, b, c$  feststehen und das folgende Gleichungssystem aufgestellt werden kann:

$$\begin{array}{c} \text{Cashflow} \\ \left( \begin{array}{c} CF_1 \\ CF_2 \\ \dots \\ CF_{20} \end{array} \right) \end{array} = \begin{array}{c} \text{Zufluss} \\ \left( \begin{array}{c} a_1 \cdot x_1 \\ a_2 \cdot x_1 \\ \dots \\ a_{20} \cdot x_1 \end{array} \right) \end{array} + \begin{array}{c} \left( \begin{array}{c} b_1 \cdot x_2 \\ b_2 \cdot x_2 \\ \dots \\ b_{20} \cdot x_2 \end{array} \right) \end{array} - \begin{array}{c} \text{Abfluss} \\ \left( \begin{array}{c} c_1 \cdot x_3 \\ c_2 \cdot x_3 \\ \dots \\ c_{20} \cdot x_3 \end{array} \right) \end{array} + \begin{array}{c} \left( \begin{array}{c} \text{Fixkosten} \\ \text{Fixkosten} \\ \dots \\ \text{Fixkosten} \end{array} \right) \end{array} \quad (6.9)$$

mit

$a$  = zusätzliche Stromeinspeisung gegenüber Referenz (jahresscharf aggregiert)

$b$  = vermiedener Erdgasbezug gegenüber Referenz (jahresscharf aggregiert)

$c$  = zusätzlicher Biogasverbrauch gegenüber Referenz (jahresscharf aggregiert)

Aus Gleichungssystem 6.9 können die jährlichen Cashflows in Abhängigkeit der gewählten Energiepreise  $x_1, x_2$  und  $x_3$  berechnet werden. Durch die Abzinsung der jährlichen Cashflows mit dem frei parametrierbaren Kalkulationszins  $i_K$  können die jährlichen, aggregierten Barwerte berechnet werden. In Addition mit der Investitionsausgabe  $I_0$  ergibt sich der konzeptspezifische Kapitalwert in Abhängigkeit des Kalkulationszinssatzes. Durch den Einbezug eines optionalen Förderanteils würde die Investitionsausgabe zum Bewertungsstichtag entsprechend gemindert werden.

Durch die Aggregation der Simulationsergebnisse kann eine wahrscheinlichkeitsbasierte Energiesystem- und Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt werden, aus der ein Investor den wahrscheinlichsten Kapitalwert erhält. Die Berechnungsmethode des Kapitalwertes erfolgt über das Gleichungssystem 6.9 und enthält die Freiheitsgrade *Energiepreise* ( $x_1 - x_3$ ), *Kalkulationszins* und *Förderanteil*.

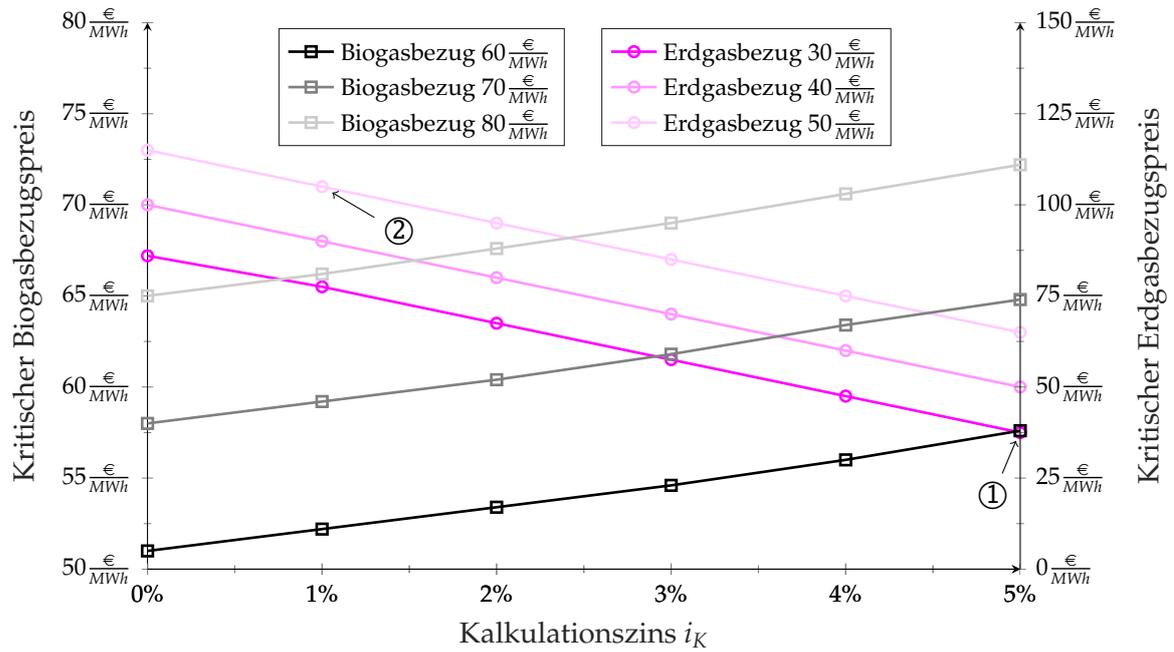
Über das aufgestellte Gleichungssystem 6.9 können beliebige Energiepreiskonstellationen mit beliebigen Förderanteilen untersucht werden. Da ein rationaler Investor die unwirtschaftlichen Konstellationen ausblenden würde, sind nachfolgend diejenigen Energiepreiskonstellationen (ohne Förderung) dargestellt, die eine wirtschaftliche Betriebsweise der Konzepte gerade noch zulassen. Aus den Energiepreiskonstellationen

lassen sich die Sensitivitäten des Gaspreises und der Einspeisevergütung gegenüber den Referenzenergiepreisen (siehe Tabelle 6.5) nachweisen.

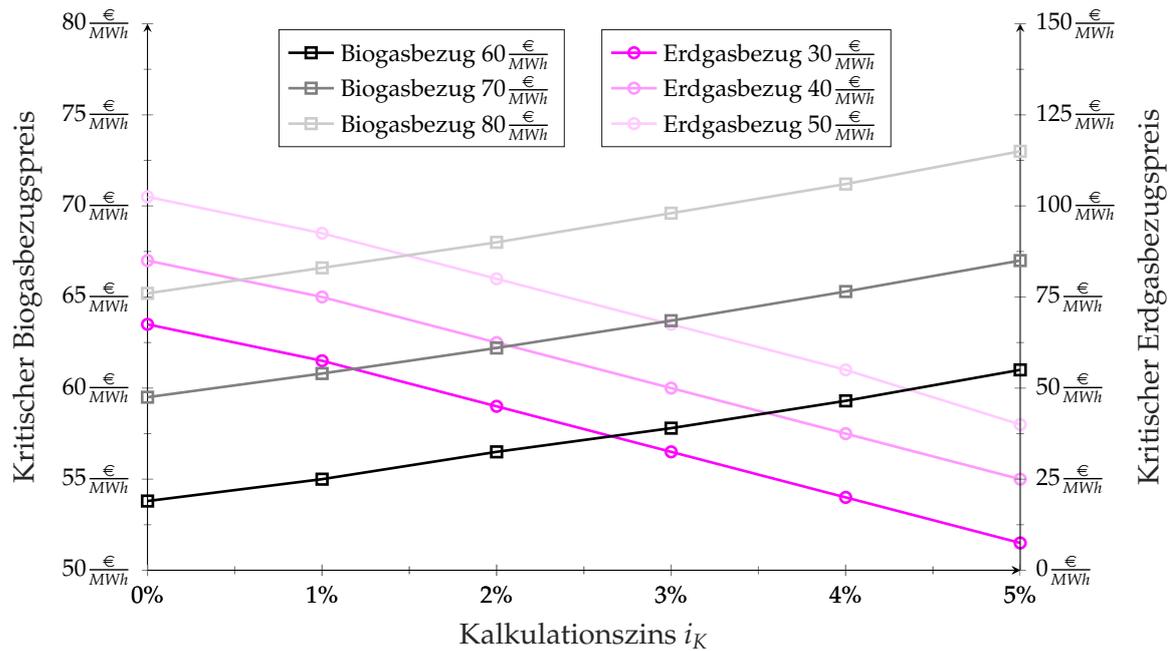
Die zwei untersuchten Konzepte können umso wirtschaftlicher betrieben werden, je niedriger der Biogasbezugspreis ist und je höher der vermiedene Erdgasbezugspreis bzw. die Einspeisevergütung sind. Für ein leichteres Verständnis der kritischen Energiepreiskonstellationen (Abbildung 6.4 und Abbildung 6.5) ist zunächst die Änderung gegenüber des jeweiligen Referenzenergiepreise hilfreich. Ändert sich beispielsweise der Biogasbezugspreis gegenüber der Referenz von  $70 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$  zu einem für die Wirtschaftlichkeit zuträglichen Bezugspreis, z.B. auf  $60 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$ , dann dürfte dementsprechend der korrespondierende Erdgasbezugspreis gegenüber dem Referenzpreis von  $40 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$  sinken. Bei einem Kalkulationszinssatz von  $i_K = 5\%$  wäre Konzept I gerade noch wirtschaftlich darstellbar, wenn das Erdgas für  $38 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$  bezogen würde (Kritische Energiepreiskonstellation dargestellt durch den Punkt 1 in Abbildung 6.4a).

Analog dazu kann die Änderung der Erdgasbezugspreise und die damit verbundenen kritischen Biogasbezugspreise untersucht werden. Geht man beispielsweise von einer für die Wirtschaftlichkeit zuträglichen Preissteigerung des Erdgases von  $40 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$  auf  $50 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$  aus, wäre eine wirtschaftliche Betriebsweise bei geringen Kalkulationszinsen möglich, wenn das Biogas gegenüber der Referenz teurer bezogen würde. Für den Fall, dass Erdgas zu einem Preis von  $50 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$  bezogen wird, wäre eine wirtschaftlicher Betrieb möglich, wenn bei einem Kalkulationszins von  $i_K = 1\%$  das Biogas im Einkauf maximal  $71 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$  kostet. Diese kritische Energiepreiskonstellation ist zusammengefasst in Untersuchungspunkt 2 in Abbildung 6.4a.

Für das Konzept II (siehe Abbildung 6.4b) gilt eine ähnliche Sensitivität der Gasbezugspreise auf die Wirtschaftlichkeit. Gegenüber Konzept I erhöht sich die Sensitivität des Erdgasbezugspreises und verringert sich die Sensitivität des Biogasbezugspreises. Graphisch zeigen sich eben dargestellte Tendenzen durch einen unterschiedlich weiten Versatz zwischen den Geraden. Die höhere Sensitivität des Erdgasbezugspreises erkennt man dadurch, dass die Geraden in rosa Farbtönen weiter auseinander liegen als in Konzept I. Das bedeutet, dass eine gleich große Änderung des Erdgasbezugspreises wie in Konzept I, einen größeren Spielraum für die Änderung des korrespondierenden Biogasbezugspreises erlaubt. Gegenläufig verhält sich die Sensitivität des Biogasbezugspreises. In Konzept II liegen die grauen Geraden bei gleich großer Änderung wie in Konzept I enger zusammen.



(a) Konzept I (mit Aquifer)



(b) Konzept II (mit Aquifer und Solarthermie)

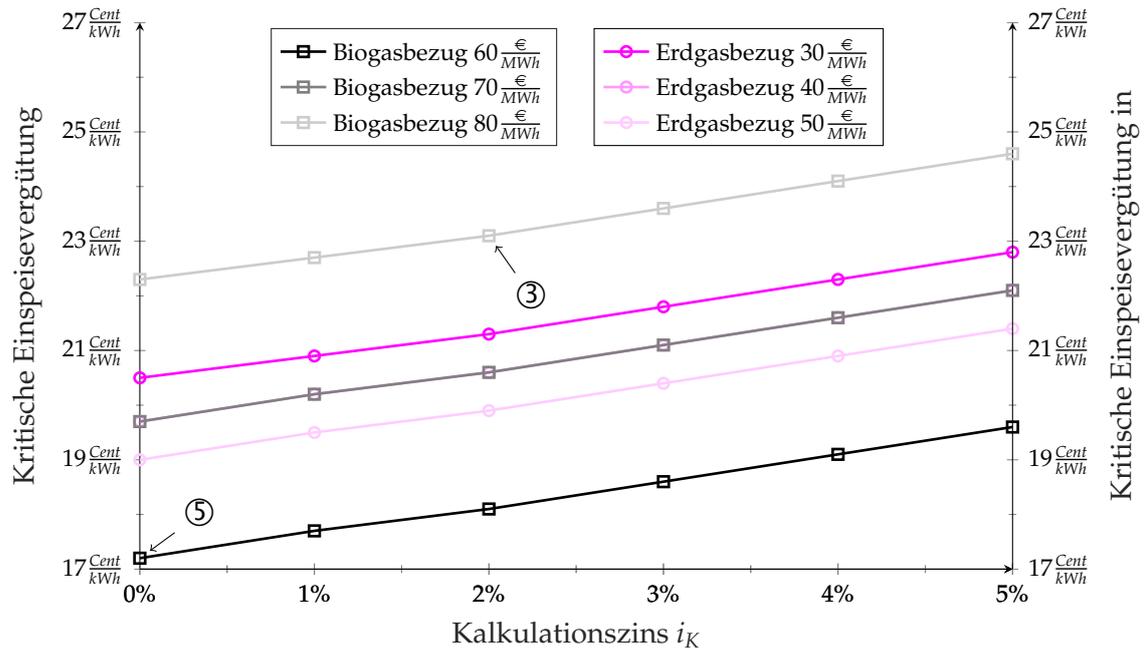
Abb. 6.4.: Konzeptspezifische Sensitivität der Gaspreise auf die Wirtschaftlichkeit

Die höhere Sensitivität des Erdgasbezugspreises in Konzept II erklärt sich dadurch, dass sich in diesem Konzept zusätzlich zu dem Aquiferwärmespeicher auch die Solarthermie über die Verdrängung des Erdgases rechnet. Da über die Solarthermie gegenüber dem Konzept I weiteres Erdgas eingespart wird, begünstigt ein höherer Erdgasbezugspreis die Wirtschaftlichkeit in größerem Maße. Ein günstigerer Erdgasbezugspreis beeinflusst die Wirtschaftlichkeit hingegen in stärkerem Maße negativ.

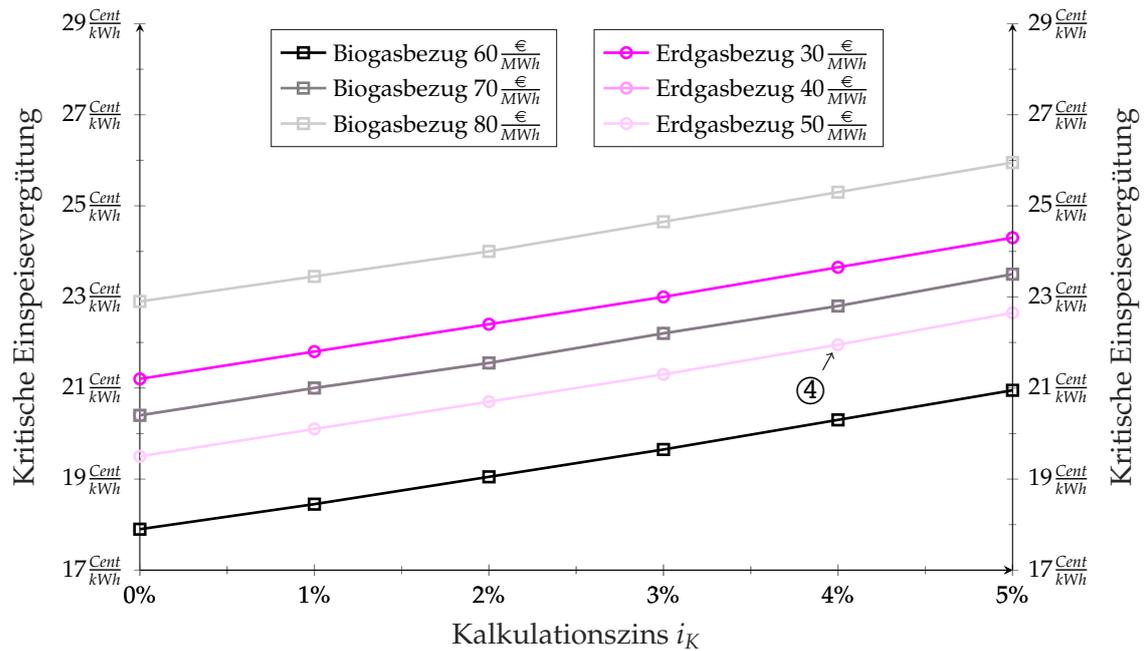
Neben den Gasbezugspreisen hängt die Wirtschaftlichkeit des Lüneburger Verbundsystems durch die Kraft-Wärme-Kopplung stark von der Vergütung des zusätzlich generierten Stroms ab. Um die Sensitivität der Einspeiservergütung zu untersuchen, wurde für verschiedene Gaspreiskonstellationen berechnet, wie hoch die konzeptspezifische Einspeiservergütung mindestens sein muss, um gerade noch einen positiven Kapitalwert zu erhalten. Für die Untersuchung wurde aus Darstellungsgründen die Änderung nur eines Bezugspreises vorgenommen, um den Einfluss auf die Einspeiservergütung in Abhängigkeit des Kalkulationszinssatzes zu ermitteln. Der andere Bezugspreis wurde gemäß seines Referenzwertes aus Tabelle 6.5 festgehalten.

Für die Analyse, welchen Einfluss ein Preisanstieg des Biogasbezuges von  $70 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$  auf  $80 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$  auf die notwendige Einspeiservergütung ausübt, wurde der Erdgasbezugspreis zu dem Referenzwert von  $40 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$  festgesetzt. Bei einem Kalkulationszinssatz von 2% müsste der zusätzlich generierte Strom aus den BHKWs mindestens mit  $23,1 \frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$  vergütet werden, damit sich ein positiver Kapitalwert für das wahrscheinlichste Eintrittsszenario des Konzeptes I ergibt. Diese Energiepreiskonstellation ist vertreten durch den Untersuchungspunkt 3 in Abbildung 6.5a.

Geht man gegenüber der Referenzbetrachtung von  $40 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$  strategisch von einem Preisanstieg des Erdgasbezugspreises auf  $50 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$  aus, so ergäbe sich für das wahrscheinlichste Eintrittsszenario des Konzeptes II eine kritische Einspeiservergütung von  $21,95 \frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$ , wenn ein interner Zinsfuß von 4% für das Investitionsvorhaben gefordert werden würde. Entsprechend ginge man bei dieser Kalkulation von dem Referenzenergiepreis für den Biogasbezug von  $70 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$  aus (Punkt 4 in Abbildung 6.5b).



(a) Konzept I (mit Aquifer)



(b) Konzept II (mit Aquifer und Solarthermie)

Abb. 6.5.: Konzeptspezifische Sensitivität der Einspeisevergütung auf die Wirtschaftlichkeit

Die Größenordnung der für die Wirtschaftlichkeit notwendigen Einspeisevergütung aus Abbildung 6.5 legt offen, dass eine Direktvermarktung des Stromes an einer Energiebörse ausscheidet. Der Börsenstrompreis am EPEX-Spotmarkt betrug im Zeitraum von November 2016 bis November 2017 maximal  $5,24 \frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$  [226] und liegt damit weit unter der minimal notwendigen Einspeisevergütung von  $17,2 \frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$  für die Energiepreiskonstellation des Analysepunktes 5 (in Abbildung 6.5a für das wahrscheinlichste Eintrittszenario von Konzept I bei einem Kalkulationszinssatz von 0%).

Welcher Absatzweg nach dem Ausscheiden der BHKWs aus der EEG-Vergütung sinnvoll ist, hängt von der Entwicklung politischer Randbedingungen/Anreizsysteme sowie von technologischen Entwicklungspfaden wie z.B. Batteriespeichersystemen zur Eigenbedarfsoptimierung ab.

### **6.5. Forschungsergebnisse aus energetischer und finanzieller Perspektive**

HT-ATES-Systeme sind thermisch sehr träge. Im Zusammenspiel mit der obertägigen Erzeuger- und Abnehmerstruktur eines Energiesystems können bis zu 20 Jahre vergehen, bis der Aquiferwärmespeicher einem quasistationären Verhalten folgt.

Solange sich das Gesamtsystem in dieser Einschwingphase befindet, nehmen jährlich variierende Lastfalländerungen durch sich ändernde Ein- und Ausspeichercharakteristika großen Einfluss auf das Temperatur- und Effizienzverhalten des Aquifers (siehe Abbildung 5.12 und Abbildung 5.13). Lastfalländerungen über mehrere Jahre hinweg werden durch Standardlastprofile oder messdatenbasierte Lastprofile nicht berücksichtigt, wenn sie, zu einem repräsentativen Lastprofil bereinigt, das langjährige Mittel eines Lastfalls abbilden. Zusätzlich werden diese Lastprofile im Regelfall in jährlicher Wiederholung eingelesen. Damit wird ein jährlich gleichbleibender Lastfall angesetzt.

Durch Simulationsstudien konnte nachgewiesen werden, dass die Berechnung von energetischen und wirtschaftlichen Erwartungswerten zu großen Fehlern führen kann, wenn man jährlich gleichbleibende Lastfälle ansetzt. Anhand des Kapitalwertes konnten im Mittel finanzielle Abweichungen zwischen Standardlastprofilen und Lastprofilen über den Monte-Carlo-Ansatz von deutlich über 500 000 € nachgewiesen werden. Vergleicht man *best-case-Szenarien* der Simulationsstudie mit den Kapitalwerten, die über Standard-

lastprofile simuliert wurden, können Abweichungen von bis zu 1 000 000 € entstehen. Das entspricht etwa 50% des Investitionsvolumens für den Aquifer und seine Einbindung.

Für die Berechnung der wirtschaftlichen und energetischen Prognosewerte wurde die Wirtschaftlichkeitsberechnung direkt in das Simulationsmodell integriert. Daraus entstand ein holistisches Modell, welches durch eine parallele Vergleichsbilanzierung zwischen Referenzsystem und Untersuchungskonzept sowohl energetische (Wärmebedarf der Verbraucher, Erzeugeranteile, Speichereffizienz, Beitrag der Solarthermie), finanzielle (Kapitalwert, spezifische Speicherkosten, Wärmegestehungskosten) als auch ökologische Auswertungsgrößen (Primärenergiefaktor, CO<sub>2</sub>-Emissionsbilanz) monats- scharf bzw. jahresscharf berechnet. Entgegen dem üblichen Vorgehen, die energetischen Losgrößen bzw. Mengenteile in einer vorgelagerten Simulationssoftware zu bestimmen und die (gemittelten) Simulationsergebnisse wirtschaftlich zu bewerten, berechnet das entwickelte Modell für jeden Simulationsschritt alle für die Wirtschaftlichkeitsbewertung notwendigen Größen. In Form von jährlichen Zahlungsströmen wird die Wirtschaftlichkeit nach Beendigung der Simulation direkt ausgegeben (Anhang A.6). Da die Parametrierung der wirtschaftlichen Randbedingungen direkt in TRNSYS erfolgt, können finanzielle und energetische Interdependenzen in **einer** Simulation untersucht werden (siehe Abbildung 6.1).

Durch das Einlesen der wahrscheinlichkeitsbasierten Lastprofile aus Matlab wird das energetische Verhalten des Gesamtsystems über 20 Jahre hinweg simuliert. Da jede Temperaturreihe einzigartig ist, resultieren aus jeder Simulation unterschiedliche Zahlungsströme. Aus 50 Langzeitsimulationen konnte durch die Abbildung von 50 verschiedenen Szenarien eine konzeptspezifische Häufigkeitsverteilung der Kapitalwerte berechnet werden (Abbildung 6.2 bzw. Abbildung A.8). Mit den Referenzenergiekosten aus Tabelle 6.5 wäre die Wirtschaftlichkeit des Aquifers im Lüneburger Verbundsystem stark gefährdet (Konzept I) und in Zusammenhang mit der Solarthermie (Konzept II) ab Renditeerwartungen von 1% ausgeschlossen.

Aus dem Nachweis der Normalverteilung der Kapitalwerte ließ sich eine Verteilungsfunktion ableiten, mit der die Eintrittswahrscheinlichkeit von Szenarien bestimmt werden kann. Das Maximum der Verteilungsfunktion entspricht dabei dem wahrscheinlichsten Eintrittsfall. Für bestimmte Kalkulationszinssätze lag die Eintrittswahrscheinlichkeit von Szenarien, die mit einem Standardlastprofil berechnet wurden, bei etwa 2%. Maxi-

male Eintrittswahrscheinlichkeiten von Szenarien, die über den Monte-Carlo-Ansatz aus Matlab berechnet wurden, liegen bei über 40%. Über die Möglichkeit der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Szenarien gewinnt die Energiesystem- und Wirtschaftlichkeitsanalyse eine weitere Dimension. Zum einen lag die prognostizierte Eintrittswahrscheinlichkeit für bestimmte Kalkulationszinssätze um den Faktor 20 höher, zum anderen können Investitionsentscheidungen über die Eintrittswahrscheinlichkeit mit dem individuellen Risiko beaufschlagt werden, das der Investor bereit ist einzugehen. Ein risikoaverser Investor könnte beispielsweise vorgeben, dass ein Kapitalwert mit einer Wahrscheinlichkeit von 90% erreicht werden muss. Diese Vorgabe kann, vorausgesetzt die Randbedingungen lassen es zu, durch die in dieser Arbeit entwickelte Methode berücksichtigt werden. Aus einer Punktanalyse, die die Frage der Wirtschaftlichkeit mit ja oder nein beantwortet, wird eine Matrixanalyse, die nach Festlegung der Freiheitsgrade (Energiepreise, Kalkulationszinssatz und Förderanteil) die Frage zusätzlich mit jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeiten beantwortet.

Über die Matrixanalyse können nach Aggregation der Simulationsergebnisse diejenigen kritischen Preiskonstellationen bestimmt werden, die eine wirtschaftliche Betriebsweise gerade noch erlauben (vgl. Abbildung 6.4 und Abbildung 6.5). Im Großen und Ganzen beeinflussen die Erdgasbezugspreise die Wirtschaftlichkeit in geringerem Ausmaß wie die Biogasbezugskosten bzw. die Einspeisevergütung. Letztere muss in einer Größenordnung liegen, die eine Direktvermarktung an der Energiebörse zur Zeit ausschließt.

Des Weiteren zeigte sich für das Konzept ohne Solarthermie eine geringere Sensitivität des Erdgasbezugspreises als für das Konzept mit der Solarthermie. Für Renditeerwartungen  $> 2\%$  ist, aufgrund der hohen globalen Gasvorkommen, mittelfristig nicht mit einer Änderung des Erdgaspreises zu rechnen, die das Lüneburger Fallbeispiel für Renditeerwartungen jenseits der  $3\%$  in eine wirtschaftliche Betriebsweise ohne Förderung versetzen könnte.

Die Gefahr der Unwirtschaftlichkeit entsteht nicht durch die Technologie an sich, sondern ist mehreren Faktoren des Standortes Lüneburg geschuldet. Im Wesentlichen ist eine wirtschaftliche Betriebsweise derzeit beschnitten durch

- das Abnehmersystem (*Der Speicher ist zu groß für das Wärmenetz*),
- eine beschränkte Rückkühlung (*Ein weiterer Abnehmer auf niedrigem Temperaturniveau ist notwendig*) und
- die derzeitigen Gaspreise (*Mechanismus über die Erdgaseinsparung lohnt sich nicht*).

Demgegenüber existieren eine Reihe von ökologischen Potentialen und Chancen für die Zukunft, die gegenwärtig (noch) nicht monetär bewertet werden. Niedrige Primärenergiefaktoren können eine zunehmende Bedeutung in der Vermarktungsstrategie von Wärmenetzbetreibern einnehmen, da sie den an das Wärmenetz angeschlossenen Gebäuden die Erfüllung von gesetzlichen Vorgaben erleichtert. Ein sehr niedriger Primärenergiefaktor kann die Anforderungen an die Gebäudehülle verringern und Fördermöglichkeiten (z.B. Erfüllung eines KfW-Standards) eröffnen oder erleichtern.

Durch die Integration eines saisonalen Aquiferwärmespeichers konnte der Anteil der erneuerbaren Wärme auf über 95 % erhöht werden. Die Emissionsbilanz für das Energieverbundsystem wäre in beiden Konzepten deutlich negativ und würde insgesamt zu einer klimaneutralen Universität führen, selbst unter Einbezug der indirekten Emissionen aus Pendelverkehr und Dienstreisen [30].

ATES-Systeme bieten durch die Integration erneuerbarer Wärmeerzeuger die Möglichkeit von negativen Emissionsbilanzen. Geht man von einem zukünftigen, globalen Emissionshandel mit steigenden Zertifikatspreisen für die Emission von Treibhausgasen aus, könnten sich zukünftige ATES-Systeme zusätzlich über die Emissionseinsparung rechnen.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Zielsetzung dieser Arbeit war die Analyse von Standortfaktoren für die erfolgreiche Planung und Betriebsweise eines HT-Aquiferwärmespeichers in Deutschland. Der Fokus lag dabei auf einer verbesserten, realitätsnahen Betrachtung einer sich wechselseitig beeinflussenden Energiesystem- und Wirtschaftlichkeitsanalyse. In einer ganzheitlichen Planung reicht es nicht aus, den Speicher und das Wärmenetz aus einer rein ingenieurstechnischen Sichtweise aufeinander abzustimmen. Gerade im frühen Projektstadium müssen viele Planungsaspekte geleistet werden, die eine trans- und interdisziplinäre Zusammenarbeit erfordern. Nicht zuletzt wegen der relativ hohen Kosten vor der eigentlichen Speichererrichtung, z.B. für eine Untergrundanalyse, Machbarkeitsstudie oder für Pumpversuche, ist eine möglichst genaue Vorhersage des zu erwartenden Verhaltens des Gesamtsystems wichtig. Die Verlässlichkeit der Vorhersage wird bestimmt durch Art und Güte des Simulationsmodells. Durch den Einbezug statistischer Komponenten in der Modellierung des Gesamtsystems konnten erhebliche Verbesserungen in der Prognosefähigkeit und in der Prognosegenauigkeit erzielt werden. Die berechnete Eintrittswahrscheinlichkeit des repräsentativen Szenarios mit statistischer Komponente war bis zu 20 Mal höher als die Eintrittswahrscheinlichkeit von Szenarien mit Standardlastprofilen ohne statistischer Komponente.

Eingangs wurde untersucht, wie zukünftige Entwicklungen von netzgebundenen Wärmesystemen aussehen können und welche Technologien grundsätzlich für die Flexibilisierung von Wärmesystemen durch die saisonale Wärmespeicherung bereitstehen. Durch die saisonale Lastverschiebung können erneuerbare Wärmequellen in größerem Maße integriert und an bestimmte Wärmeabnahmestrukturen zeitlich angepasst werden. Als günstigster saisonaler Wärmespeicher mit mittleren Speicherdichten von  $30 - 40 \frac{kWh}{m_{we}^3}$  sind Aquiferwärmespeicher grundsätzlich dazu geeignet, große Mengen an Wärmeenergie im Untergrund zu speichern, ohne die vorhandene oberirdische Flächennutzungskonkurrenz zu verschärfen.

Für die erfolgreiche Umsetzung und Inbetriebnahme eines Aquiferwärmespeichers sind eine Reihe an mehrdimensionalen Planungsaspekten zu berücksichtigen. Eine geologische Formation vorausgesetzt, die einen Speicherhorizont mit geeigneten geohydraulischen Eigenschaften beinhaltet, müssen sowohl das unterirdische als auch das oberirdische System aufeinander abgestimmt werden. Aufgrund von landesspezifischen Genehmigungsbehörden gibt es keine einheitliche, bundesweite Regelung des Genehmigungsvollzugs. Inwiefern der Klimaschutz und der Grundwasserschutz gegeneinander abgewägt werden, hängt somit von den Genehmigungsbehörden ab. Hier bedarf es dringend eines rechtlichen Rahmens, z.B. über konkrete Schwellenwerte, um zu Investitions- und Rechtssicherheit für derartige Untergrundspeicher zu gelangen.

Zur erfolgreichen Identifikation und Bearbeitung von wesentlichen Planungsaspekten sind geeignete Simulationswerkzeuge wichtig. Anhand einer detaillierten Simulationsumgebung in TRNSYS, wurde eine Untersuchung des thermischen Verhaltens des Gesamtsystems in zeitlich hoher Auflösung ermöglicht. Innerhalb der Simulationsumgebung werden alle Systemkomponenten, deren Regelung und Steuerung sowie die Topologie der Hydraulik berücksichtigt. Durch die Entwicklung einer effizienten Regelungsstrategie und einer entsprechenden Parametrierung kann das Verhalten von Energiesystemen realitätsnah abgebildet werden. Im Allgemeinen gibt es regelungstechnische, anlagentechnische und exogene Einflussgrößen (z.B. lokale Wettereinflüsse und Bedarfsschwankungen) auf die Speichereffizienz des Aquifers.

Letztere finden in Zusammenhang mit der Energiesystem- und Wirtschaftlichkeitsanalyse von ATEs-Systemen im Regelfall keine Berücksichtigung, obwohl sie nachgewiesenermaßen einen großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit und die Speichereffizienz nehmen. Aus diesem Grund wurde in Matlab ein wahrscheinlichkeitsbasierter Lastprofilgenerator programmiert, über den standortspezifische Lastprofile aus einer Monte-Carlo-Temperaturreihe geschätzt werden können. Die Funktionalität der Temperaturschätzung mittels MCMC-Verfahren wurde sowohl über eine quantitative als auch eine qualitative Validierung nachgewiesen. Ein wesentlicher Vorzug des Monte-Carlo-Ansatzes ist die statistische Komponente in der Berechnung. Die Schätzung der Temperatur eines jeden Reihengliedes basiert auf tatsächlich gemessenen Temperaturübergängen, die über eine gleichmäßig verteilte Wahrscheinlichkeit aus einer normierten Markov-Matrix zugeordnet wird. Letztlich ergibt sich eine unikate Temperaturreihe, die zwar dem langjährigen Mittel der Messdatengrundlage des Standortes sehr nahe kommt, aber

im jährlichen Verlauf zum Teil deutlich variiert. Die monatliche Abweichung der geschätzten Temperaturen übersteigt im jährlichen Verlauf jedoch nicht die statistische Standardabweichung der gemessenen, monatlichen Temperaturen des Standortes. Aus der synthetisch erstellten Temperaturreihe kann über zwei verschiedene Berechnungsverfahren ein Lastdatensatz mit Wärmeleistung, Vor- und Rücklauftemperatur sowie Massenstrom erstellt werden, der dann von TRNSYS eingelesen und für die Langzeitanalyse des Systems verwendet wird. Somit wird der exogene Wettereinfluss durch die wahrscheinlichkeitsbasierten, hochaufgelösten Lastprofile (10 Minuten) berücksichtigt. Durch unterschiedliche Aneinanderreihungen von jährlichen Wärmebedarfsfällen wird der Einfluss des Wetters auf ATES-Systeme sichtbar.

Ein weiterer Mehrwert von wahrscheinlichkeitsbasierten Lastprofilen ist die Berücksichtigung von Eintrittswahrscheinlichkeiten, indem man multiple Langzeitsimulationen durchführt. Da diese Arbeit im Fokus der Analyse von energetischen und finanziellen Interdependenzen auf Gesamtsystemebene steht, wird die Simulationsumgebung erweitert um die wirtschaftliche Dimension. Alle für die Wirtschaftlichkeitsbewertung notwendigen Größen werden in jedem Simulationszeitschritt direkt in TRNSYS berechnet. TRNSYS berechnet in einem ganzheitlichen Modell sowohl Energie- als auch Zahlungsströme.

In einer wahrscheinlichkeitsbasierten Energiesystem- und Wirtschaftlichkeitsanalyse wurde untersucht, bei welchen Energiepreiskonstellationen und Kalkulationszinssätzen ein HT-Aquiferwärmespeicher wirtschaftlich in das bestehende Energieverbundsystem in Lüneburg integriert und betrieben werden könnte. Bei großer Sensitivität der Gasbezugpreise sowie der Einspeisevergütung gibt es realistische Preiskonstellationen, die eine wirtschaftliche Betriebsweise ermöglichen, sofern keine hohen Renditeerwartungen an das Investitionsvorhaben gestellt werden. Für das Konzept, das neben dem Aquifer noch eine 2000 m<sup>2</sup> Solarthermieanlage vorsieht, ist ein wirtschaftlicher Betrieb auch ohne Renditeerwartungen unwahrscheinlich, da die spezifischen Kosten der Solarthermieanlage zu hoch sind und systembedingt nicht über größere Kollektorflächen gesenkt werden können.

Grundsätzlich lässt sich aus der fallspezifischen Energiesystem- und Wirtschaftlichkeitsanalyse ableiten, dass HT-Aquiferwärmespeicher ein sehr großes Potential haben, große Mengen an (erneuerbarer) Wärmeenergie in Form von Solarthermie, ungenutzter

Abwärme oder Geothermie, zwischenzuspeichern. Der Wärmerückgewinnungsgrad hängt stark von der maximalen Einspeichertemperatur, der minimalen Rückkühltemperatur aus dem Netz und von der natürlichen Hintergrundtemperatur des Aquifers ab. In der HT-Anwendung ist die Speichereffizienz umso höher, je höher die Differenz zwischen der Einspeichertemperatur und der Rückkühltemperatur ist. Idealerweise kann der Aquifer während der Entladung auf seine natürliche Umgebungstemperatur rückgekühlt werden.

Weiterhin sind Aquiferwärmespeicher in ihrer Größe nach oben skalierbar, z.B. durch höhere Volumenströme oder mehrere Brunnenpaare. Die geohydraulischen Randbedingungen, wie Mindestmächtigkeit oder geeignete Oberflächen- zu Volumenverhältnisse, ergeben im Regelfall sehr große Volumina, die große Losgrößen in der Abnehmerstruktur voraussetzen. In anderen Worten kann der Aquifer in seiner Kapazität zwar nach oben skaliert werden, jedoch nicht unter eine gewisse Mindestkapazität. Die Erfordernis einer Mindestlosgröße des Abnehmersystems führt zu der Erkenntnis, dass HT-Aquiferwärmespeicher eher für große Quartiere/Ballungszentren/Industrieparks geeignet sind, die große Mindestabnahmemengen von mehreren Gigawattstunden im Jahr vorhalten. Hinzu kommt, dass das Investitionsprofil für größere Speichersysteme tendenziell günstiger wird. Der Großteil des Investitionsvolumens wird durch die Bohrungen und den Anlagenbau verursacht. Diese sind für größere Speichersysteme durch beispielsweise größere Bohrlochdurchmesser im Verhältnis zur Kapazitätserhöhung unwesentlich höher. Die Betriebskosten von HT-Aquifersystemen bestehen hauptsächlich aus den Kosten für den Betrieb der Tiefenpumpen. In Bezug auf die Langlebigkeit und Höhe der Kosten für die Pumpen gibt es Verbesserungspotential. Pumpen, die Temperaturen von über 60 Grad standhalten müssen, können Kosten im sechsstelligen Bereich verursachen.

Was die Wirtschaftlichkeit von HT-Aquiferwärmespeichern angeht, ist eine Pauschalierung unzweckmäßig. Im Gesamtsystem betrachtet, ist der Speicher ein Baustein zwischen Quellen und Senken und kann daher in vielen denkbaren Konfigurationen auftreten. Die Wirtschaftlichkeit hängt nicht nur von den energetischen Randbedingungen innerhalb des Systems ab, sondern auch von dem Mechanismus, über den sich der Speicher rechnet.

Geht man von einem strombasierten Energiesystem der Zukunft mit zeitweiligen Stromüberschüssen aus, kann der Aquiferwärmespeicher in der power-to-heat-Anwendung

zusätzlich als indirekter Stromspeicher verstanden werden. Soll eine vollständige Dekarbonisierung des deutschen Energiesystems erreicht werden, wird die Sektorkopplung zwischen dem Strom- und Wärmemarkt in ihrer Bedeutung zunehmen müssen, um die schwankende Residuallast des elektrischen Netzes über den Wärmesektor ausgleichen zu können. Bei der Erstellung von Konzepten müssen Wärme- und Stromeinsatz gemeinsam gedacht werden. Über die saisonale Speicherung von Wärme können sowohl die Effizienz als auch der erneuerbare Anteil auf Systemebene deutlich erhöht werden. Insbesondere als Bestandteil von nachhaltigen Versorgungskonzepten für Städte und innerstädtische Großflächen kann durch die saisonale Wärmespeicherung eine große Hebelwirkung für den Klimaschutz erzielt werden, ohne die obertägige Flächennutzungskonkurrenz zu verschärfen. Deutschlandweit leben etwa 75% der Menschen in Städten, global sind es etwa 60%.

# Literaturverzeichnis

- [1] Henrik Lund, Sven Werner, Robin Wiltshire, Svend Svendsen, Jan Eric Thorsen, Frede Hvelplund, and Brian Vad Mathiesen. 4th Generation District Heating (4GDH). *Energy*, 68:1–11, 2014. ISSN 03605442. doi: 10.1016/j.energy.2014.02.089.
- [2] Andrew Lake, Behanz Rezaie, and Steven Beyerlein. Review of district heating and cooling systems for a sustainable future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67:417–425, 2017. ISSN 13640321. doi: 10.1016/j.rser.2016.09.061.
- [3] Sven Werner. International review of district heating and cooling. *Energy*, 2017. ISSN 03605442. doi: 10.1016/j.energy.2017.04.045.
- [4] Svend Frederiksen and Sven Werner. *District heating and cooling*. Studentlitteratur, Lund, 2013. ISBN 978-9144085302.
- [5] Jörg Kuder, Franz Binot, Wiete Hübner, Judith Orilski, Thomas Wonik, and Rüdiger Schulz. Für die Geothermie wichtige hydraulische Parameter von Gesteinen des Valangin und der Bückeberg-Formation (Wealden) in Nordwestdeutschland  
<BR>Hydraulic parameters of North-West German rocks of the Valanginian and Bückeberg Formation (Wealden) relevant for geothermal utilization. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 165(3):455–467, 2014. ISSN 18601804. doi: 10.1127/1860-1804/2014/0077.
- [6] Ali Saadat, Stephanie Frick, Stefan Kranz, and Simona Regenspurg. Energetic Use of EGS Reservoirs. In Ernst Huenges, editor, *Geothermal energy systems*, pages 303–372. Wiley-VCH, Weinheim, 2010. ISBN 978-3-527-40831-3.
- [7] Johann Goldbrunner. Hydrothermale Nutzung. In Mathias Bauer, Willi Freeden, Hans Jacobi, and Thomas Neu, editors, *Handbuch Tiefe Geothermie*, pages 223–244. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2014. ISBN 978-3-642-54510-8.

- [8] Lars Holstenkamp, Julian Justus Lauer, Philipp Neidig, Oliver Opel, Jens Steffahn, Nikolai Strodel, Maud Vogel, Heinrich Degenhart, Dieter Michalzik, Thomas Schomerus, Jörg Schönebeck, and Thor Növig. Querschnittsstudie Erfolgsfaktoren für mitteltiefe Aquiferwärmespeicher in Norddeutschland. In Bundesverband Geothermie e.V., editor, *Der Geothermiekongress 2016*, 2017.
- [9] Markus Wolfgramm, Gerhard Lenz, Jörn Bartels, Susanne Diaz, Frank Hoffmann, Stephan Mertens, and Bärbel Kabus. Machbarkeitsstudie zur Bewertung der Möglichkeit der Speicherung von Abwärme einer Kraft-Wärme-Kopplung im Erdboden im Rahmen der klimaneutralen Campusentwicklung der Universität Lüneburg.
- [10] Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V., editor. *Fachseminar Oberflächennahe Geothermie*, 2005.
- [11] Gene Culver and Kevin Rafferty. Chapter 9 - Well Pumps. In Geo-Heat-Center, editor, *Geothermal direct Use Engineering and Design Guidebook*, pages 211–239. Klamath Falls, Oregon, 1998.
- [12] A. Snijders. Lessons from 100 ATEs projects - the development of aquifer storage in Netherlands. In University of Stuttgart, editor, *Proceedings: International Conference on Thermal Energy Storage for Efficiency and Sustainability*, pages 147–152, 2000.
- [13] Verein Deutscher Ingenieure. VDI 2067 - Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen, .
- [14] Europäische Kommission. Eurostat (2017) - Gas prices for non-household consumers - bi-annual data (from 2007 onwards). URL <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>.
- [15] Bundesnetzagentur | Bundeskartellamt. Monitoringbericht 2016.
- [16] Bundesnetzagentur - Referat Zugang zu Gasverteilernetzen, technische Grundsatzzfragen, Versorgungsqualität. Biogas-Monitoringbericht 2014.
- [17] Deutsche Energie-Agentur GmbH. Branchenkompass: Biomethan in KWK.
- [18] DIHK - Deutscher Industrie- und Handelskammertag Berlin | Brüssel. Faktenpapier Strompreise in Deutschland 2017.

- [19] Fraunhofer-ISI, ECOFYS, GWS. Stromkosten der energieintensiven Industrie - Ein internationaler Vergleich.
- [20] Statistisches Bundesamt - Destatis. Daten zur Energiepreisentwicklung - Lange Reihen von Januar 2000 bis Juli 2017.
- [21] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat): Stand: Dezember 2017.
- [22] Jochem Unger and Antonio Hurtado. *Alternative Energietechnik*. SpringerLink : Bücher. Springer Vieweg, Wiesbaden, 5., überarb. aufl. 2014 edition, 2014. ISBN 3658067403.
- [23] Matthias Günther. *Energieeffizienz durch Erneuerbare Energien: Möglichkeiten, Potenziale, Systeme*. Springer, Wiesbaden [Germany], 2015. ISBN 3658067535.
- [24] Wesselak Viktor, Schabbach Thomas, Link Thomas, and Fischer Joachim. *Regenerative Energietechnik*. SpringerLink : Bücher. Imprint: Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2., erw. u.vollst. neu bearb. aufl. 2013 edition, 2013. ISBN 3642241654.
- [25] Umweltbundesamt. Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. URL [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/treibhausgasneutrales\\_deutschland\\_im\\_jahr\\_2050\\_langfassung.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/treibhausgasneutrales_deutschland_im_jahr_2050_langfassung.pdf).
- [26] Vereinte Nationen. AGENDA 21: Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung.
- [27] Alexa Lutzenberger, Rafael Wehrspann, Adeline Wagner, Oliver Opel, and Thomas Schmidt. 100% Erneuerbare Energie Region Landreis und Hansestadt Lüneburg: Potentiale der erneuerbaren Energien.
- [28] Wolfgang K.L. Ruck and Oliver Opel. Leuphana Energieforum: Wärmeversorgung in Lüneburg: Potentiale für den Klimaschutz, 23.09.2015.
- [29] Nikolai Strodel, Oliver Opel, Karl F. Werner, and Wolfgang K. L. Ruck. Integrales Energiekonzept für eine klimaneutrale Universität: Projekt "klimaneutraler Campus". In Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V., editor, *Fachforum Thermische Energiespeicher*, pages 89–92, 2015.

- [30] Oliver Opel, Nikolai Strodel, Jan Geffken, Andreea Tribel, and Wolfgang K. L. Ruck. Climate-neutral and sustainable campus Leuphana University of Lueneburg. . doi: 10.1016/j.energy.2017.08.039.
- [31] Bas Godschalk. Urban subsurface heat and cold storage - experiences from the Netherlands, 28.11.2017.
- [32] AG Energiebilanzen e. V. Stromerzeugung nach Energieträgern 1990-2016 (Stand November 2017). URL <https://www.ag-energiebilanzen.de/>.
- [33] Öko-Institut Freiburg, Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme Freiburg. Klimaneutraler Gebäudebestand 2050.
- [34] Heike Erhorn-Kluttig and Hans Erhorn. *Energetische Bilanzierung von Quartieren: Ergebnisse und Benchmarks aus Pilotprojekten - Forschung zur energieeffizienten Stadt*. Schriftenreihe EnEff. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2016. ISBN 978-3-8167-9630-5.
- [35] P. Lauenburg. Temperature optimization in district heating systems. In *Advanced District Heating and Cooling (DHC) Systems*, pages 223–240. Elsevier, 2016. ISBN 9781782423744. doi: 10.1016/B978-1-78242-374-4.00011-2.
- [36] Jelena Ziemele, Armands Gravelsins, Andra Blumberga, and Dagnija Blumberga. Combining energy efficiency at source and at consumer to reach 4th generation district heating: Economic and system dynamics analysis. *Energy*, 2017. ISSN 03605442. doi: 10.1016/j.energy.2017.04.123.
- [37] P. Raynal, J. P. Gibert, and C. Barthomeuf. Chaudes-Aigues: historique des utilisations de la géothermie: Geothermal heat networks: Chaudes-Aigues was centuries ahead. *Réseaux et chaleur*, (16):67–75, 1992.
- [38] J. F. Collins. The History of District Heating. *District Heating*, (44):154–161, 1959.
- [39] Henrik Lund, Anders N. Andersen, Poul Alberg Østergaard, Brian Vad Mathiesen, and David Connolly. From electricity smart grids to smart energy systems – A market operation based approach and understanding. *Energy*, 42(1):96–102, 2012. ISSN 03605442. doi: 10.1016/j.energy.2012.04.003.

- [40] Stefan Forsaeus Nilsson, Charlotte Reidhav, Kristina Lygnerud, and Sven Werner. Sparse district-heating in Sweden. *Applied Energy*, 85(7):555–564, 2008. ISSN 03062619. doi: 10.1016/j.apenergy.2007.07.011.
- [41] Charlotte Reidhav and Sven Werner. Profitability of sparse district heating. *Applied Energy*, 85(9):867–877, 2008. ISSN 03062619. doi: 10.1016/j.apenergy.2008.01.006.
- [42] Urban Persson and Sven Werner. Heat distribution and the future competitiveness of district heating. *Applied Energy*, 88(3):568–576, 2011. ISSN 03062619. doi: 10.1016/j.apenergy.2010.09.020.
- [43] Christoph Rathgeber, Eberhard Lävemann, and Andreas Hauer. Wirtschaftlichkeit Thermischer Energiespeicher: Was darf ein Wärmespeicher kosten? Welche Faktoren beeinflussen die Wirtschaftlichkeit. In Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V., editor, *Fachforum Thermische Energiespeicher*, pages 35–44, 2015.
- [44] Michael Sterner and Ingo Stadler, editors. *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg and s.l., 2 edition, 2017. ISBN 978-3-662-48893-5. doi: 10.1007/978-3-662-48893-5. URL <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-48893-5>.
- [45] Stefan Raab, Thomas Schmidt, M. Benner, Wolfgang Heidemann, and Hans Müller-Steinhagen. Saisonale Wärmespeicherung - aktuelle Speichertechnologien und Entwicklungen bei Heißwasser-Wärmespeichern. In Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V., editor, *Fachseminar Oberflächennahe Geothermie*, 2005.
- [46] Roman Marx, Janet Nußbicker-Lux, Dan Bauer, Wolfgang Heidemann, and Harald Drück. Saisonale Wärmespeicher - Bauarten, Betriebsweise und Anwendungen. *Chemie Ingenieur Technik*, 83(11):1994–2001, 2011. ISSN 0009286X. doi: 10.1002/cite.201100064.
- [47] Roman Marx. *Integration von Wärmepumpen in solare Nahwärmeanlagen mit saisonaler Wärmespeicherung*. Berichte aus der Energietechnik. Shaker, Aachen, 2015. ISBN 3844034765.
- [48] Thomas Schmidt and H. Müller-Steinhagen. Seasonal thermal energy storage in Germany. In *Proceedings: International Solar Energy Society (ISES)*, 2003.

- [49] Janet Nussbicker-Lux. *Simulation und Dimensionierung solar unterstützter Nahwärmesysteme mit Erdsonden-Wärmespeicher*. 2010.
- [50] Arefeh Hesaraki, Sture Holmberg, and Fariborz Haghighat. Seasonal thermal energy storage with heat pumps and low temperatures in building projects—A comparative review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43:1199–1213, 2015. ISSN 13640321. doi: 10.1016/j.rser.2014.12.002.
- [51] M. Benner. *Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit und ohne Langzeit-Wärmespeicher: Forschungsbericht zum BMBF-Vorhaben ; (September 1994 bis Oktober 1998)*. Universitätsbibliothek u. Technische Informationsbibliothek, Stuttgart and Hannover, [electronic ed.] edition, 1999. ISBN 3-9805274-0-9. URL <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e001/303028998.pdf>.
- [52] Patrice Pinel, Cynthia A. Cruickshank, Ian Beausoleil-Morrison, and Adam Wills. A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(7):3341–3359, 2011. ISSN 13640321. doi: 10.1016/j.rser.2011.04.013.
- [53] F. Ochs, W. Heidemann, and H. Müller-Steinhagen. Performance of Large-Scale Seasonal Thermal Energy Stores. *Journal of Solar Energy Engineering*, 131(4):41005, 2009. ISSN 01996231. doi: 10.1115/1.3197842.
- [54] M. Lundh and J.-O. Dalenbäck. Swedish solar heated residential area with seasonal storage in rock: Initial evaluation. *Renewable Energy*, 33(4):703–711, 2008. ISSN 09601481. doi: 10.1016/j.renene.2007.03.024.
- [55] Amaya V. Novo, Joseba R. Bayon, Daniel Castro-Fresno, and Jorge Rodriguez-Hernandez. Review of seasonal heat storage in large basins: Water tanks and gravel-water pits. *Applied Energy*, 87(2):390–397, 2010. ISSN 03062619. doi: 10.1016/j.apenergy.2009.06.033.
- [56] Schmidt, Thomas, Miedaner, Oliver. Solar District Heating Guidelines - Fact sheet: Chapter 7: Large Scale or Seasonal Thermal Energy Storage. URL [www.solar-district-heating.eu](http://www.solar-district-heating.eu).
- [57] J. Xu, R. Z. Wang, and Y. Li. A review of available technologies for seasonal

- thermal energy storage. *Solar Energy*, 103:610–638, 2014. ISSN 0038092X. doi: 10.1016/j.solener.2013.06.006.
- [58] Dirk Mangold. Saisonalspeicher: Das Wissensportal für die saisonale Wärmespeicherung, 2016. URL [www.saisonalspeicher.de](http://www.saisonalspeicher.de).
- [59] Mohammad Al-Addous. *Berechnen der Größe von Wasserspeichern zum saisonalen Speichern von Wärme bei der ausschließlichen Wärmeversorgung von Häuser*. Freiberg, 2006.
- [60] L. T. Terziotti, M. L. Sweet, and J. T. McLeskey. Modeling seasonal solar thermal energy storage in a large urban residential building using TRNSYS 16. *Energy and Buildings*, 45:28–31, 2012. ISSN 03787788. doi: 10.1016/j.enbuild.2011.10.023.
- [61] Anke Boockmeyer and Sebastian Bauer. Efficient simulation of multiple borehole heat exchanger storage sites. *Environmental Earth Sciences*, 75(12):406, 2016. ISSN 1866-6280. doi: 10.1007/s12665-016-5773-4.
- [62] Nikolai Strodel, Oliver Opel, Karl F. Werner, and Wolfgang K.L. Ruck. Ausbau und Energieeffizienzerhöhung des Energiesystems der Leuphana Universität Lüneburg. In *Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern (NEIS)*, Hamburg, 2015. Vieweg + Teubner Verlag. ISBN 3658109572.
- [63] Nikolai Strodel, Oliver Opel, Stefan Kranz, Karl F. Werner, and Wolfgang K. L. Ruck. Erhöhung des regenerativen Anteils der Wärmeversorgung eines Nahwärmenetzes durch die saisonale Wärmespeicherung in einem Aquifer. volume 5, pages 113–120, 2016.
- [64] Nikolai Strodel, Oliver Opel, Stefan Kranz, Karl F. Werner, and Wolfgang K. L. Ruck. Optimization of cogeneration by seasonal heat storage in an aquifer. In *Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern (NEIS)*, 2016.
- [65] Peter Seibt and Frank Kabus. Aquifer thermal energy storage - projects implemented in Germany. In *Proceedings of Ecstock*, 2006.
- [66] Stefan Kranz, Ernst Huenges, Jan Albers, Felix Ziegler, Oliver Opel, Wolfgang K.L. Ruck, Jörn Bartels, Markus Wolfgramm, and Frank Kabus. Aquiferspeicher für

- die Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden: Block III: Thermische Speichersysteme und deren Anwendungen. In Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung, editor, *Statusseminar Forschung für Energieoptimiertes Bauen: EnOB - Forschung für Energieoptimiertes Bauen*. Würzburg, 2009.
- [67] Thomas Schmidt, Frank Kabus, and H. Müller-Steinhagen. The central solar heating plant with aquifer thermal energy store in Rostock, Germany. In University of Stuttgart, editor, *Proceedings: International Conference on Thermal Energy Storage for Efficiency and Sustainability*, 2000.
- [68] Thomas Schmidt and H. Müller-Steinhagen. Die solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit saisonalem Aquifer-Wärmespeicher in Rostock: Ergebnisse nach vier Betriebsjahren. In Geothermische Vereinigung, editor, *8. Geothermische Fachtagung, Geeste*, 2004. Geothermische Vereinigung - GtV. ISBN 978-3-932570-52-0.
- [69] Heiner Menzel, Peter Seibt, and Torsten Kellner. Five years of experience in the operation of the Neustadt-Glewe geothermal project. In *Proceedings: International Geothermal Association (IGA)*, 2000.
- [70] H. Schröder, M. Teschner, M. Köhler, A. Seibt, M. Krüger, HJ. Friedrich, and M. Wolfgramm. Long term reliability of geothermal plants - Examples from Germany. In *Proceedings European Geothermal Congress (EGC)*, 2007.
- [71] Frank Kabus, Markus Wolfgramm, Andrea Seibt, U. Richlak, and H. Beuster. Aquifer thermal energy storage in Neubrandenburg - monitoring throughout three years of regular operation. In *Proceedings of the 11th International Conference on Energy Storage*. .
- [72] Peter Seibt, Frank Kabus, and Peer Hoth. The Neustadt-Glewe geothermal power plant - practical experience in the reinjection of cooled thermal waters into sandstone aquifers. In *Proceedings: International Geothermal Association (IGA)*, 2005.
- [73] M. Wolfgramm and A. Seibt. Geochemisches Monitoring des geothermalen Tiefenspeichers in Neubrandenburg.
- [74] Frank Kabus, U. Richlak, and H. Beuster. Saisonale Speicherung von Überschusswärme aus einem Heizkraftwerk in einem Aquifer in Neubrandenburg, .

- [75] Silke Köhler, Stefan Kranz, Ernst Huenges, Jan Albers, Cagaty Berkyürek, Felix Ziegler, Jörn Bartels, Markus Wolfgramm, Andrea Seibt, Frank Kabus, Oliver Opel, and Wolfgang K.L. Ruck. Wärme- und Kälteversorgung der Parlamentsbauten im Berliner Spreebogen mit Aquiferspeicher. In Fraunhofer-Gesellschaft, editor, *Statusseminar Thermische Energiespeicherung - mehr Energieeffizienz zum Heizen und Kühlen: Block II: Erdsonden- und Aquiferspeicher*, volume Block II, pages 131–142. 2006. URL [http://www.enob.info/fileadmin/media/Publikationen/EnOB/StatusseminarThermEspeicherung\\_teil2.pdf](http://www.enob.info/fileadmin/media/Publikationen/EnOB/StatusseminarThermEspeicherung_teil2.pdf).
- [76] Stefan Kranz and Jörn Bartels. Simulation and data based identification of parameters affecting seasonal ATES efficiency. In *Proceedings: International Conference on Thermal Energy Storage for Efficiency and Sustainability*, 2009.
- [77] Stefan Kranz, Guido Bloecher, and Ali Saadat. Improving Aquifer Thermal Energy Storage Efficiency. In *Proceedings World Geothermal Congress*, 2015.
- [78] Stefan Kranz and Stephanie Frick. Efficient cooling energy supply with aquifer thermal energy storages. *Applied Energy*, 109:321–327, 2013. ISSN 03062619. doi: 10.1016/j.apenergy.2012.12.002.
- [79] Stefan Kranz, Christian Wernitz, Stephanie Frick, Ali Sadaat, Markus Wolfgramm, Kerstin Rauppach, Andrea Seibt, Birgit Rohstock, Jörn Bartels, Doreen Gehrke, Frank Hoffmann, Manfred Rinke, Carsten von Lüthmann, Oliver Opel, and Wolfgang K.L. Ruck. Thermische Unterspeicher in Energiesystemen: Optimierung der Einbindung der Aquiferspeicher in die Wärme- und Kälteversorgung der Parlamentsbauten im Berliner Spreebogen.
- [80] Burkhard Sanner and Klaus Knoblich. *Thermische Unterspeicherung auf höherem Temperaturniveau: Begleitforschung mit Messprogramm Aquiferspeicher Reichstag: Schlussbericht zum FuE-Vorhaben; Laufzeit: 01.11. 1999-30.09. 2003; das Vorhaben war Teil des Annex 12" High temperature underground thermal energy storage" im implementing agreement" Energy conservation through energy storage" der International Energy Agency IEA*. Inst. für Angewandte Geowissenschaften der Justus-Liebig-Univ. Gießen, 2004.
- [81] H. Paksoy, A. Snijders, and L. Stiles. State-of-the-art review of aquifer thermal energy storage systems for heating and cooling buildings. In *Proceedings: International*

- Conference on Thermal Energy Storage for Efficiency and Sustainability*, 2009. URL <https://intraweb.stockton.edu/eyos/page.cfm?siteID=82&pageID=41#38>.
- [82] Burkhard Sanner. A different approach to shallow geothermal energy - Underground Thermal Energy Storage (UTES): International Summer School on Direct Application of Geothermal Energy. 2001.
- [83] Burkhard Sanner, Constantine Karytsas, Dimitrios Mendrinou, and Ladislaus Rybach. Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe. *Geothermics*, 32(4-6):579–588, 2003. ISSN 03756505. doi: 10.1016/S0375-6505(03)00060-9.
- [84] Kun Sang Lee. A Review on Concepts, Applications, and Models of Aquifer Thermal Energy Storage Systems. *Energies*, 3(6):1320–1334, 2010. ISSN 1996-1073. doi: 10.3390/en3061320.
- [85] David W. Bridger and Diana M. Allen. Designing aquifer thermal energy storage systems. *ASHRAE Journal*, (Vol. 2, Issue 4):32–38, 2005.
- [86] Wolfgang Sand. Microbial life in geothermal waters. *Geothermics*, 32(4-6):655–667, 2003. ISSN 03756505. doi: 10.1016/S0375-6505(03)00058-0.
- [87] Heike Brielmann, Tillmann Lueders, Kathrin Schreglmann, Francesco Ferraro, Maria Avramov, Verena Hammerl, Philipp Blum, Peter Bayer, and Christian Griebler. Oberflächennahe Geothermie und ihre potenziellen Auswirkungen auf Grundwasserökosysteme. *Grundwasser*, 16(2):77–91, 2011. ISSN 1430-483X. doi: 10.1007/s00767-011-0166-9.
- [88] Wolfgang Weber. *Mineralogie der Inkrustierungen bei der Aquiferwärmespeicherung: Untersuchungen in Rohrleitungen und Wärmetauschern bei der Wärmespeicherung in petrographisch unterschiedlichen Sedimenten*. 2001.
- [89] Burkhard Sanner and Klaus Knoblich. Advantages and problems of high temperature underground thermal energy storage. *Bulletin d'Hydrogéologie*, (17):341–348, 1999.
- [90] H. J. Brons, J. Griffioen, C.A.J. Appelo, and A.J.B. Zehnder. (Bio)geochemical reactions in aquifer material from a thermal energy storage site. *Water Research*, 25(6):729–736, 1991. ISSN 00431354. doi: 10.1016/0043-1354(91)90048-U.

- [91] Rudolf Wagner, Michael Koch, and Maurizio Adinolfi. *Chemische und biologische Prozesse in Aquifer-Wärmespeichern*, volume 101 of *Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft*. Oldenbourg, München, 1988. ISBN 3486262807.
- [92] Oliver Opel and J. A. Novio Liñares. Berechnung von Eisengehalten und Verockerungspotential von Schluckbrunnen mithilfe von Temperatur-, Redoxpotential-, pH-Wert-, Leitfähigkeits- und Sauerstoffsättigungsdaten. In *Der Geothermiekongress 2007 - Energie für alle Fälle*. Geothermische Ver, Geeste, 2007. ISBN 978-3-932570-58-2.
- [93] E. A. Jenne, O. Andersson, and A. Willemsen. Well, Hydrology, and Geochemistry Problems Encountered in ATEs Systems and Their Solutions. In *27th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (1992)*, SAE Technical Paper Series. SAE International 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 1992. doi: 10.4271/929153.
- [94] Oliver Opel, J.A Novio Liñares, and Wolfgang Ruck. Saisonale Wärmespeicherung im Aquifer: Ergebnisse aus dem geochemischen Monitoring der Aquiferwärme- und Kältespeicher am deutschen Reichstagskomplex in Berlin. In *Der Geothermiekongress 2007*. .
- [95] Oliver Opel, T. Eggerichs, N. Eler, and Wolfgang Ruck. Zusammenhänge und Kinetik biotischer und abiotischer Eisenoxidation bei der Brunnenverockerung und Ansätze zur Modellierung. In *Wasser 2009*. Gesellschaft Dt. Chemiker, Frankfurt am Main, 2009. ISBN 978-3-936028-56-0.
- [96] Olof Andersson, Göran Hellström, and Bo Nordell. Heating and Cooling with UTES in Sweden - Current Situation and Potential Market Development. In *FUTURESTOCK - International Conference on Thermal Energy Storage*, pages 207–215. PW Publishing House, Warsaw, 2003.
- [97] International Energy Agency IEA. Energy Conservation through Energy Storage ECES - Annex 12, .
- [98] International Energy Agency IEA. Energy Conservation through Energy Storage ECES - Annex 6, .

- [99] Burkhard Sanner. *High Temperature Underground Thermal Energy Storage: State-of-the-art and Prospects: A review within ECES Annex 12 of the International Energy Agency IEA*. Lenz-Verlag Giessen, Giessen, 1999.
- [100] Olof Andersson. AQUIFER THERMAL ENERGY STORAGE (ATES). In Halime Ö. Paksoy, editor, *Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption*, volume 234 of *NATO Science Series*, pages 155–176. Springer Netherlands, Dordrecht, 2007. ISBN 978-1-4020-5288-0. doi: 10.1007/978-1-4020-5290-3{\textunderscore}8.
- [101] Kord Ernstson. Geologische und geophysikalische Untersuchungen. In Mathias Bauer, Willi Freeden, Hans Jacobi, and Thomas Neu, editors, *Handbuch Tiefe Geothermie*, pages 19–80. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2014. ISBN 978-3-642-54510-8.
- [102] Markus Wolfgramm, Matthias Franz, and Thorsten Agemar. Explorationsstrategie tiefer geothermischer Ressourcen am Beispiel des Norddeutschen Beckens. In Mathias Bauer, Willi Freeden, Hans Jacobi, and Thomas Neu, editors, *Handbuch Tiefe Geothermie*, pages 465–506. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2014. ISBN 978-3-642-54510-8.
- [103] Hagen Feldrappe, Karsten Obst, and Markus Wolfgramm. Die mesozoischen Sandsteinaquifere des Norddeutschen Beckens und ihr Potential für die geothermische Nutzung: Mesozoic sandstone aquifers of the North German Basin and their potential for the geothermal utilization. *Zeitschrift für geologische Wissenschaften*, (4/5):199–222, 2008.
- [104] Hans Joachim Fiedler. *Böden und Bodenfunktionen in Ökosystemen, Landschaften und Ballungsgebieten: 78 Tabellen*, volume 7 of *Forum EIPOS*. expertverlag, Renningen-Malmsheim, 2001. ISBN 978-3816918752.
- [105] Bernward Hölting and Wilhelm Georg Coldewey. *Hydrogeologie: Einführung in die allgemeine und angewandte Hydrogeologie ; 69 Tabellen*. Elsevier Spektrum Akad. Verl., München, 6., überarb. und erw. aufl. edition, 2005. ISBN 3-8274-1526-8.
- [106] Wilfried Rockel and Herbert Schneider. Die Möglichkeiten der Nutzung geothermischer Energie in Norddeutschland und der Bearbeitungsstand geplanter Vorhaben. In Rüdiger Schulz, editor, *Geothermische Energie*, pages 87–98. C.F. Müller, Karlsruhe, 1992. ISBN 978-3788074449.

- [107] Van Loon, L. J. M. Relevant characteristics for open (ATES) storage, International Energy Agency ECES Annex 7, Proc. WS on Generic Config. of Seasonal Cold Storage Applications.
- [108] Herbert Paschen, Dagmar Oertel, and Reinhard Grünwald. Möglichkeiten geothermischer Stromerzeugung in Deutschland, Sachstandsbericht - Arbeitsbericht Nr. 84.
- [109] Maurizio Adinolfi, Michael Koch, and Wolfgang Ruck. Ökologische und mikrobielle Folgen der Wärmespeicherung im Aquifer. In *Saisonale Wärmespeicher im Aquifer*, volume 124 of *Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft*, pages 89–106. Oldenbourg, München, 1994. ISBN 3-486-26119-3.
- [110] Oliver Opel, Tanja Eggerichs, Tobias Otte, and Wolfgang K. L. Ruck. Monitoring of microbially mediated corrosion and scaling processes using redox potential measurements. *Bioelectrochemistry (Amsterdam, Netherlands)*, 97:137–144, 2014. ISSN 1567-5394. doi: 10.1016/j.bioelechem.2013.11.004.
- [111] Oliver Opel. *Detektion von Verockerungsprozessen, Korrosion und Belagbildung: Monitoring der Eisenoxidation in Brunnen, Gebäuden, Leitungen und technischen Anlagen mithilfe des Redoxpotentials: Zugl: Lüneburg, Leuphana Univ., Diss., 2013*. Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften, Saarbrücken, 2013. ISBN 978-3-8381-3472-7. URL [http://fox.leuphana.de/portal/de/publications/detektion-von-verockerungsprozessen-korrosion-und-belagbildung\(44d3022f-1e1c-48eabfae-f192cbed2b5b\).html](http://fox.leuphana.de/portal/de/publications/detektion-von-verockerungsprozessen-korrosion-und-belagbildung(44d3022f-1e1c-48eabfae-f192cbed2b5b).html).
- [112] Tanja Eggerichs, Oliver Opel, Tobias Otte, and Wolfgang Ruck. Interdependencies between Biotic and Abiotic Ferrous Iron Oxidation and Influence of pH, Oxygen and Ferric Iron Deposits. *Geomicrobiology Journal*, 31(6):461–472, 2014. ISSN 0149-0451. doi: 10.1080/01490451.2013.870620.
- [113] Yu Zhang and Mamoun Muhammed. Critical evaluation of thermodynamics of complex formation of metal ions in aqueous solutions. *Hydrometallurgy*, 60(3): 215–236, 2001. ISSN 0304386X. doi: 10.1016/S0304-386X(01)00148-7.
- [114] Wolfgang K. L. Ruck and Oliver Opel. Verhalten der Aquiferspeicher - Abschlussbericht zum AP 3. In *Thermische Untergrundspeicher in Energiesystemen: Optimierung der*

- Einbindung der Aquiferspeicher in die Wärme- und Kälteversorgung der Parlamentsbauten im Berliner Spreebogen*. Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek, 2011.
- [115] Carl O. Moses, D. Kirk Nordstrom, Janet S. Herman, and Aaron L. Mills. Aqueous pyrite oxidation by dissolved oxygen and by ferric iron. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(6):1561–1571, 1987. ISSN 00167037. doi: 10.1016/0016-7037(87)90337-1.
- [116] Herbert Achilles. Tiefenpumpen in der Bayerischen Molasse - Erfahrungen mit Tauchkreiselpumpen zur Förderung von Thermalwasser aus tiefen Geothermiebohrungen. *Geothermische Energie Heft*, (83), 2016.
- [117] Andrea Seibt, Peer Hoth, and Dirk Naumann. Gas Solubility in Formation Waters of the North German Basin - Implications for Geothermal Energy Recovery. In International Geothermal Association IGA, editor, *Proceedings World Geothermal Congress*, pages 1713–1718, 2000. URL <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGASTandard/WGC/2000/R0262.PDF>.
- [118] B. Marty, A. Criaud, and C. Fouillac. Low enthalpy geothermal fluids from the Paris sedimentary basin—1. Characteristics and origin of gases. *Geothermics*, 17(4): 619–633, 1988. ISSN 03756505. doi: 10.1016/0375-6505(88)90047-8.
- [119] Markus Wolfgramm, Kerstin Rauppach, and Päivi Puronpää-Schäfer. Berliner Parlamentsbauten - Betrieb, Monitoring und Regenerierung mit Stickstoff beaufschlagter Kältespeicherbrunnen. *Energie - Wasser - Praxis*, (10):38–45, 2010.
- [120] BINE Informationsdienst - Energieforschung für die Praxis. Robuste Pumpen für die Geothermie weiterentwickeln.
- [121] Axel Sperber, Inga Moeck, and Wulf Brandt. Drilling into Geothermal Reservoirs. In Ernst Huenges, editor, *Geothermal energy systems*, pages 113–172. Wiley-VCH, Weinheim, 2010. ISBN 978-3-527-40831-3.
- [122] Mathias Bauer, Willi Freeden, Hans Jacobi, and Thomas Neu, editors. *Handbuch Tiefe Geothermie*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2014. ISBN 978-3-642-54510-8. doi: 10.1007/978-3-642-54511-5.

- [123] Heinrich-Otto Buja. *Handbuch der Tief-, Flach-, Geothermie- und Horizontalbohrtechnik: Bohrtechnik in Grundlagen und Anwendung ; mit 119 Tabellen*. Praxis. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 1. aufl. edition, 2011. ISBN 978-3-8348-1278-0.
- [124] Verein Deutscher Ingenieure. VDI 4640 - Thermische Nutzung des Untergrunds, . URL <https://www.vdi.de>.
- [125] Katrin Breede, Khatia Dzebisashvili, Xiaolei Liu, and Gioia Falcone. A systematic review of enhanced (or engineered) geothermal systems: Past, present and future. *Geothermal Energy*, 1(1):4, 2013. ISSN 2195-9706. doi: 10.1186/2195-9706-1-4.
- [126] Ernst Huenges. Nutzbarmachung künftiger poröser Speichergesteine zur abnehmernahen geothermischen Energiebereitstellung - FuE-Vorhaben BEO 0327063: Abschlussbericht.
- [127] Wijbrand Sommer, Johan Valstar, Ingo Leusbrock, Tim Grotenhuis, and Huub Rijnaarts. Optimization and spatial pattern of large-scale aquifer thermal energy storage. *Applied Energy*, 137:322–337, 2015. ISSN 03062619. doi: 10.1016/j.apenergy.2014.10.019.
- [128] STREICHER Drilling Technology GmbH. <http://www.streicher-drillingtechnology.de>.
- [129] PRAKLA Bohrtechnik GmbH. <http://www.prakla-bohrtechnik.de>.
- [130] Gene Culver. Chapter 6 - Drilling and Well Construction. In Geo-Heat-Center, editor, *Geothermal direct Use Engineering and Design Guidebook*, pages 129–164. Klamath Falls, Oregon, 1998.
- [131] Hartwig Schröder and Jochen Schneider. Tiefpumpen zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit in der tiefen Geothermie. In *Praxisforum Geothermie Bayern*, pages 63–66. München, 2013.
- [132] Henning Francke and Matthis Thorade. Density and viscosity of brine: An overview from a process engineers perspective. *Chemie der Erde - Geochemistry*, 70:23–32, 2010. ISSN 00092819. doi: 10.1016/j.chemer.2010.05.015.

- [133] Hans Jacobi and Thomas Neu. Risikomanagement. In Mathias Bauer, Willi Freeden, Hans Jacobi, and Thomas Neu, editors, *Handbuch Tiefe Geothermie*, pages 275–301. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2014. ISBN 978-3-642-54510-8.
- [134] Stefanie Brich, editor. *Gabler Wirtschaftslexikon*. Springer Gabler, Wiesbaden, 18., aktualisierte und erw. aufl. edition, 2014. ISBN 978-3834934642.
- [135] Der Geothermiemarkt in Europa bis 2030 - Energie aus der Erde: Potenziale für Kapitalanleger, Energieversorger und Anlagenbauer. volume 13-0187. Bremen, 2010.
- [136] Jochen Kubiniok. Umweltaspekte - Rechtliche Situation. In Mathias Bauer, Willi Freeden, Hans Jacobi, and Thomas Neu, editors, *Handbuch Tiefe Geothermie*, pages 379–395. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2014. ISBN 978-3-642-54510-8.
- [137] Zentrum für Tiefen-Geothermie ZTG. Lotse für Tiefengeothermie-Projekte in Niedersachsen, 2017. URL [http://www.lbeg.niedersachsen.de/ztg\\_download](http://www.lbeg.niedersachsen.de/ztg_download).
- [138] Mathias Hellriegel. Rechtsrahmen für eine Raumordnung zur Steuerung unterirdischer Nutzungen. *Neue Zeitschrift für Verwaltungsrecht NVwZ*, 2013(3):111–116.
- [139] Steffen Benz. *Rechtliche Rahmenbedingungen für die Nutzung der oberflächennahen Geothermie*. BWV Berliner Wissenschafts-Verlag, Berlin, 2010. ISBN 978-3830516897. URL <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=1604927>.
- [140] Lars Holstenkamp, Julian Justus Lauer, Philipp Neidig, Oliver Opel, Jens Steffahn, Nikolai Strodel, Maud Vogel, Heinrich Degenhart, Dieter Michalzik, Thomas Schomerus, Jörg Schönebeck, and Thor Növig. Querschnittsstudie Erfolgsfaktoren für mitteltiefe Aquiferwärmespeicher in Norddeutschland. *Geothermische Energie Heft*, (86):26–27, 2017. URL <http://www.geothermie.de/service/publikationen/zeitschrift-geothermische-energie.html>.
- [141] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. Gesetz für den Ausbau erneuerbaren Energien - EEG 2017, .
- [142] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung - KWKG 2016, .

- [143] Petra Schweizer-Ries, Irina Rau, and Jan Zoellner. Akzeptanz erneuerbarer Energien und sozialwissenschaftliche Fragen.
- [144] Matthias Gross. Old Science Fiction, New Inspiration. *Science Communication*, 35 (6):810–818, 2013. ISSN 1075-5470. doi: 10.1177/1075547012469184.
- [145] Matthias Gross and Rüdiger Mautz. *Renewable energies*. Key Ideas. Routledge, London [u.a.], 2015. ISBN 978-1138194519.
- [146] Alena Bleicher and M. David. Keine Angst vor der Öffentlichkeit - Beteiligungen im Rahmen der Energie- und Rohstoffgewinnung in Deutschland. In Institut für Markscheidewesen und Geodäsie, editor, *Tagungsband Bergbau, Energie und Rohstoffe*, Nossen, 2015. Wagner Digitaldruck.
- [147] Klein, S. A. et al, 2010. TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program.
- [148] Stefan Raab. *Simulation, Wirtschaftlichkeit und Auslegung solar unterstützter Nahwärmesysteme mit Heißwasser-Wärmespeicher: Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2006*. Cuvillier, Göttingen, 1. aufl. edition, 2006. ISBN 3867270481.
- [149] Mike Zehner Bernhard Weinreich. Auslegungshilfen in der Praxis - ein Vergleich. *Sonne Wind & Wärme*, (15):56–64, 2009.
- [150] Steven C. Chapra and Raymond P. Canale. *Numerical methods for engineers: With software and programming applications*. McGraw-Hill, Boston, 4. ed. edition, 2002. ISBN 0-07-243193-8. URL <http://www.loc.gov/catdir/description/mh021/2001030654.html>.
- [151] Yannick Allard, Michael Kummert, Michael Bernier, and Alain Moreau. Intermodel comparison and experimental validation of electrical water heater models in TRNSYS. In *Proceedings: Building Simulations*, pages 688–695, 2011.
- [152] Harald Drück. Multiport Sotre-Model for TRNSYS: Type 340.
- [153] Kai Schäfer, Dirk Mangold, and Thomas Pauschinger. DEZENTRAL - Dezentrale Einspeisung in Nah- und Fernwärmesysteme unter besonderer Berücksichtigung der Solarthermie: Teilbericht des Verbundpartners Solites.
- [154] Nikolai Strodel. Auslegungs- und Betriebsoptimierung von dezentralen Wärmesystemen durch Speicheranalyse: Diplomarbeit Nr.: 2013-30.

- [155] Thomas Schmidt. TRNAST Two well model for TRNSYS: Manual.
- [156] Göran Hellström and Johan Claesson Johan Bennet. Aquifer Thermal Energy Storage - Single well model: Manual for Computer Code.
- [157] Dirk Mangold, Mathieu Riegger, and Thomas Schmidt. Solare Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicher: Wissenschaftlich-technische Programmbegleitung für Solarthermie2000Plus.
- [158] Jongchan Kim, Youngmin Lee, Woon Sang Yoon, Jae Soo Jeon, Min-Ho Koo, and Youngseuk Keehm. Numerical modeling of aquifer thermal energy storage system. *Energy*, 35(12):4955–4965, 2010. ISSN 03605442. doi: 10.1016/j.energy.2010.08.029.
- [159] Per Isakson and Lars O. Eriksson. MFC 1.0ß Matched Flow Collector Model for simulation and testing: User’s manual.
- [160] International Energy Agency. Task 26: Subtask B: Development of Performance Test Methods and Numerical Models for Combisystems and their Components. URL <http://archive.iea-shc.org/task26/>.
- [161] Bengt Perers and Chris Bales. A Solar Collector Model for TRNSYS Simulation and System Testing: A Report of IEA SHC - Task 26 Solar Combisystems.
- [162] Peter Kovács, Ulrik Pettersson, Bengt Perers, Stephan Fischer, and Martin Persson. Improving the Accuracy in Performance Prediction for New Collector Designs. In Klaus Vajen, editor, *ISES Solar World Congress 2011*, pages 1–6. doi: 10.18086/swc.2011.28.14.
- [163] Bengt Perers, Chris Bales, Janne Paavilainen, Antoine Dalibard, Stefan Fischer, and Erik Bertram. TRNSYS Type 832 v5.10 Dynamic Collector Model.
- [164] Andrea Seibt and Frank Hoffmann. *Geothermische Stromerzeugung - Erschließungsverfahren im Norddeutschen Becken: Stand der Technik und Perspektiven ; Tagung Potsdam, 17. und 18. Oktober 2002*, volume 1703 of *VDI-Berichte*. VDI-Verl., Düsseldorf, 2002. ISBN 9783180917030.
- [165] Jochen Dahm. District Heating Pipelines in the Ground - Simulation Model Type 313 Documentation.

- [166] *VDI-Wärmeatlas*. VDI-Buch. Imprint: Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2013. ISBN 364219981X.
- [167] Testreferenzjahr 2011 (Datensatz) - Sammlung meteorologischer Daten für das Bundesgebiet Deutschland. URL <http://www.dwd.de/DE/leistungen/testreferenzjahre/testreferenzjahre.html>.
- [168] Meteonorm-Software, 2017. URL <https://meteotest.ch/>.
- [169] J. Lam and M. Hiller. Schwierigkeiten bei der Verwendung der TRY Daten 2011 für Deutschland in der thermischen Simulation. In *International Building Performance Simulation Association IBPSA - BauSIM2014*, pages 395–401.
- [170] Solar District Heating. <http://solar-district-heating.eu/ServicesTools/Plantdatabase.aspx>, 2017. URL <http://solar-district-heating.eu/ServicesTools/Plantdatabase.aspx>.
- [171] Werner Weiss, Monika Spörk-Dür, and Franz Mauthner. Solar Heat Worldwide - Global Market Development and Trends in 2016.
- [172] Heiko Schwarzburger. Flachkollektor oder Röhre? Vor- und Nachteile. *SBZ*, 2012 (11-2012):22–24.
- [173] Gilian Schout, Benno Drijver, and Ruud Schotting. The influence of the injection temperature on the recovery efficiency of high temperature aquifer thermal energy storage: Comment on Jeon et al., 2015. *Energy*, 103:107–109, 2016. ISSN 03605442. doi: 10.1016/j.energy.2016.02.122.
- [174] Gilian Schout, Benno Drijver, Mariene Gutierrez-Neri, and Ruud Schotting. Analysis of recovery efficiency in high-temperature aquifer thermal energy storage: A Rayleigh-based method. *Hydrogeology Journal*, 22(1):281–291, 2014. ISSN 1431-2174. doi: 10.1007/s10040-013-1050-8.
- [175] Jun-Seo Jeon, Seung-Rae Lee, Lisa Pasquinelli, and Ida Lykke Fabricius. Sensitivity analysis of recovery efficiency in high-temperature aquifer thermal energy storage with single well. *Energy*, 90:1349–1359, 2015. ISSN 03605442. doi: 10.1016/j.energy.2015.06.079.

- [176] Thomas A. Buscheck, Christine Doughty, and Chin Fu Tsang. Prediction and analysis of a field experiment on a multilayered aquifer thermal energy storage system with strong buoyancy flow. *Water Resources Research*, 19(5):1307–1315, 1983. ISSN 00431397. doi: 10.1029/WR019i005p01307.
- [177] Göran Hellström, Chin-Fu Tsang, and Johan Claesson. Buoyancy flow at a two-fluid interface in a porous medium: Analytical studies. *Water Resources Research*, 24(4): 493–506, 1988. ISSN 00431397. doi: 10.1029/WR024i004p00493.
- [178] Christine Doughty, Göran Hellström, Chin Fu Tsang, and Johan Claesson. A dimensionless parameter approach to the thermal behavior of an aquifer thermal energy storage system. *Water Resources Research*, 18(3):571–587, 1982. ISSN 00431397. doi: 10.1029/WR018i003p00571.
- [179] DIN EN 12975-2. Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile - Kollektoren Teil 2: Prüfverfahren, Deutsche Fassung, 2006.
- [180] David Fischer, Tobias Wolf, Johannes Scherer, and Bernhard Wille-Hausmann. A stochastic bottom-up model for space heating and domestic hot water load profiles for German households. *Energy and Buildings*, 124:120–128, 2016. ISSN 03787788. doi: 10.1016/j.enbuild.2016.04.069.
- [181] Anne Boomsma. Reporting Monte Carlo Studies in Structural Equation Modeling. *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal*, 20(3):518–540, 2013. ISSN 1070-5511. doi: 10.1080/10705511.2013.797839.
- [182] Pamela Paxton, Patrick J. Curran, Kenneth A. Bollen, Jim Kirby, and Feinian Chen. Monte Carlo Experiments: Design and Implementation. *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal*, 8(2):287–312, 2001. ISSN 1070-5511. doi: 10.1207/S15328007SEM0802{\textunderscore}7.
- [183] John G. Kemeny and James L. Snell. *Finite markov chains*. Springer, New York, N.Y., reprint edition, 1983. ISBN 978-0-387-90192-3.
- [184] K. Anastasiou and C. Tsekos. Persistence statistics of marine environmental parameters from Markov theory, Part 1: Analysis in discrete time. *Applied Ocean Research*, 18(4):187–199, 1996. ISSN 01411187. doi: 10.1016/S0141-1187(96)00030-2.

- [185] Brede Hagen, Ingve Simonsen, Matthias Hofmann, and Michael Muskulus. A multivariate Markov Weather Model for O&M Simulation of Offshore Wind Parks. *Energy Procedia*, 35:137–147, 2013. ISSN 18766102. doi: 10.1016/j.egypro.2013.07.167.
- [186] Matti Scheu, Dennis Matha, and Michael Muskulus. Validation of a Markov-based Weather Model For Simulation of O&M For Offshore Wind Farms. In International Society of Offshore and Polar Engineers, editor, *22nd International Offshore and Polar Engineering Conference*. 2012.
- [187] Tobias Koch, Martin Schultze, Michael Eid, and Christian Geiser. A longitudinal multilevel CFA-MTMM model for interchangeable and structurally different methods. *Frontiers in psychology*, 5:311, 2014. ISSN 1664-1078. doi: 10.3389/fpsyg.2014.00311.
- [188] Tobias Koch. *Multilevel Structural Equation Modeling of Multitrait-Multimethod-Multioccasion Data: Doctoral thesis*. 2013.
- [189] Jana Holtmann, Tobias Koch, Katharina Lochner, and Michael Eid. A Comparison of ML, WLSMV, and Bayesian Methods for Multilevel Structural Equation Models in Small Samples: A Simulation Study. *Multivariate behavioral research*, 51(5):661–680, 2016. ISSN 0027-3171. doi: 10.1080/00273171.2016.1208074.
- [190] Linda K. Muthén and Bengt O. Muthén. How to Use a Monte Carlo Study to Decide on Sample Size and Determine Power. *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal*, 9(4):599–620, 2002. ISSN 1070-5511. doi: 10.1207/S15328007SEM0904{\textunderscore}8.
- [191] Sik-Yum Lee and Xin-Yuan Song. Evaluation of the Bayesian and Maximum Likelihood Approaches in Analyzing Structural Equation Models with Small Sample Sizes. *Multivariate behavioral research*, 39(4):653–686, 2004. ISSN 0027-3171. doi: 10.1207/s15327906mbr3904{\textunderscore}4.
- [192] Elke Bruns, Matthias Futterlieb, Dörte Ohlhorst, and Bernd Wenzel. Erneuerbare Energien in Wärmenetzen – eine realistische Perspektive? *Zeitschrift für Energiewirtschaft*, 36(3):159–172, 2012. ISSN 0343-5377. doi: 10.1007/s12398-012-0087-z.

- [193] Arbeitsblatt AGFW FW 309-1. Energetische Bewertung von Fernwärme - Bestimmung spezifischer Primärenergiefaktoren von Wärme- und Kälteversorgungssystemen (Stand: Februar 2017).
- [194] *International Gas Union research conference 2011: (IGRC 2011) ; Seoul, Korea, 19 - 21 October 2011*. Curran, Red Hook, NY, 2013. ISBN 978-1-6227-6385-6.
- [195] Alexa Lutzenberger. *Nachwachsende Rohstoffe zur Substitution von Mineralkraftstoffen -Möglichkeiten und Grenzen-: Eine Bewertung der Herstellung von Biokraftstoffen unter nachhaltigen Aspekten: Zugl.: Lüneburg, Leuphana Univ., Diss., 2009*. Südwestdeutscher Verl. für Hochschulschriften, Saarbrücken, 2009. ISBN 9783838100760. URL [http://fox.leuphana.de/portal/de/publications/nachwachsende-rohstoffe-zur-substitution-von-mineralkraftstoffen-moeglichkeiten-und-grenzen\(3128ec5e-0dac-42c5-befd-a0abad87c0f8\).html](http://fox.leuphana.de/portal/de/publications/nachwachsende-rohstoffe-zur-substitution-von-mineralkraftstoffen-moeglichkeiten-und-grenzen(3128ec5e-0dac-42c5-befd-a0abad87c0f8).html).
- [196] K. Arnold, C. Dienst, and S. Lechtenböhmer. Integrierte Treibhausgasbewertung der Prozessketten von Erdgas und industriellem Biomethan in Deutschland. *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung*, 22(2):135–152, 2010. ISSN 0934-3504. doi: 10.1007/s12302-010-0125-6.
- [197] Michael Memmler, Ludger Schrempf, Sebastian Hermann, Sven Schneider, Jeanette Pabst, and Marion Dreher. Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger - Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2013.
- [198] Wolfgang Mauch, Roger Corradini, Karin Wiesemeyer, and Marco Schwentzek. Allokationsmethoden für spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen von Strom und Wärme aus KWK-Anlagen. *et - Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, (9):12–14, 2010.
- [199] Sabine Gores, Lukas Emele, Ralph Harthan, Wolfram Jörß, Charlotte Loreck, and Vanessa Cook. Methodenpapier zur Bewertung von KWK-Anlagen in mittelfristiger Perspektive bis 2030.
- [200] Verein Deutscher Ingenieure. VDI 6025 - Betriebswirtschaftliche Berechnungen für Investitionsgüter und Anlagen, .
- [201] Hans Blohm, Klaus Lüder, and Christina Schaefer. *Investition: Schwachstellenanalyse des Investitionsbereichs und Investitionsrechnung*. Vahlens Handbücher der

- Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. Vahlen, München, 10., bearb. und aktualisierte Aufl. edition, 2012. ISBN 9783800639373. doi: 10.15358/9783800639380. URL <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=678744>.
- [202] Lutz Kruschwitz and Andreas Löffler. Kapitalkosten aus theoretischer und praktischer Perspektive. *Die Wirtschaftsprüfung (WPg)*, (17):803–810, 2008.
- [203] Lutz Kruschwitz and Andreas Löffler. *Discounted cash flow: A theory of the valuation of firms*. Wiley finance series. Wiley, Chichester, reprinted. edition, 2007. ISBN 978-0-470-87044-0.
- [204] KGAL GmbH & Co. KG. KGAL Marktstudie: Investitionen in Erneuerbare Energien - Befragung institutioneller Investoren 2015.
- [205] Richard Heimrath, Andreas Heinz, Wolfgang Streicher, Christian Fink, and Richard Riva. Solarunterstützte Wärmenetze - Technologie und Komponentenentwicklung.
- [206] Rambøll Energy Systems. <http://www.ramboll.de/>.
- [207] Rambøll Energy Systems. Solaranlage - Unsere Kompetenzen, 2017. URL [http://issuu.com/ramboll/docs/solar\\_energy\\_solarenergie\\_de\\_capabi?e=4162991/10392918](http://issuu.com/ramboll/docs/solar_energy_solarenergie_de_capabi?e=4162991/10392918).
- [208] Arcon-Sunmark. Kollektor HT-HEATstore, 2017. URL <http://de.arcon-sunmark.com/produkte/collector-ht-heat-store>.
- [209] Dan Bauer, Harald Drück, Stephan Lang, Roman Marx, and Thomas Plaz. Weiterentwicklung innovativer Technologien zur solaren Nahwärme und saisonalen Wärmespeicherung: Akronym "WinterSun".
- [210] GE Jenbacher GmbH & Co. OG. Jenbacher Baureihe 3 - Wirtschaftlich, langlebig, zuverlässig.
- [211] Ilja Pawel. The Cost of Storage – How to Calculate the Levelized Cost of Stored Energy (LCOE) and Applications to Renewable Energy Generation. *Energy Procedia*, 46:68–77, 2014. ISSN 18766102. doi: 10.1016/j.egypro.2014.01.159.

- [212] Stephanie Frick, Jan Diederik van Wees, Martin Kaltschmitt, and Gerd Schröder. Economic Performance and Environmental Assessment. In Ernst Huenges, editor, *Geothermal energy systems*, pages 373–421. Wiley-VCH, Weinheim, 2010. ISBN 978-3-527-40831-3.
- [213] Kulsum Ahmed and Dennis Anderson. *Renewable energy technologies: A review of the status and costs of selected technologies*, volume no.240 of *World Bank technical paper Energy series*. World Bank, Washington, D.C, 1994. ISBN 0-8213-2744-5. URL <http://elibrary.worldbank.org/content/book/9780821327449>.
- [214] *The future of geothermal energy: Impact of enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21st century*. Massachusetts Institute of Technology, S.I., 2006. ISBN 9780615134383. URL [http://geothermal.inel.gov/publications/future\\_of\\_geothermal\\_energy.pdf](http://geothermal.inel.gov/publications/future_of_geothermal_energy.pdf).
- [215] *Projected Costs of Generating Electricity 2010*. OECD Publishing, 2010. ISBN 9789264084308. doi: 10.1787/20798393.
- [216] Victor Nian, Qie Sun, Zhanyu Ma, and Hailong Li. A Comparative Cost Assessment of Energy Production from Central Heating Plant or Combined Heat and Power Plant. *Energy Procedia*, 104:556–561, 2016. ISSN 18766102. doi: 10.1016/j.egypro.2016.12.094.
- [217] Alexandros Daniilidis, Betül Alpsoy, and Rien Herber. Impact of technical and economic uncertainties on the economic performance of a deep geothermal heat system. *Renewable Energy*, 114:805–816, 2017. ISSN 09601481. doi: 10.1016/j.renene.2017.07.090.
- [218] Robert McGill, John W. Tukey, and Wayne A. Larsen. Variations of Box Plots. *The American Statistician*, 32(1):12, 1978. ISSN 00031305. doi: 10.2307/2683468.
- [219] John W. Tukey. *Exploratory data analysis*. Addison-Wesley series in behavioral science Quantitative methods. Addison-Wesley, Reading, Mass., 1997. ISBN 0201076160.
- [220] *Einführung in die nichtparametrische Statistik mit SAS und R*. Physica-Verlag HD, Heidelberg, 2008. ISBN 978-3-7908-2059-1. doi: 10.1007/978-3-7908-2060-7.

- [221] Peter A. W. Lewis. Distribution of the Anderson-Darling Statistic. *The Annals of Mathematical Statistics*, 32(4):1118–1124, 1961. ISSN 0003-4851. doi: 10.1214/aoms/1177704850.
- [222] M. A. Stephens. EDF Statistics for Goodness of Fit and Some Comparisons. *Journal of the American Statistical Association*, 69(347):730–737, 1974. ISSN 0162-1459. doi: 10.1080/01621459.1974.10480196.
- [223] Michael A. Stephens. Goodness of Fit, Anderson-Darling Test of. In Samuel Kotz, Campbell B. Read, N. Balakrishnan, Brani Vidakovic, and Norman L. Johnson, editors, *Encyclopedia of Statistical Sciences*, pages 1–4. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, NJ, USA, 2004. ISBN 0471667196. doi: 10.1002/0471667196.ess0041.pub2.
- [224] Ralph B. D’Agostino and Michael A. Stephens. *Goodness-of-Fit-Techniques*, volume v.68 of *Statistics*. CRC Press, New York, 1st ed. edition, 1986. ISBN 978-0824774875. URL <https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=5109112>.
- [225] Christine Müller and Liesa Denecke. *Stochastik in den Ingenieurwissenschaften*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013. ISBN 978-3-642-38959-7. doi: 10.1007/978-3-642-38960-3.
- [226] statista GmbH. Börsenstrompreis am EPEX-Spotmarkt für Deutschland/Österreich von November 2016 bis November 2017, Dezember 2017. URL <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/289437/umfrage/strompreis-am-epex-spotmarkt/>.

# A. Ergänzungen zu den Kapiteln

## A.1. Ergänzungen zu Kapitel 2

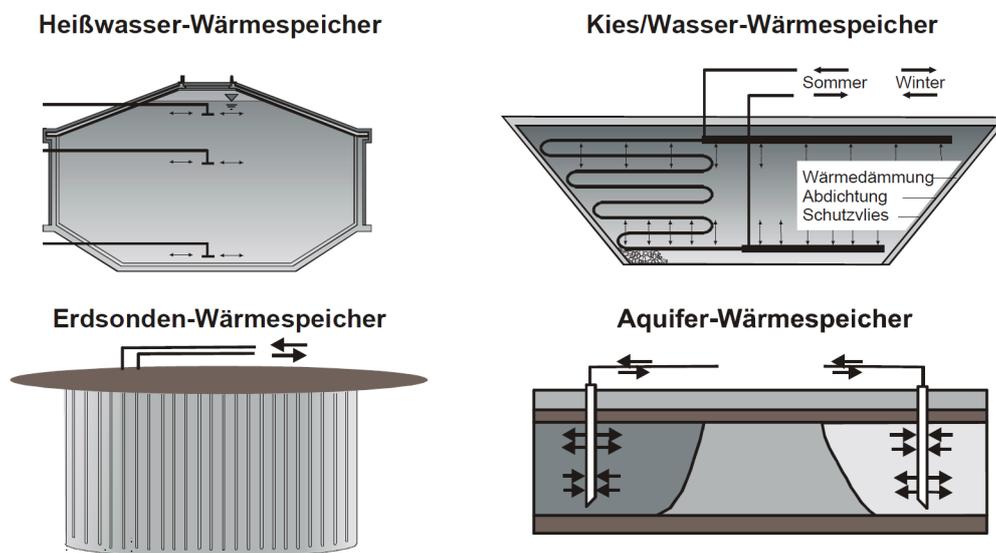


Abb. A.1.: Übersicht von sensiblen thermischen Saisonspeichern, entnommen aus [10]

## A.2. Ergänzungen zu Kapitel 3

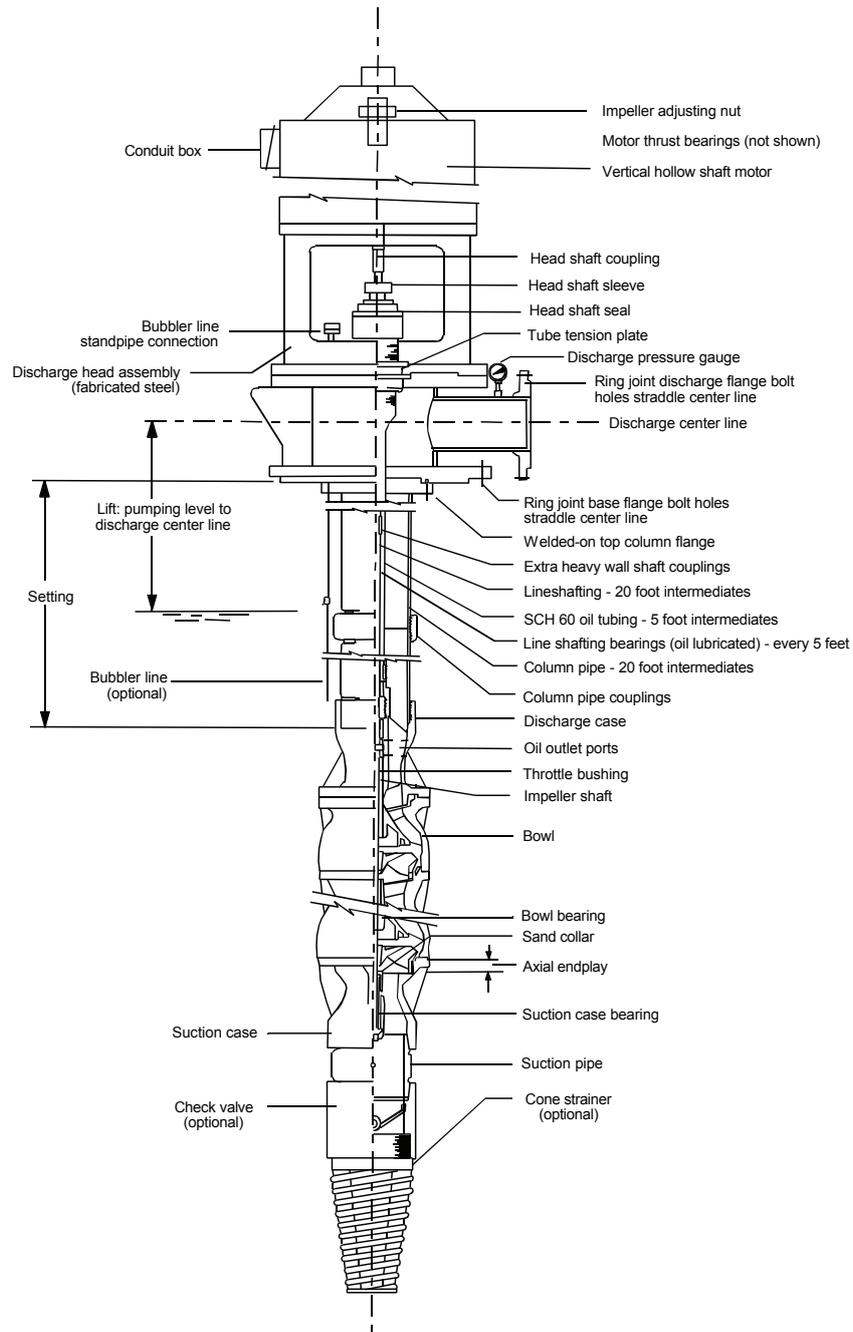
In Abhängigkeit des PH-Wertes, des Redoxpotentials des Bodens, der Temperatur und des Sauerstoffgehaltes gibt es in Zusammenhang mit dem wasserchemischen Gleichgewicht Prädominanzen für verschiedene Prozesse. Eine Übersicht über die relevanten Parameter und deren Prozesse sind in Tabelle A.1 aufgeführt.

**Tab. A.1.:** Relevante *Scaling* und Korrosion verursachende Fluideigenschaften und Parameter, entnommen aus [6]

Relevant parameter	Scaling	Korrosion	Process
O <sub>2</sub>	++	++	Oxidation of plant material (steel/iron) (corrosion) and of dissolved compounds in solution (scaling of oxides)
H <sup>+</sup> (pH value)	+	++	Proton promoted material dissolution (corrosion); or shift of pH in the Pourbaix diagram which moves the compound saturation thus controlling the scaling (most minerals precipitate at higher pH value)
Redox change	+	+	Shift in the Pourbaix diagram; see pH
T-decrease	++	-	Decrease of mineral solubility at decreasing temperature and pressure, resulting in oversaturation of many compounds
p-decrease	+	-	
Fe, Mn	++	+	Facilitated precipitation as oxide/hydroxide, carbonate, sulfide (scaling) <sup>a</sup>
Pb, Zn, Cu	+	+	Precipitation as sulfide or elemental metal (scaling) <sup>a</sup>
Sulfide	+	+	Scaling with metals <sup>a</sup>
Sulfate	+		Scaling with alkaline earths (Ca, Mg, Ba, Sr); especially BaSO <sub>4</sub> is hardly soluble <sup>a</sup>
Cl <sup>-</sup> concentration	-	+	Corrosion (damage of the passivation film of materials)
Dissolved silica	+	+	Scaling as (amorphous) silica; hardly soluble <sup>a</sup>
Dissolved gases: degassing	-	+	Alteration of the pH (see pH effect above)
Dissolved gases: H <sub>2</sub> S	+	++	Interaction of plant materials with protons (corrosion) and of fluid compounds and plant materials with sulfide (scaling)

<sup>a</sup>Corrosion at the scaling–pipe interface.

“+” Signifies a slight effect, “++” a strong effect, and “-” no direct, or very little effect.



**Abb. A.2.:** Beschreibung einer *Line Shaft Pump* (LSP) mit geschlossener, öl-geschmierter Welle, entnommen aus [11]

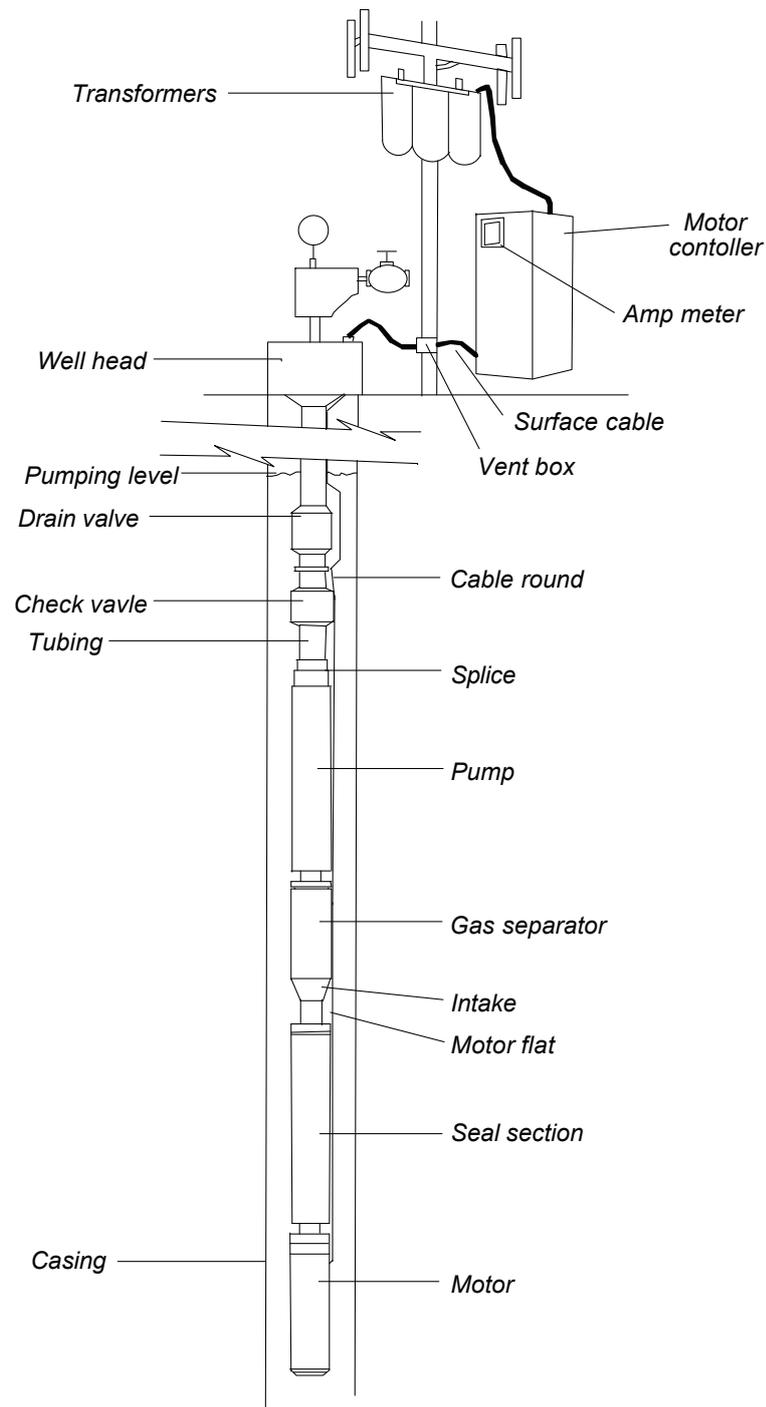


Abb. A.3.: Beschreibung einer *Electrical Submersible Pump* (ESP) mit elektrischem Versorgungskabel, entnommen aus [11]

### A.3. Ergänzungen zu Kapitel 4

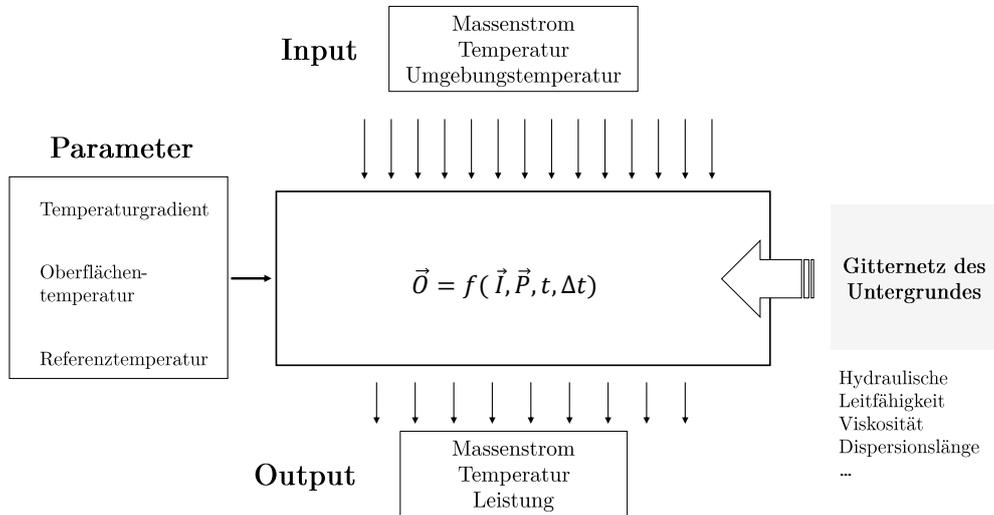


Abb. A.4.: Informationsstruktur des TRNAST-Modells

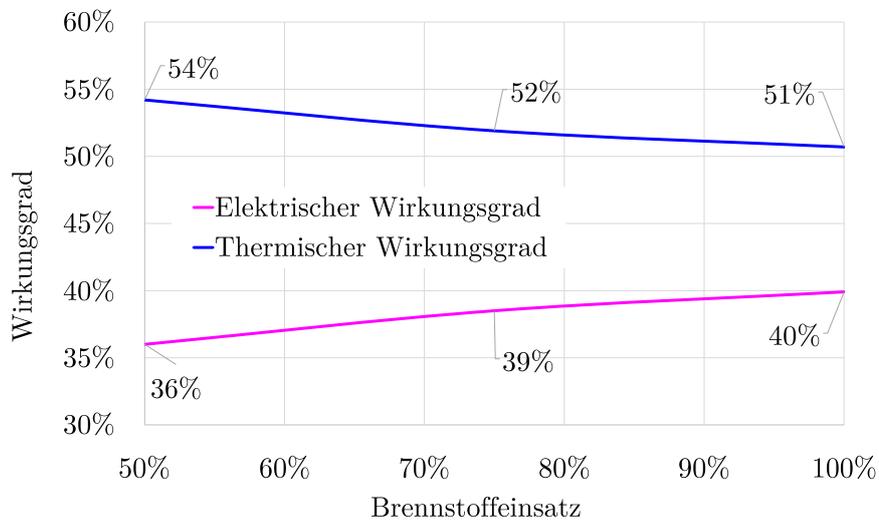
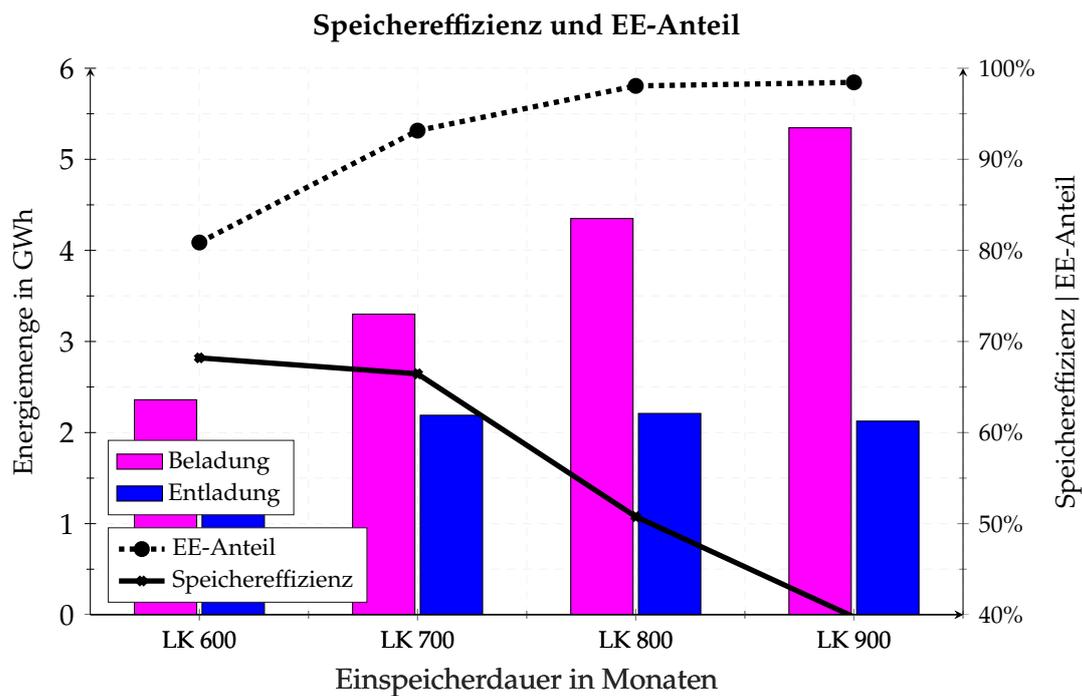


Abb. A.5.: Elektrischer und thermischer Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Brennstoffzufuhr

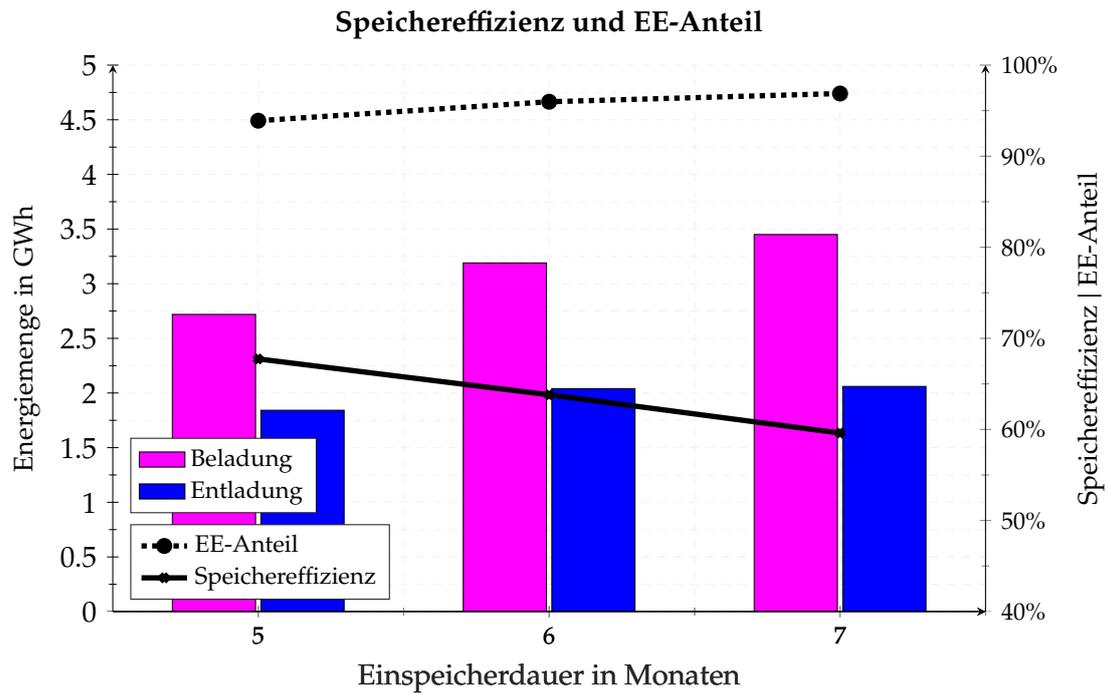
Simulationen, in denen die Regelparameter gegenüber der Referenzsimulation geändert wurden, sind in Tabelle A.2 mit einem \* gekennzeichnet.

**Tab. A.2.:** Thermische und elektrische Leistungen der BHKW-Module für die Simulationsstudie im Nennlastpunkt (100 % Brennstoffzufuhr) und in Summe installierte Leistung beider Module

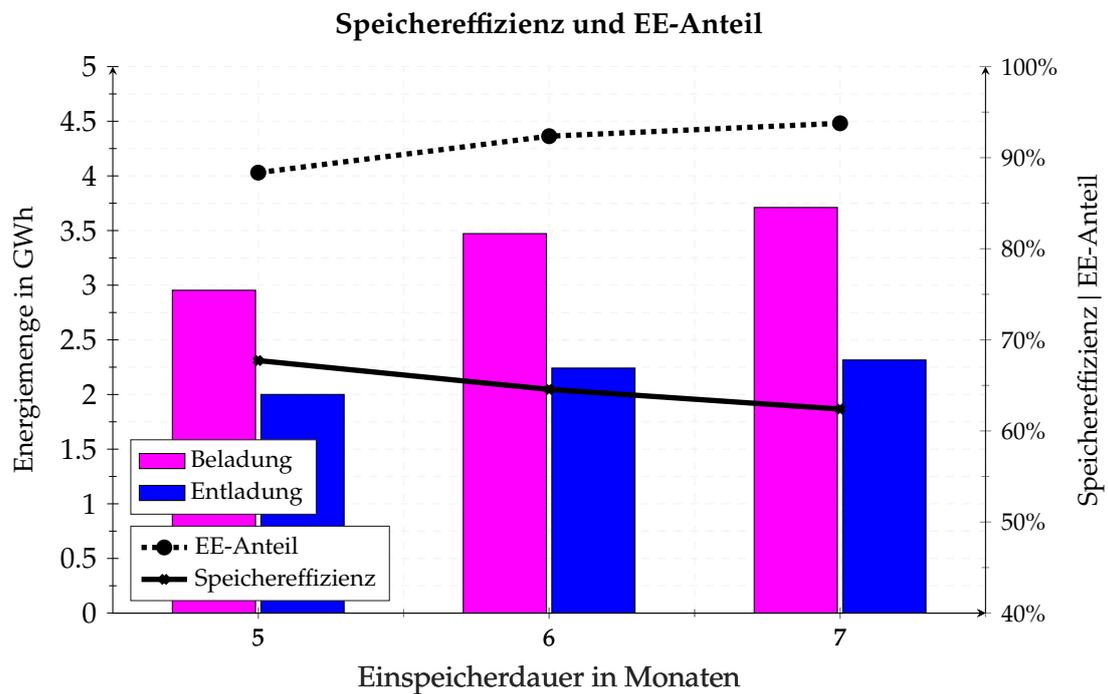
Leistungsklasse	Modulleistung in kW		inst. Leistung in kW	
	thermisch	elektrisch	thermisch	elektrisch
LK 600	600 kW	472 kW	1200 kW	944 kW
Referenz	670 kW	554 kW	1340 kW	1008 kW
LK 700	700 kW	551 kW	1400 kW	1102 kW
800*	800 kW	629 kW	1600 kW	1258 kW
900*	900 kW	708 kW	1800 kW	1416 kW



**Abb. A.6.:** Einfluss der Wärmeleistung der BHKW-Module auf die Be- und Entlademenge, den KWK-Deckungsanteil an der Wärmeversorgung sowie auf die Speichereffizienz (Verhältnis von Entladung zu Beladung), graphische Aufbereitung der Tabelle 4.5

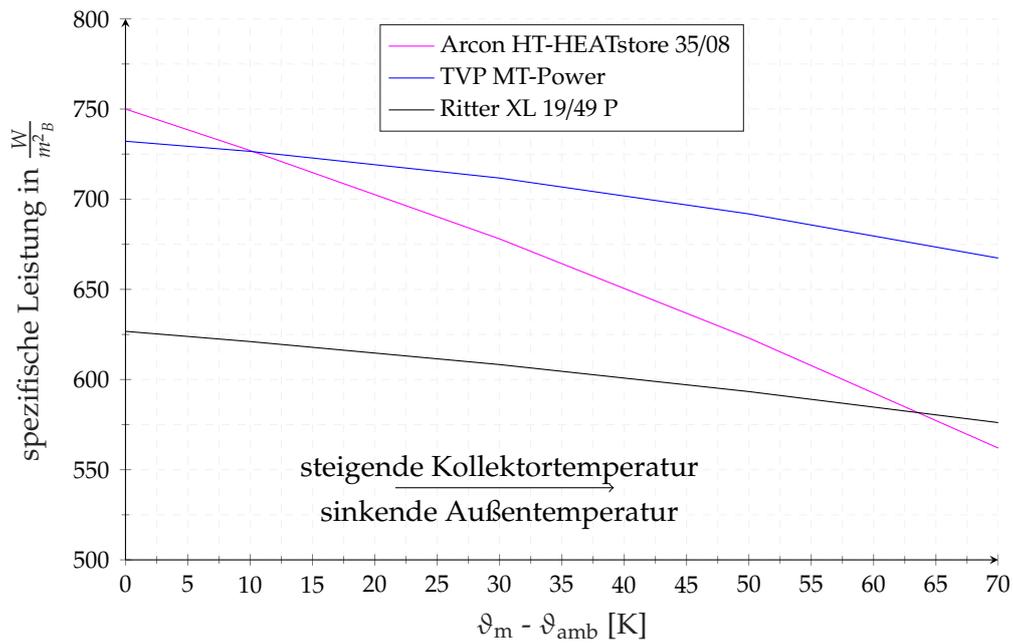


(a) Konzept I (mit Aquifer)



(b) Konzept II (mit Aquifer und Solarthermie)

**Abb. A.7.:** Einfluss der Einspeicherdauer auf das Energiesystem



**Abb. A.8.:** Spezifischer Leistungsverlauf von drei Hochleistungs-Kollektoren für steigende Temperaturdifferenzen bei einer konstanten Globalstrahlung von  $1000 \frac{W}{m^2}$ , zusammengetragen aus den jeweiligen Kollektorzertifikaten des Solar Keymark: <http://www.solarkeymark.dk/CollectorCertificates>  
 SP SC0842-14 (magenta), 011-7S1890 F (blau), 011-7S2425 R (schwarz)

## A.4. Ergänzungen zu Kapitel 5

**Tab. A.3.:** Monatsgemittelte Temperaturen der Messstation Wendisch-Evern (Stations-ID 6093) im Zeitraum zwischen 2004 und 2015 in Grad Celsius, aufbereitete Darstellung getrennt nach Monaten und Jahren

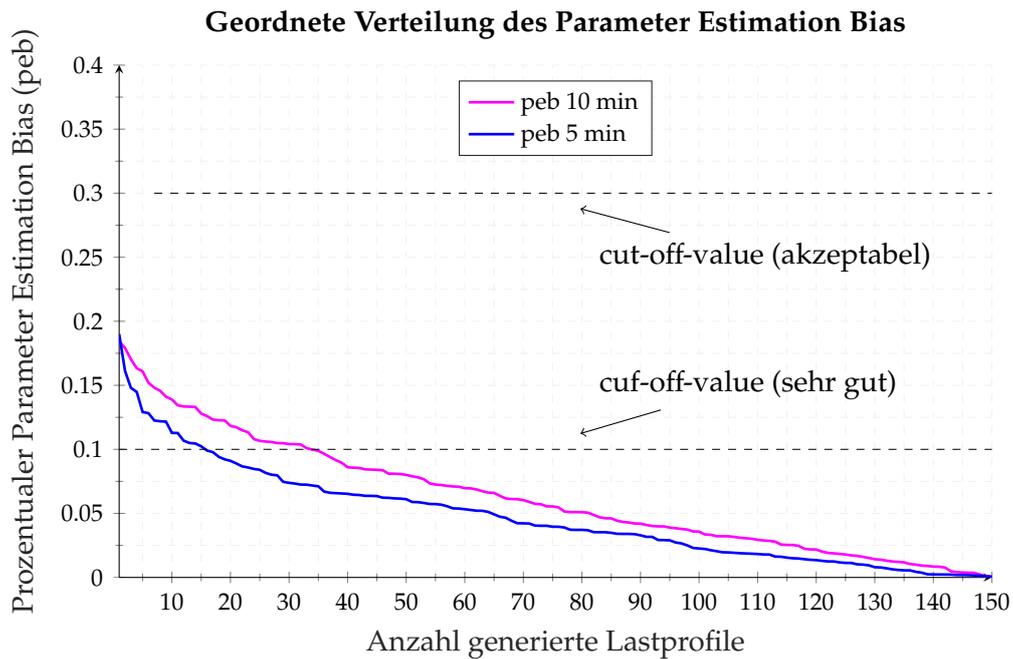
Jahr	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
2004	-0,02	3,09	4,85	9,98	12,0	14,9	16,2	18,7	14,2	9,96	4,93	2,69
2005	3,66	0,2	3,89	9,8	12,6	15,7	18,1	15,8	15,3	11,2	5,04	1,98
2006	-2,11	0,73	1,11	7,96	13,4	16,8	22,6	16,3	17,3	12,6	7,64	5,93
2007	5,39	3,81	7,09	11,5	14,1	17,4	17,2	17,2	13,5	8,51	4,5	2,81
2008	4,37	4,29	4,31	7,99	14,3	17,1	18,0	17,3	13,5	9,93	5,71	2,28
2009	-0,98	0,99	4,88	12,5	13,3	14,1	18,5	18,8	15,2	8,09	7,71	0,51
2010	-4,11	-1,23	4,58	8,85	10,1	16,0	21,4	17,2	13,1	8,5	5,11	-4,18
2011	1,77	0,36	4,14	12,1	13,7	16,8	16,6	17,2	14,9	9,78	4,98	4,63
2012	2,88	-1,59	7,47	7,44	14,5	14,4	17,5	17,6	13,9	9,46	5,39	0,72
2013	0,46	0,68	-0,7	7,39	12,4	15,9	19,0	18,1	13,9	11,1	5,56	4,77
2014	1,95	3,87	6,9	11,0	12,7	15,9	19,9	16,5	15,7	12,9	7,39	2,65
2015	2,92	1,78	5,59	8,2	11,6	14,9	18,5	18,6	13,9	8,57	7,97	7,93
∅	1,35	1,42	4,51	9,56	12,89	15,83	18,63	17,46	14,53	10,06	5,99	2,73

**Tab. A.4.:** Monatsgemittelte Standardabweichung der Temperaturen der Messstation Wendisch-Evern (Stations ID 6093) im Zeitraum zwischen 2004 und 2015, aufbereitete Darstellung getrennt nach Monaten und Jahren

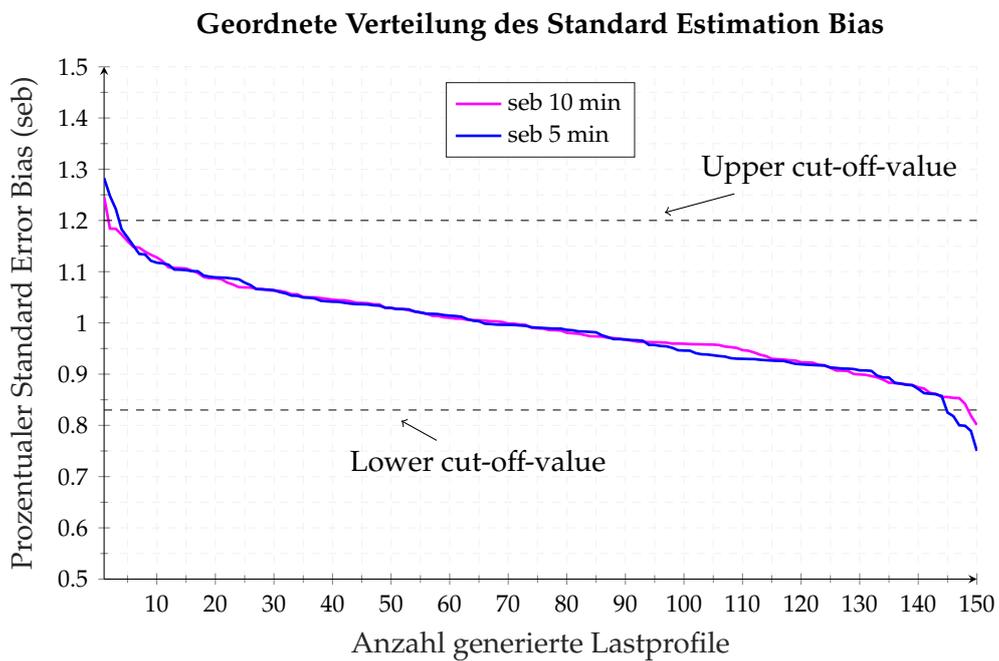
Jahr	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
2004	3,28	4,64	5,01	4,88	4,05	3,62	3,90	4,76	4,16	3,68	3,38	2,94
2005	4,04	3,17	5,78	5,12	5,97	5,32	4,31	3,69	5,13	3,55	4,89	3,20
2006	4,05	2,56	5,31	4,03	4,58	5,41	5,20	3,47	3,76	2,98	3,51	3,16
2007	4,39	3,31	3,93	5,98	4,74	4,41	4,57	4,16	2,98	3,58	3,48	3,99
2008	3,79	3,57	3,61	4,54	5,33	5,32	4,96	3,63	4,12	3,32	3,80	2,80
2009	3,63	2,97	2,73	5,11	4,66	4,44	4,50	4,77	4,26	3,60	2,80	4,85
2010	3,99	3,90	5,78	4,88	4,02	5,08	5,84	3,70	3,11	3,76	4,77	3,58
2011	4,09	4,63	4,69	5,17	5,57	4,72	3,65	3,84	3,93	5,03	4,19	2,65
2012	3,34	6,75	3,85	4,58	5,90	3,98	4,32	4,50	4,24	4,44	2,89	3,87
2013	5,81	3,23	3,75	6,11	4,39	4,63	5,10	4,69	4,20	3,58	3,47	3,07
2014	5,29	4,17	4,17	4,58	5,17	4,62	4,83	4,55	3,59	3,20	3,49	4,12
2015	3,09	2,58	3,63	4,97	4,35	4,71	5,10	4,66	3,79	3,69	4,59	3,13
∅	4,07	3,79	4,35	5,00	4,89	4,69	4,69	4,20	3,94	3,70	3,77	3,45

**Tab. A.5.:** Prozentualer Standardfehler der Temperaturen der Messstation Wendisch-Evern (Stations ID 6093) im Zeitraum zwischen 2004 und 2015, aufbereitete Darstellung getrennt nach Monaten und Jahren

Jahr	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
2004	4,96	7,01	7,57	7,37	6,12	5,47	5,89	7,19	6,29	5,56	5,11	4,44
2005	6,1	4,79	8,73	7,74	9,02	8,04	6,51	5,58	7,75	5,36	7,39	4,84
2006	6,12	3,87	8,02	6,09	6,92	8,17	7,86	5,24	5,68	4,5	5,3	4,77
2007	6,63	5,0	5,94	9,04	7,16	6,66	6,91	6,29	4,5	5,41	5,26	6,03
2008	5,73	5,39	5,45	6,86	8,05	8,04	7,49	5,48	6,23	5,02	5,74	4,23
2009	5,48	4,49	4,13	7,72	7,04	6,71	6,8	7,21	6,44	5,44	4,23	7,33
2010	6,03	5,89	8,73	7,37	6,07	7,68	8,82	5,59	4,7	5,68	7,21	5,41
2011	6,18	7,0	7,09	7,81	8,42	7,13	5,52	5,8	5,94	7,6	6,33	4,0
2012	5,05	10,2	5,82	6,92	8,91	6,01	6,53	6,8	6,41	6,71	4,37	5,85
2013	8,78	4,88	5,67	9,23	6,63	7,0	7,71	7,09	6,35	5,41	5,24	4,64
2014	7,99	6,3	6,3	6,92	7,81	6,98	7,3	6,88	5,42	4,84	5,27	6,23
2015	4,67	3,9	5,48	7,51	6,57	7,12	7,71	7,04	5,73	5,58	6,94	4,73
∅	6,14	5,73	6,58	7,55	7,39	7,08	7,09	6,35	5,95	5,59	5,70	5,21



(a) Absteigend geordnete Verteilung der peb-Werte von 150 generierten Lastprofilen mit verschiedenen Zeitschrittweiten und einer Toleranzgrenze von 30 % bzw. 10 %



(b) Absteigend geordnete Verteilung der seb-Werte von 150 generierten Lastprofilen mit verschiedenen Zeitschrittweiten und Toleranzgrenzen nach [189]

**Abb. A.9.:** Beurteilung der statistischen Güte des MCMC-Temperaturschätzers

## A.5. Ergänzungen zu Kapitel 6

**Tab. A.6.:** Berechnete Zahlungsströme für das Anlagenkonzept I (mit Aquifer) in Euro: Kalkulationszins  $i_K = 2\%$ , Standardlastprofil aus der Machbarkeitsstudie [9], Referenzenergiepreise aus Tabelle 6.5

SJ	$I_0$	Zufluss	Abfluss	Cashflow	Barwert
0	2 057 000		2 057 000	-2 057 000	-2 057 000
1		492 337	430 650	61 687	60 478
2		501 142	430 967	70 175	67 450
3		506 021	431 222	74 799	70 485
4		508 853	431 206	77 647	71 734
5		511 572	431 271	80 301	72 731
6		513 961	431 433	82 528	73 283
7		514 290	430 035	84 255	73 349
8		517 215	431 387	85 828	73 254
9		518 725	431 304	87 421	73 150
10	100 000	520 042	531 376	- 11 334	- 9 297
11		521 003	431 344	89 659	72 109
12		521 510	431 326	90 185	71 110
13		522 608	431 169	91 440	70 686
14		523 899	431 228	92 671	70 233
15		524 462	431 212	93 250	69 286
16		524 929	431 267	93 662	68 228
17		526 069	431 415	94 653	67 598
18		525 985	431 143	94 842	66 404
19		526 560	431 097	95 463	65 529
20		527 001	431 154	95 847	64 502
Kapitalwert:				$C_0 = -744\,701 \text{ €}$	
spez. Speicherkosten:				$SSC = 8,48 \frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$	
zusätzliche Wärmegebungskosten:				$LCOH_{add} = 0,29 \frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$	
mittl. Primärenergiefaktor:				$f_{P,av} = 0,42$	
mittl. Energiebilanz:				$CO_{2,eq,av} = -3515 \frac{\text{l}}{\text{a}}$	

**Tab. A.7.:** Berechnete Zahlungsströme für das Anlagenkonzept II (mit Aquifer und Solarthermie) in Euro: Kalkulationszins  $i_K = 2\%$ , Standardlastprofil aus der Machbarkeitsstudie [9], Referenzenergiepreise aus Tabelle 6.5,  $2000\text{ m}^2$  Flachkollektoren, spez. Investitionskosten Solarthermie  $332\frac{\text{€}}{\text{m}^2_{AP}}$

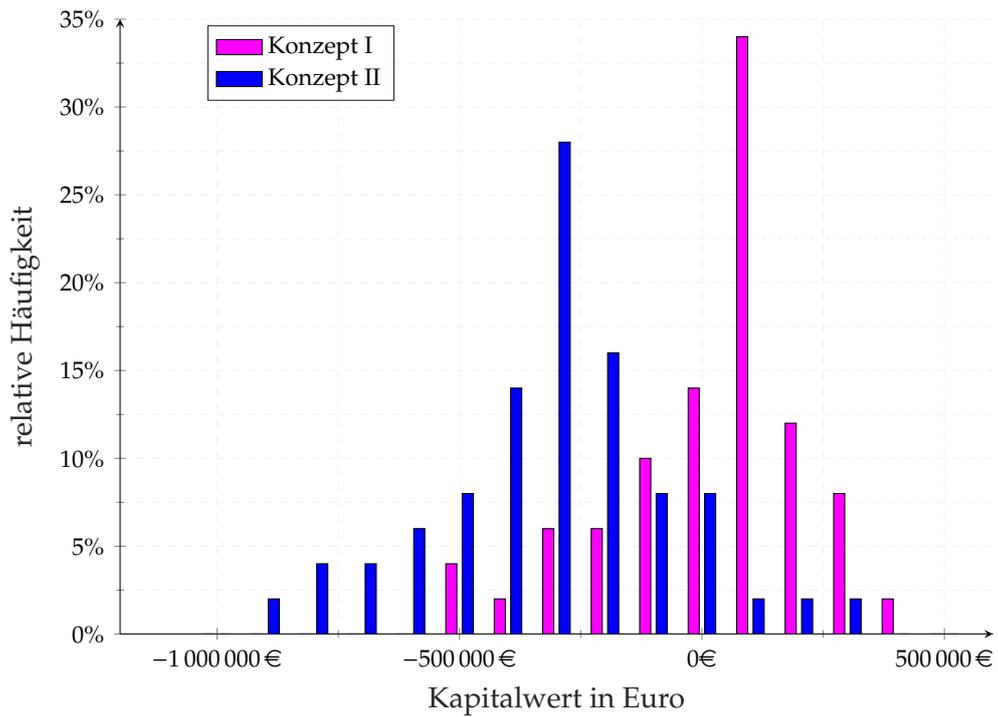
SJ	$I_0$	Zufluss	Abfluss	Cashflow	Barwert
0	2 720 000		2 720 000	-2 720 000	-2 720 000
1		497 471	433 998	63 473	62 228
2		508 497	434 656	73 841	70 974
3		515 291	434 945	80 346	75 711
4		519 764	435 004	84 760	78 305
5		523 223	435 154	88 068	79 766
6		525 178	434 542	90 636	80 482
7		526 417	433 649	92 767	80 760
8		528 319	433 869	94 450	80 612
9		529 559	433 650	95 909	80 252
10	100 000	531 166	533 713	- 2 547	- 2 089
11		532 492	433 931	98 561	79 269
12		534 182	434 781	99 401	78 377
13		534 962	434 589	100 373	77 592
14		535 429	434 642	100 787	76 384
15		536 754	435 234	101 521	75 431
16		537 483	435 442	102 041	74 331
17		537 689	435 611	102 078	72 900
18		537 909	435 633	102 277	71 610
19		538 116	435 731	102 385	70 280
20		538 308	435 775	102 533	69 002
Kapitalwert:				$C_0 = -1\,287\,823\text{ €}$	
spez. Speicherkosten:				$SSC = 5,87\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$	
zusätzliche Wärmegestehungskosten:				$LCOH_{add} = 0,5\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$	
mittl. Primärenergiefaktor:				$f_{P,av} = 0,4$	
mittl. Energiebilanz:				$CO_{2,eq,av} = -3587\frac{\text{t}}{\text{a}}$	

**Tab. A.8.:** Aggregierte Zahlungsströme für das wahrscheinlichste Eintrittsszenario des Anlagenkonzeptes I (mit Aquifer) in Euro: Kalkulationszins  $i_K = 2\%$ , Referenzenergiepreise aus Tabelle 6.5

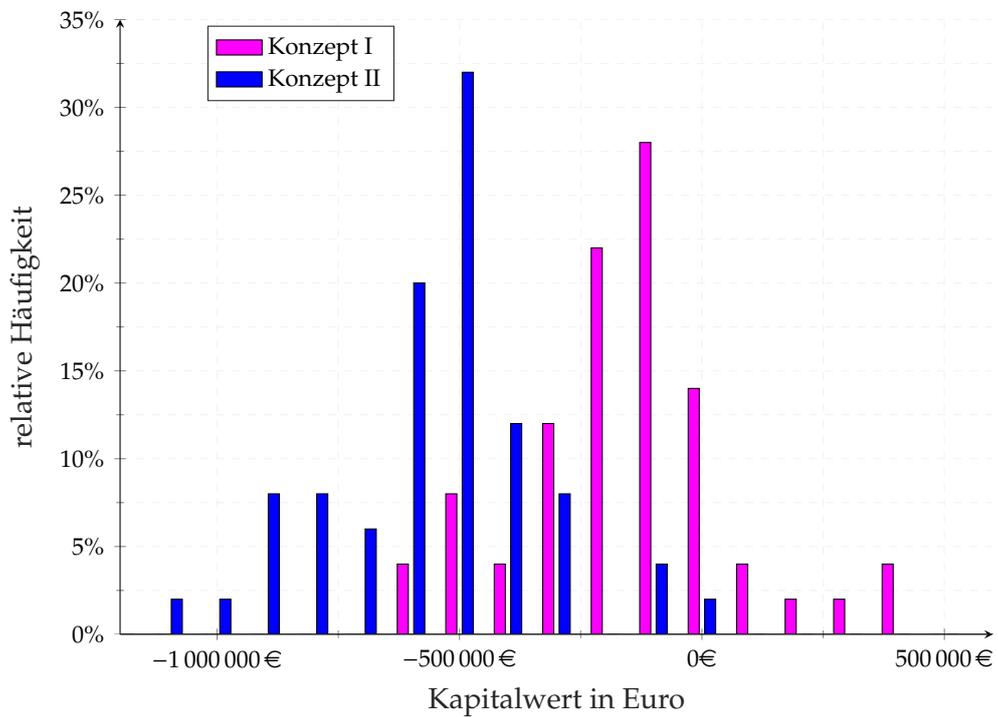
SJ	$I_0$	Zufluss	Abfluss	Cashflow	Barwert
	2057 000		2057 000	-2057 000	-2057 000
1		606 592	535 061	71 533	70 130
2		610 870	526 098	84 836	81 542
3		614 821	520 483	94 280	88 842
4		605 889	510 697	95 146	87 901
5		628 196	522 594	105 598	95 643
6		643 921	542 223	101 706	90 312
7		627 879	518 702	109 167	95 037
8		641 371	525 049	116 355	99 308
9		619 008	518 260	100 718	84 276
10	100 000	643 206	633 727	9 535	7 822
11		631 394	518 012	113 370	91 179
12		621 018	508 742	112 258	88 515
13		653 488	539 346	114 097	88 201
14		623 349	500 428	122 877	93 125
15		631 282	516 214	115 063	85 494
16		644 852	525 254	119 598	87 121
17		633 872	511 759	122 078	87 183
18		640 632	517 769	122 825	85 997
19		630 410	520 569	109 865	75 415
20		633 539	499 656	133 890	90 104
Kapitalwert:				$C_0 = -383\,854 \text{ €}$	
spez. Speicherkosten:				$SSC = 6,78 \frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$	
zusätzliche Wärmegestehungskosten:				$LCOH_{add} = 0,17 \frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$	
mittl. Primärenergiefaktor:				$f_{P,av} = 0,34$	
mittl. Energiebilanz:				$CO_{2,eq,av} = -3744 \frac{\text{t}}{\text{a}}$	

**Tab. A.9.:** Aggregierte Zahlungsströme für das wahrscheinlichste Eintrittsszenario des Anlagenkonzeptes II (mit Aquifer und Solarthermie) in Euro: Kalkulationszins  $i_K = 2\%$ , Referenzenergiepreise aus Tabelle 6.5, 2000  $m^2$  Flachkollektoren, spez. Investitionskosten Solarthermie  $332 \frac{\text{€}}{m^2_{AP}}$

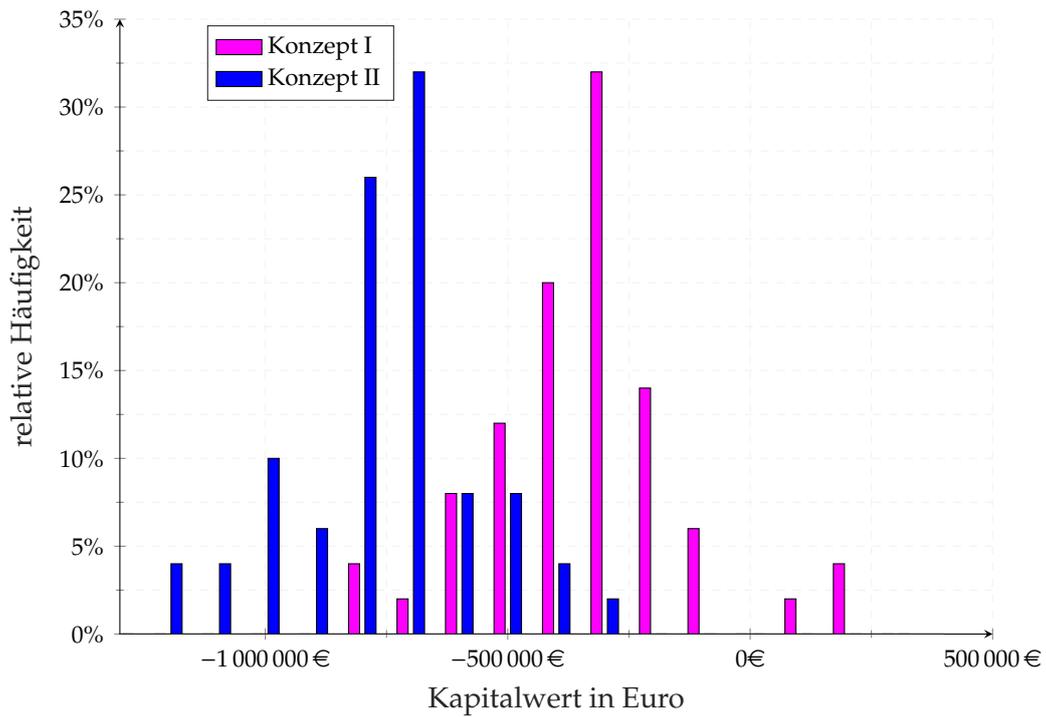
SJ	$I_0$	Zufluss	Abfluss	Cashflow	Barwert
0	2720 000		2720 000	-2720 000	-2720 000
1		587 235	514 629	72 636	71 212
2		632 981	536 576	96 415	92 671
3		629 167	521 426	107 791	101 574
4		629 180	520 120	109 124	100 814
5		643 230	523 800	119 348	108 098
6		669 210	547 903	121 329	107 737
7		645 515	519 476	126 055	109 738
8		664 956	532 346	132 640	113 207
9		642 266	524 177	118 055	98 783
10	100 000	664 730	637 227	27 449	22 518
11		646 748	520 021	126 681	101 885
12		636 710	513 717	122 991	96 978
13		679 335	548 090	131 248	101 459
14		641 539	506 544	134 999	102 312
15		652 096	520 732	131 428	97 653
16		663 627	527 723	135 970	99 047
17		666 966	526 966	139 964	99 957
18		666 423	526 705	139 704	97 815
19		658 319	532 953	125 336	86 034
20		662 888	511 276	151 625	102 039
Kapitalwert:				$C_0 = -808\,469 \text{ €}$	
spez. Speicherkosten:				$SSC = 4,71 \frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$	
zusätzliche Wärmegestehungskosten:				$LCOH_{add} = 0,36 \frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$	
mittl. Primärenergiefaktor:				$f_{P,av} = 0,30$	
mittl. Energiebilanz:				$CO_{2,eq,av} = -3855 \frac{\text{t}}{\text{a}}$	



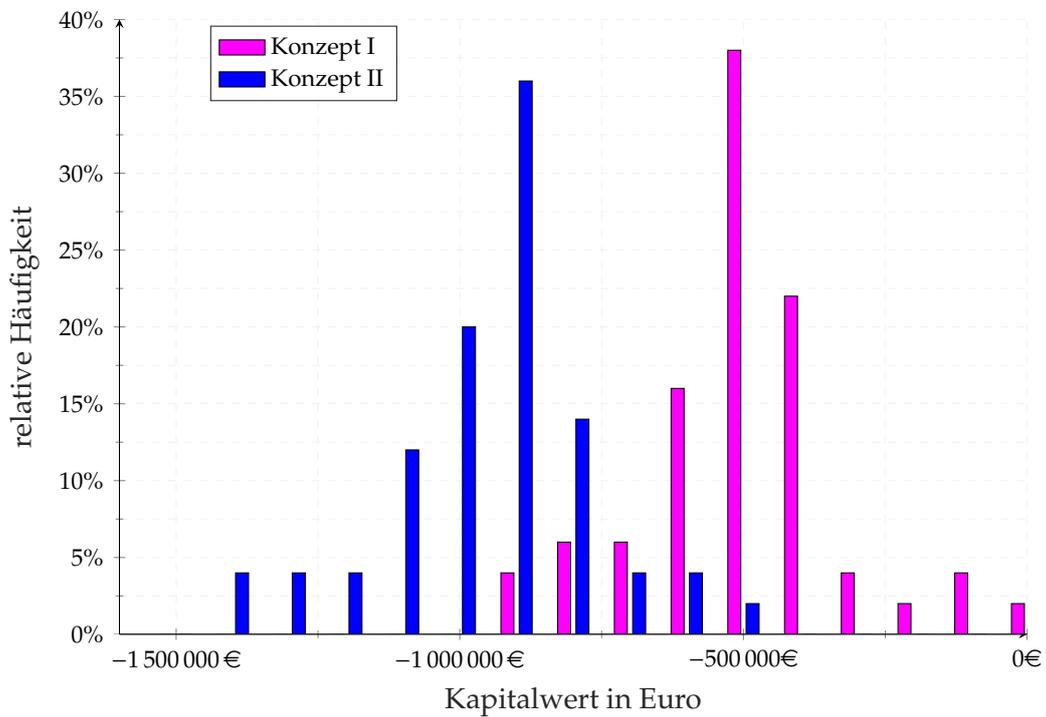
(a) Kalkulationszins  $i_K = 0\%$



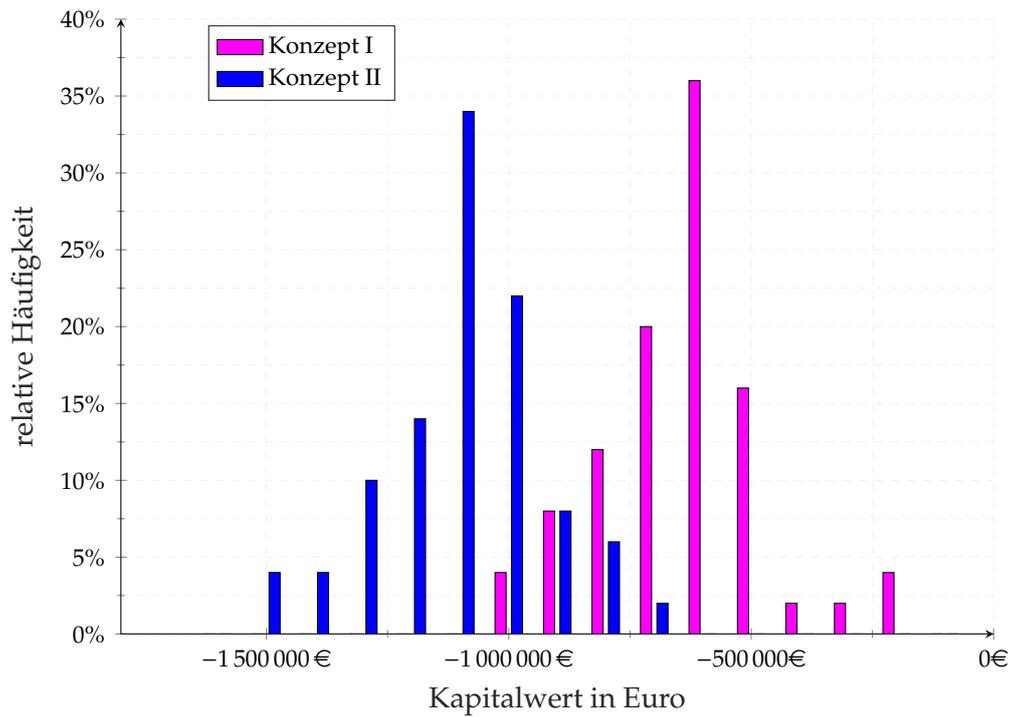
(b) Kalkulationszins  $i_K = 1\%$



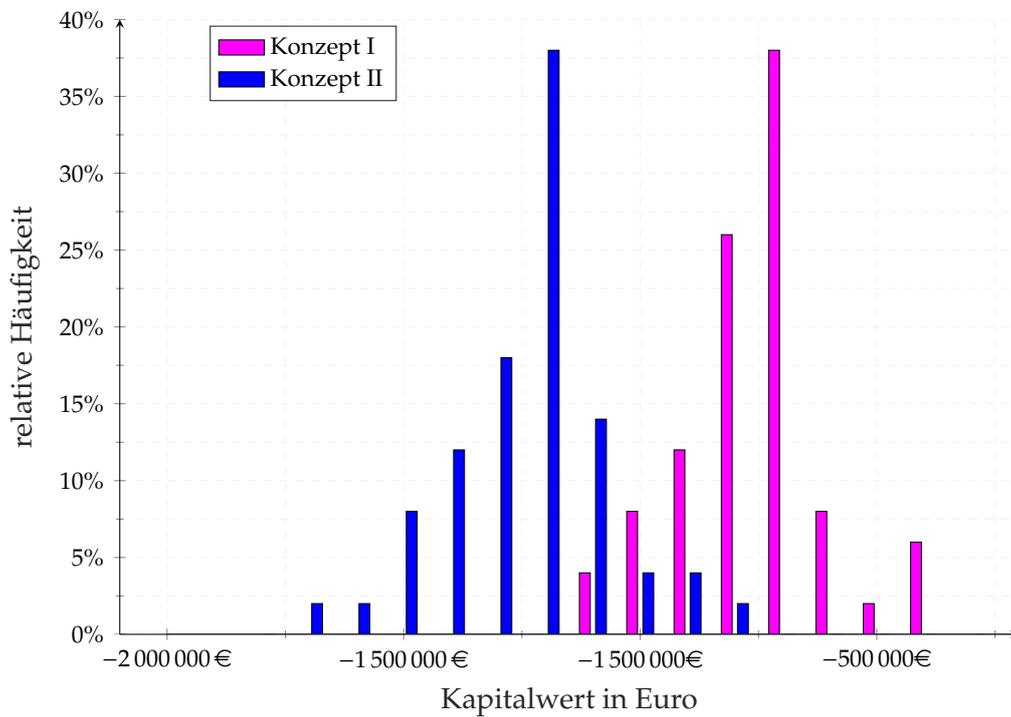
(c) Kalkulationszins  $i_K = 2\%$



(d) Kalkulationszins  $i_K = 3\%$



(e) Kalkulationszins  $i_K = 4\%$



(f) Kalkulationszins  $i_K = 5\%$

Abb. A.8.: Verteilung der Kapitalwerte in Abhängigkeit des Kalkulationszinssatzes

Thermische Gebäude- und Anlagensimulation

**LEUPHANA Universität Lüneburg**  
**Neubau Zentralgebäude**

**Stand 01.07.2015**

**Energie- und Prozesstechnik Aachen GmbH**

Jülicher Straße 338, 52070 Aachen

Tel.: 0241 / 15 90 9-0, Fax: 0241 / 15 90 9-29

[www.epa-aachen.de](http://www.epa-aachen.de)

Dr.-Ing. H.J. Röttger

Dipl.-Ing. (FH) T. Schild, M.B.A.

[hjr@epa-aachen.de](mailto:hjr@epa-aachen.de)

[ts@epa-aachen.de](mailto:ts@epa-aachen.de)

# 1. Inhaltsverzeichnis

1.	Inhaltsverzeichnis.....	II
2.	Abbildungsverzeichnis.....	IV
3.	Tabellenverzeichnis.....	V
1.	Aufgabenstellung .....	1
2.	Simulationssoftware DOE2.E .....	1
2.1.	Software .....	1
2.2.	Modellaufbau .....	2
3.	Randbedingungen.....	2
3.1.	Lage des Gebäudes.....	2
3.2.	Wetterdaten .....	3
3.3.	Geometrie.....	3
3.4.	Bauphysik.....	4
3.4.1.	Bauteile .....	4
3.4.2.	Verglasung .....	5
3.5.	Anlagentechnik .....	6
3.5.1.	Heizungsanlage .....	6
3.5.2.	Kaltwasseranlage.....	6
3.5.3.	Lüftungs-/Klimaanlagen .....	6
3.5.4.	Energieversorgung .....	8
3.6.	Nutzung.....	9
3.6.1.	Nutzungsarten .....	9
3.6.2.	Nutzungsprofile.....	10
4.	Simulationsergebnisse.....	15
4.1.	Übersicht über die Simulations-Varianten .....	15
4.2.	Energiebedarf der Räume (Loads) .....	16
4.3.	Anlagentechnik .....	18
4.3.1.	Heizungsanlage .....	18
4.3.2.	Lüftungstechnik.....	20
4.4.	Gebäudeenergiebedarf Variante A - 50 % Belegung bei Veranstaltungen .....	22
4.5.	Gebäudeenergiebedarf Variante B - 100 % Belegung bei Veranstaltungen .....	24

4.6.	Simulationsergebnisse und Variantenvergleich .....	26
4.7.	Potential der E-Control-Verglasung.....	27
4.8.	Potential der Nachtauskühlung .....	28
4.9.	Potential der Kaltwassererzeugung mittels Freikühlturm .....	30
5.	Fazit.....	31

## 2. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verlauf Außenwerte für Lüneburg.....	3
Abbildung 2: Skizze der Geometrie, Aufsicht und Bauteilübersicht .....	4
Abbildung 3: Lastprofil Personen (allgemein).....	11
Abbildung 4: Lastprofile Hörsaal / Veranstaltung .....	11
Abbildung 5: Lastprofil Gastronomie - Personen .....	12
Abbildung 6: Lastprofil Gastronomie - Licht und Geräte.....	12
Abbildung 7: Lastprofil Ausstellungsbereich .....	13
Abbildung 8: Lastprofil Seminarbereich.....	13
Abbildung 9: Lastprofil Maschinenhalle UG.....	14
Abbildung 10: Lastprofil dauerbetriebener Geräte .....	14
Abbildung 11: Verteilung der Kühllast auf die Hauptenergieströme.....	17
Abbildung 12: Verteilung der Heizlast auf die Hauptenergieströme .....	17
Abbildung 13: Monatswerte der maximalen Leistung statischer Heizkreise.....	19
Abbildung 14: Monatswerte des Wärmebedarfs statischer Heizkreise.....	19
Abbildung 15: Leistungsbedarf der Lüftungstechnik.....	21
Abbildung 16: Energiebedarf der Lüftungstechnik.....	22
Abbildung 17: Lastgang Wärmebedarf Neubau (Var. A) .....	22
Abbildung 18: Lastgang Kältebedarf Neubau (Var. A) .....	23
Abbildung 19: Lastgang elektrische Energie Neubau (Var. A) .....	23
Abbildung 20: Lastgang Wärmebedarf Neubau (Var. B) .....	24
Abbildung 21: Lastgang Kälteenergie Neubau (Var. B).....	25
Abbildung 22: Lastgang elektrische Energie Neubau (Var. B) .....	25

### 3. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bauteilliste und U-Werte .....	4
Tabelle 2: Nutzungsarten und -parameter .....	9
Tabelle 3: Lastprofilzuordnung zu den Nutzungsarten .....	10
Tabelle 4: Verteilung der thermischen Lasten auf die Energiequellen/-senken.....	18
Tabelle 5: Auslegungseckdaten der Lüftungstechnik .....	20
Tabelle 6: Variantenvergleich des Energiebedarfs der Lüftungstechnik .....	21
Tabelle 7: Variantenvergleich des Energiebedarfs des Gebäudes.....	26
Tabelle 8: Spezifische Verbrauchskennwerte des Gebäudes .....	26
Tabelle 9: Variantenvergleich des Energiebedarfs mit und ohne E-Control-Verglasung .....	27
Tabelle 10: Einfluss der E-Control-Verglasung auf die thermische Behaglichkeit .....	28
Tabelle 11: Vergleich des Energiebedarfs der Variante B mit und ohne Nachtkühlbetrieb (NK)...	28
Tabelle 12: Einfluss des Nachtkühlbetriebs auf die thermische Behaglichkeit .....	29

## **1. Aufgabenstellung**

Die Liegenschaft der LEUPHANA Universität Lüneburg wird um einen Neubau erweitert, welcher in das bestehende Energieversorgungssystem eingebunden werden soll. Um den Leistungs- und Energiebedarf des Gebäudes und damit die Auswirkungen auf die Energieversorgung der Liegenschaft abschätzen zu können, soll eine thermische Gebäude- und Anlagensimulation erstellt werden. Die Ergebnisse dienen zudem der Plausibilisierung der Planung und Absicherung der Investitionen in effiziente Energietechnik.

In diesem Bericht werden die Grundlagen der Simulation festgehalten und die Simulationsergebnisse dargestellt und ausgewertet.

## **2. Simulationssoftware DOE2.E**

### **2.1. Software**

Die Analyse der Energieströme in Gebäuden und Produktionsprozessen gewinnt mit der Verteuerung der Energie und der an Bedeutung zunehmenden ökologischen Betrachtungsweise eine immer höhere Bedeutung. Voraussetzung für eine Analyse ist allerdings eine möglichst genaue Kenntnis über alle Energieströme. Diese können heute mit dynamischen Simulationsprogrammen rechnerisch ermittelt werden, wobei sowohl die Komplexität der physikalischen Zusammenhänge als auch komplizierte geometrische Bedingungen umfassend abgebildet werden können.

Die verwendete DOE-Software ist ein solches Programm zur thermischen Simulation von Gebäuden und Anlagen. Mit ihr lassen sich Heiz-, Kühl- und Strombedarf in den einzelnen Räumen eines Gebäudes unter Berücksichtigung der individuellen technischen Ausrüstung in Abhängigkeit von den Außenbedingungen (Lufttemperatur, Luftfeuchte, Wind u. ä.) unter Verwendung von Wetterdatensätzen und der Nutzung ermitteln. Hierbei werden äußere und innere Energiequellen, wie Sonneneinstrahlung, Bewölkung und Beschattung, sowie Nutzer, Beleuchtung und Maschinen, berücksichtigt.

Die DOE-Datenbank enthält für das so genannte Testreferenzjahr (TRY) Wetterdatensätze von über 60 Städten. Diese Testreferenzjahre bilden ein statistisch repräsentatives, aus einem Datenzeitraum von zehn Jahren ermitteltes, Wetterszenario für die jeweilige Region ab. Mit der DOE-Software kann gerade das zeitliche Zusammenspiel der einzelnen Energieflüsse unter Berücksichtigung von realistischen Nutzungs- und Ferienzeiten im Zusammenhang analysiert werden, um den Gesamtprozess darzustellen.

Die DOE-Software erlaubt neben der Berechnung der Energieflüsse im Gebäude und damit auch der

Gesamtlasten im Jahresgang auch die Simulation von TGA-Anlagen bis hin zu den Wärme-, Kälte- und Stromerzeugungsanlagen im Zusammenspiel mit den Antworten des Gebäudes zu analysieren. Hier können die unterschiedlichen Komponenten optimiert und entsprechend dimensioniert werden, um einen möglichst geringen Primärenergieeinsatz zu realisieren.

## **2.2. Modellaufbau**

Das Modell basiert auf der Definition von Bilanzgrenzen (Zonen). Die physikalischen Eigenschaften der Zonen werden mittels spezifischer Syntax programmiert und so Geometrie und physikalische Eigenschaften aufgeprägt. Anhand der Sollwerte der einzelnen Zone und der durch die Nutzung initiierten Energieströme wird für jede Stunde bilanziert, welcher Energiebedarf zur Einhaltung der vorgegebenen Grenzwerte benötigt wird (Loads). Die Bilanzierung basiert auf einer fiktiven Zählertopologie (Meters).

Die Deckung des Energiebedarfs hängt von der technischen Ausstattung der Zonen (Systems) und deren Dimensionierung ab. Ebenso werden Einflüsse der Regelungstechnik abgebildet, die auf unterschiedlichen Führungsgrößen aufbauend unter Berücksichtigung systemspezifischer Besonderheiten und Betriebszuständen implementiert werden kann. Die Räume werden der technischen Ausstattung entsprechend zu Systems zusammengefasst, weshalb die resultierenden Systems nicht unbedingt in Art und Anzahl der geplanten Gebäudetechnik entsprechen.

Durch Bilanzierung der Loads und Systems wird der Energiebedarf der Zone in den Energiebedarf der Anlagentechnik überführt. Daraus ergibt sich der Lastgang für die Energiebereitstellung (Plants).

## **3. Randbedingungen**

### **3.1. Lage des Gebäudes**

geographische Breite = 50.1194

geographische Länge = -8.6622

Höhenlage = 110.

Zeitzone = MEZ

Azimut = 135.

### 3.2. Wetterdaten

Als Wetterdatensatz wird das nach Abbildung 1 für die Region Lüneburg geltende Testreferenzjahr angewendet. Dieses entspricht dem Testreferenzjahr von Hamburg für den Zeitraum 01.01.2010 bis 31.12.2010.

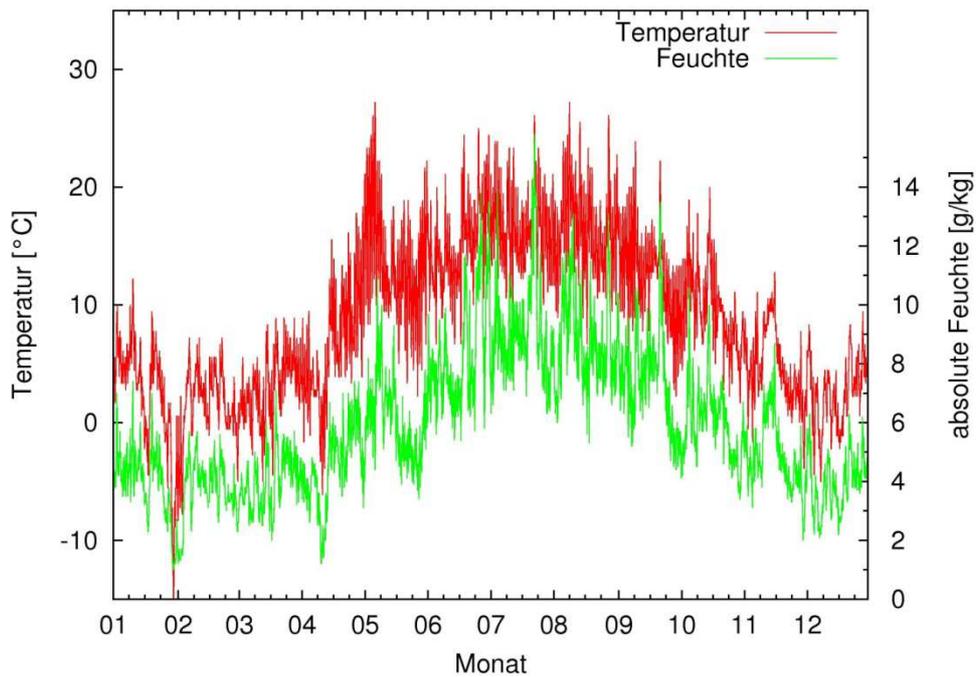


Abbildung 1: Verlauf Außenwerte für Lüneburg

### 3.3. Geometrie

Das Gebäude besteht aus vier Gebäudeteilen:

- dem Forschungszentrum (FZ) als zentraler und höchster Teil
- dem Seminarzentrum (SE) mit Ausstellungs- und Seminarflächen
- dem Auditorium (AU) als Veranstaltungsbereich
- dem Studierendenzentrum (SU) mit Lehr- und Lernflächen, sowie der Gastronomie

Abbildung 2 zeigt die komplexe und amorphe Geometrie und die Ausrichtung der Gebäudeteile zueinander. Die Außenwände sind teilweise geneigt, Fensterflächen nur bezüglich etwaiger

Brüstungshöhen gleichmäßig verteilt, ansonsten in Form und Lage an den Notwendigkeiten der Statik sowie der architektonischen Gestaltung orientiert.

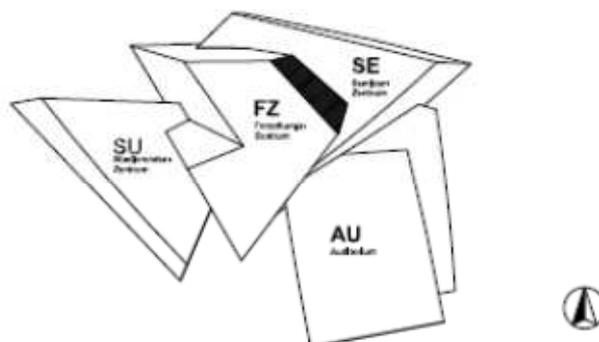


Abbildung 2: Skizze der Geometrie, Aufsicht und Bauteilübersicht

Das Gebäudemodell ist in guter Näherung an die Grundrisse des Neubaus (Stand August 2011) entwickelt worden und bildet die geometrischen Verhältnisse soweit erforderlich ab.

### 3.4. Bauphysik

#### 3.4.1. Bauteile

Das Gebäudemodell enthält die in Tabelle 1 aufgeführte Bauteilen und deren U-Werte. Der Schichtaufbau wurde der Entwurfsplanung entnommen:

Tabelle 1: Bauteilliste und U-Werte

Bauteil	Bauteil-Kürzel	U-Wert (W/m <sup>2</sup> K)
Bodenplatte gegen Erdreich	UG-BP	0,284
Deckenaufbau UG bis Mitte Beton	UG-DE	2,014
Außenwand UG gegen Erdreich	UG-AWE	0,19
Außenwand UG gegen Außenluft	UG-AW	0,19
Innenwand UG Kalksandstein	UG-IW	2,938
Boden EG zu UG bis Mitte Beton	EG-BO	1,94
Deckenaufbau EG bis Mitte Beton - mit Abhangdecke	EG-DA	2,116
Deckenaufbau EG bis Mitte Beton - Betonuntersicht	EG-DB	5,975

Bauteil	Bauteil-Kürzel	U-Wert (W/m <sup>2</sup> K)
Boden OG zu OG bis Mitte Beton	OG-BO	1,871
Deckenaufbau OG bis Mitte Beton - mit Abhangdecke	OG-DA	1,888
Deckenaufbau OG bis Mitte Beton - Betonuntersicht	OG-DB	4,454
Außenwand Fassade Typ 1	F1	0,108
30er Innenwand	IW30	1,519
24er Innenwand	IW24	1,802
115er Innenwand	IW11	2,946
Dach (Gründach)	DACH	0,468

### 3.4.2. Verglasung

Die Verglasung des Gebäudes wird in Abhängigkeit der Fassadenausrichtung ausgeführt:

- südlich ausgerichtete Fassaden des Forschungszentrums mit Bandfenstern werden mit einer E-Control-Verglasung ausgestattet,
- alle weiteren Fassaden werden mit einer 3-Scheiben Wärmeschutzverglasung ausgestattet.

Die E-Control Verglasung ist eine 3-Scheiben-Verglasung mit elektronisch umschaltbaren Durchlassgraden. Im Gebäudemodell ist diese Verglasung implementiert. Dazu ist je eine Verglasung für den höchsten (entspricht 0 % Sonnenschutz) und niedrigsten Durchlassgrad (entspricht 100 % Sonnenschutz) definiert, zwischen denen die optischen Werte linear interpoliert werden. Die Steuerung erfolgt raumweise in Abhängigkeit von der Außentemperatur mit einem Gleitbereich zwischen 20 °C und 26 °C.

Die Wärmeschutzverglasung wird ebenfalls als 3-Scheiben-Verglasung modelliert. Für beide Fenstertypen ist es zudem erforderlich, einen Blendschutz vorzusehen, da die Strahlungsintensität und der Sonnenstand unabhängig von der Außentemperatur sowohl in den frühen Morgenstunden als auch am Nachmittag zu erheblicher Blendung an den Arbeitsplätzen führen kann.

Es wird angenommen, dass die thermischen Eigenschaften beider Fenstertypen vergleichbar sind und sich diese lediglich hinsichtlich der Strahlungseigenschaften unterscheiden. Aus diesem Grund wird die E-Control-Verglasung zunächst für das gesamte Gebäude eingesetzt und gesondert ausgewertet. In Abhängigkeit der Ergebnisse kann eine raumweise Differenzierung nachgeführt werden.

## **3.5. Anlagentechnik**

Die Anlagentechnik umfasst Heizungs- (siehe HZG99) und Lüftungsanlagen (siehe RLT01-04), sowie vereinzelte Umluftkühlgeräte in besonderen Räumen mit erhöhten Wärmelasten (siehe RLT05).

### **3.5.1. Heizungsanlage**

Die Heizungsanlage besteht aus dem direkten Nahwärmeanschluss über den Heizkörper und Fußbodenheizung mit Wärme versorgt werden. Die Regelung erfolgt lokal durch Heizkörperthermostatventile.

Die Vorlauftemperatur der Heizungsanlage wird bei Außentemperaturen im Bereich von -10 bis 16 °C (September bis Mai) witterungsgeführt geregelt. Zudem ist eine Nacht- und Wochenendabsenkung vorgesehen, die ein Abkühlen der Raumtemperatur auf 17 °C zulässt. Die nutzungsartspezifischen Auslegungstemperaturen sind in Tabelle 2 aufgeführt, die Auslegungs-Außentemperatur beträgt -10 °C.

### **3.5.2. Kaltwasseranlage**

Die Kaltwasserversorgung erfolgt indirekt über das Nahkältenetz der Liegenschaft, sekundärseitig wird eine Vorlauftemperatur von 16 °C sichergestellt. Die Auslegung des Kaltwassernetzes im Gebäude erfolgt mit einer Spreizung von 3 K (16 °C/19 °C).

Verbraucher sind die Lüftungsanlagen, Umluftkühlgeräte und Kühldecken. Die Regelung erfolgt über den Massenstrom.

Die Auslegungstemperaturen für die Berechnung des Kühlbedarfs liegen bei 26 °C Raumtemperatur bei 32 °C Außentemperatur gemäß VDI-Richtlinie.

### **3.5.3. Lüftungs-/Klimaanlagen**

Im Gebäudemodell werden die Räume unterschiedlichen Systemen (z.B. Lüftungsanlagen) zugeordnet. Diese Zuordnung spiegelt jedoch nicht 1:1 die Zuordnung zu den späteren Anlagen wieder, sondern sie folgt einer Klassifizierung nach der technischen Ausstattung. So muss ein Raum mit mechanischer Be- und Entlüftung und Kühldecken einem anderen System zugeschlagen werden als ein Raum, der zwar später über die gleiche Lüftungsanlage versorgt wird, jedoch nicht über eine Kühldecke verfügt. Aus diesem Grund kann die Zusammenstellung nachfolgend beschriebener Lüftungs- und Klimaanlagen von der der Gebäudeplanung abweichen.

Alle Lüftungsanlagen werden mit folgenden Eckdaten simuliert:

- Heizmedium 55 °C / 35 °C
- Kühlmedium 16 °C / 19 °C
- Nachtauskühlung

Neben der Betriebszeit am Tag ist ein Nachtkühl-Modus vorgesehen, der die nächtlich kühle Außenluft zur Kühlung der Gebäudemasse verwendet. Dieser Modus kann in der Zeit von 23:00 bis 04:00 Uhr eingeschaltet werden, wenn die Raumtemperaturen über dem Sollwert liegen (also Kühlbedarf herrscht) und die Außentemperatur zugleich 3 K unter der Raumtemperatur liegt.

### **RLT 01 - Hörsaal / Auditorium**

Diese Lüftungsanlage ist als Variable-Volumenstrom-Anlage modelliert (geplant ist eine bedarfsgeführte, manuelle Anpassung des Volumenstroms). Die Betriebszeit ist täglich in der Zeit von 08:00 bis 20:00 Uhr. Der Volumenstrom ergibt sich aus dem Lüftungsbedarf im Raum (z.B. VOC oder CO<sub>2</sub>-Überwachung). Der Außenluftanteil ist Enthalpie-abhängig zwischen 50 und 100 % geregelt. Der versorgte Bereich umfasst ca. 965 m<sup>2</sup>, der von bis zu 640 Personen (Variante A) bzw. 1280 Personen (Variante B) genutzt wird.

### **RLT 02 - Seminarräume**

Mit dieser Anlage wird der Seminarbereich im Bauteil SE versorgt. Diese Anlage beinhaltet neben der mechanischen Lüftung auch Kühldecken. Diese werden als zusätzliches Kühlregister begrenzter Leistung in jedem Raum abgebildet, so dass die Lüftungsanlage nur den hygienisch erforderlichen Luftvolumenstrom aufbereitet und fördert, im Raum selbst aber zusätzliche Kühlleistung zum Abtransport von Wärme durch ein wasserführendes System zur Verfügung steht. Der versorgte Bereich umfasst ca. 810 m<sup>2</sup>, der von bis zu 400 Personen genutzt wird.

### **RLT 03 - Gastronomie**

Diese Lüftungsanlage ist aufgrund der besonderen Anforderungen von Gastronomie und Küche als Konstant-Volumenstrom-Anlage mit 100 % Außenluftanteil abgebildet. Das Modell der Anlage beinhaltet die Ventilatoren, Erhitzer, Kühler und eine Wärmerückgewinnung, die aufgrund der Wrasenabluft nur mit einem Teil des Abluft-Volumenstroms (ca. 30 %) durchströmt ist. Der Wärmerückgewinnungsgrad wird deshalb mit 25 % (bezogen auf den Gesamtvolumenstrom) angenommen.

Die Betriebszeiten sind von 05:00-14:00 Uhr für Cafeteria und Küche und im Anschluss noch bis 18:00 Uhr nur für die Cafeteria veranschlagt. Der versorgte Bereich umfasst ca. 470 m<sup>2</sup>, der von bis zu 250 Personen (davon 200 Personen für die Cafeteria) genutzt wird.

### **RLT 04 - Multifunktionsfläche und Kombizonen OGs**

Für diese Lüftungsanlage wird das gleiche Modell wie für RLT 02 verwendet. Die Betriebszeit ist täglich in der Zeit von 08:00 bis 20:00 Uhr. Der Volumenstrom richtet sich nach dem notwendigen hygienischen Außenluftvolumenstrom aufgrund der Personenbelegung. Der Außenluftanteil ist enthalpieabhängig zwischen 50 und 100 % geregelt. Der versorgte Bereich umfasst ca. 2.600 m<sup>2</sup>, der von bis zu 420 Personen genutzt wird.

### **RLT 05 - Räume mit Kühldecken (Seminar / Konferenz) oder Umluftkühlern (EDV, Kopierraum, gekühlte Technikräume)**

Mit dieser Anlage werden alle Seminar- (außer SE) und innenliegende Konferenzräume versorgt, welche mit mechanischer Lüftung und Kühldecken ausgestattet sind. Ebenso werden in dieser Anlage alle sonstigen Räume zusammengefasst, die neben der mechanischen Lüftung mit einem wasserführenden Kühlsystem (z.B. Umluftkühlgeräte) ausgestattet sind. Dies sind:

- elektrische Betriebsräume mit erhöhter Wärmelast (USV, NSHV,...)
- Maschinenhalle im UG
- Kopierräume
- Dimmerraum
- Regieraum

Die so versorgte Fläche beträgt ca. 2.320 m<sup>2</sup>, die von bis zu 190 Personen genutzt wird.

#### **3.5.4. Energieversorgung**

Da das Gebäude an die Energieinfrastruktur der Liegenschaft angeschlossen wird, ergibt sich der Energiebedarf auf Seiten der Nutzenergie für die Räume (direkte Nutzung) und Anlagen (RLT, Heizung, Kühlung). Energiewandelnde Systeme befinden sich außerhalb des Gebäudes und sind aus diesem Grund im Modell nicht enthalten.

## 3.6. Nutzung

### 3.6.1. Nutzungsarten

Die Nutzungsarten beinhalten alle Daten, die zur Beschreibung der Nutzung und den daraus resultierenden Anforderungen erforderlich sind. Zu jeder Nutzungsart werden Betriebszeiten, Raumklimaanforderungen, Raumbelagungen und Lastdichten (nutzungsabhängig) definiert, mit denen der Energiebedarf ermittelt wird. Tabelle 2 zeigt die verwendeten Nutzungsarten und die zugehörigen Parameter für die Simulation.

Die Wärmeabgabe einer Person wird standardmäßig mit folgenden Werten berücksichtigt:

sensibler Wärmeabgabe = 80 W/Person

latente Wärmeabgabe = 20 W/Person

Tabelle 2: Nutzungsarten und -parameter

Nr.	Hauptnutzungsart	Auslegungstemperatur °C Heizen(Kühlen)	Personen (absolut)	Personen m <sup>2</sup> /Person	Leistung Geräte W/m <sup>2</sup>	Leistung Beleuchtung W/m <sup>2</sup>
1	Büros	21		13	5	5
2A	Hörsaal/Auditorium 50 %	20		1,5	11	10
2B	Hörsaal/Auditorium 100 %	20		0,75	21	10
3	Bibliothek	21		10	5	30
4	Konferenz/Seminar	21		2	5	11
6	Labor	20	4		10	10
7	Lager und Nebenflächen	15		100	0	5
8	Flur und Verkehrsfläche	15		100	0	4
9	Mensa / Cafeteria / Gastronomie	20	250		50	20
10	Sanitär	24		100	0	0
11	Technik und sonstige Flächen	15		100	0	0
12	EDV	15(**30)		100	0	0
13	Ausstellungsfläche	20		3	0	0
14	Kombizonen (vgl. Flur mit Sitzecken)	20		26	2	5
15	Einzel-Arbeitsraum (EAR)	20	1		4	10
16	Doppel-Arbeitsraum (DAR)	20	2		4	10
17	Gruppen-Arbeitsraum (GAR)	20		13	4	10
18	Technik mit Kühlung	5(**30)		0	25	0
19	Kopierraum (in Fluren)	15		100	*0,15 kW	4
20	Dimmer-Raum	5(**30)		0	*5,0 kW	0
21	Regieraum	21		8	*1,0 kW	5
22	Maschinenhalle	15(**30)		50	*2,0 kW	10
23	Küche	20	25		10	20

\*gemäß Nutzervorgabe als absolute Werte in kW (Volllast); \*\*im Kühlfall

### 3.6.2. Nutzungsprofile

Saisonal und zeitlich variierende Änderungen der Nutzungsintensität werden als Lastfaktoren abgebildet, die in Abhängigkeit von Uhrzeit, Tag und Kalenderwoche für jede Stunde ermittelt werden. In Tabelle 3 sind diese Lastprofile den Hauptnutzungsarten zugeordnet.

Tabelle 3: Lastprofilzuordnung zu den Nutzungsarten

Nr.	Hauptnutzungsart	Lastprofil Personen	Lastprofil Geräte	Lastprofil Beleuchtung
1	Büros	Personen (allg.)	Personen (allg.)	Personen (allg.)
2A	Hörsaal/Auditorium 50 %	Hörsaal	Hörsaal	Hörsaal
2B	Hörsaal/Auditorium 100 %	Hörsaal	Hörsaal	Hörsaal
3	Bibliothek	Personen (allg.)	Personen (allg.)	Personen (allg.)
4	Konferenz/Seminar	Personen (allg.)	Personen (allg.)	Personen (allg.)
6	Labor	Personen (allg.)	Personen (allg.)	Personen (allg.)
7	Lager und Nebenflächen	Personen (allg.)	Personen (allg.)	Personen (allg.)
8	Flur und Verkehrsfläche	Personen (allg.)	Personen (allg.)	Personen (allg.)
9	Mensa / Cafeteria / Gastronomie	Gastronomie 1	Gastronomie 2	Gastronomie 2
10	Sanitär	Personen (allg.)	Personen (allg.)	Personen (allg.)
11	Technik und sonstige Flächen	Personen (allg.)	Personen (allg.)	Personen (allg.)
12	EDV	Personen (allg.)	Geräte (allgemein)	Personen (allg.)
13	Ausstellungsfläche	Ausstellung	Ausstellung	Ausstellung
14	Kombizonen	Personen (allg.)	Personen (allg.)	Personen (allg.)
15	Einzel-Arbeitsraum (EAR)	Personen (allg.)	Personen (allg.)	Personen (allg.)
16	Doppel-Arbeitsraum (DAR)	Personen (allg.)	Personen (allg.)	Personen (allg.)
17	Gruppen-Arbeitsraum (GAR)	Personen (allg.)	Personen (allg.)	Personen (allg.)
18	Technik mit Kühlung	Personen (allg.)	Geräte (allgemein)	Personen (allg.)
19	Kopierraum (in Fluren)	Personen (allg.)	Geräte (allgemein)	Personen (allg.)
20	Dimmer-Raum	Hörsaal	Hörsaal	Hörsaal
21	Regieraum	Hörsaal	Hörsaal	Hörsaal
22	Maschinenhalle	Maschinenhalle	Maschinenhalle	Maschinenhalle

Abbildung 3 zeigt das Lastprofil, welches die allgemeine Gebäudenutzung abbildet. Dieses Lastprofil gilt an allen Werktagen, am Wochenende ist dieses gantztägig 0 %.

Abbildung 4 zeigt das Lastprofil des Hörsaal bzw. Veranstaltungsbereichs rund um das Audimax mit der Fallunterscheidung eines Tages mit Normalbetrieb und eines Events. Eventbedingungen herrschen gemäß Nutzervorgabe an den Tagen Montag, Dienstag und Samstag vor, ansonsten herrscht Normalbetrieb, am Sonntag ist dieses gantztägig 0 %.

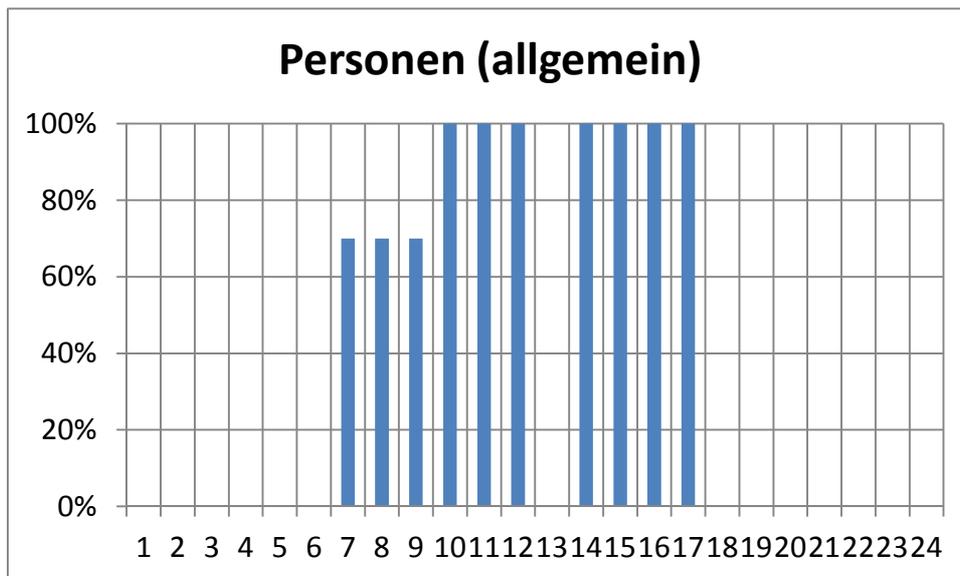


Abbildung 3: Lastprofil Personen (allgemein)

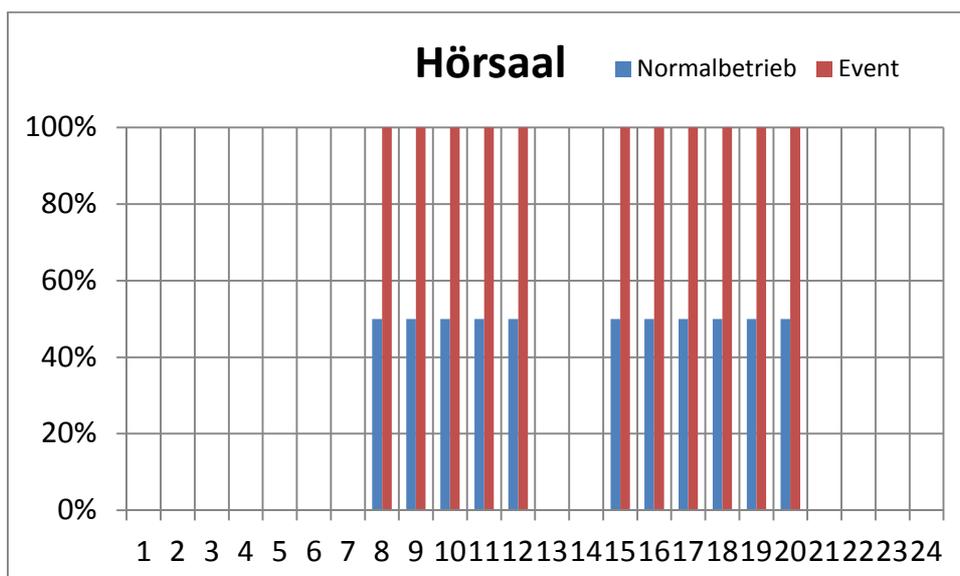


Abbildung 4: Lastprofile Hörsaal / Veranstaltung

Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen die Lastprofile der Gastronomie, welche die Cafeteria und den Küchenbereich zusammenfasst. Um die unterschiedlichen Lastphasen dieses Bereichs abzubilden, werden unterschiedliche Lastprofile für Personen zum einen und zum anderen für Licht und Geräte verwendet. Die Gerätelasten resultieren primär aus dem Vorbereitungsbetrieb des Küchenbereichs, die Personenlasten primär aus dem Mittagsbetrieb des Speisebereichs. Für den Samstag ist ein reduzierter Betrieb angenommen, am Sonntag ist dieser gantztägig 0 %.

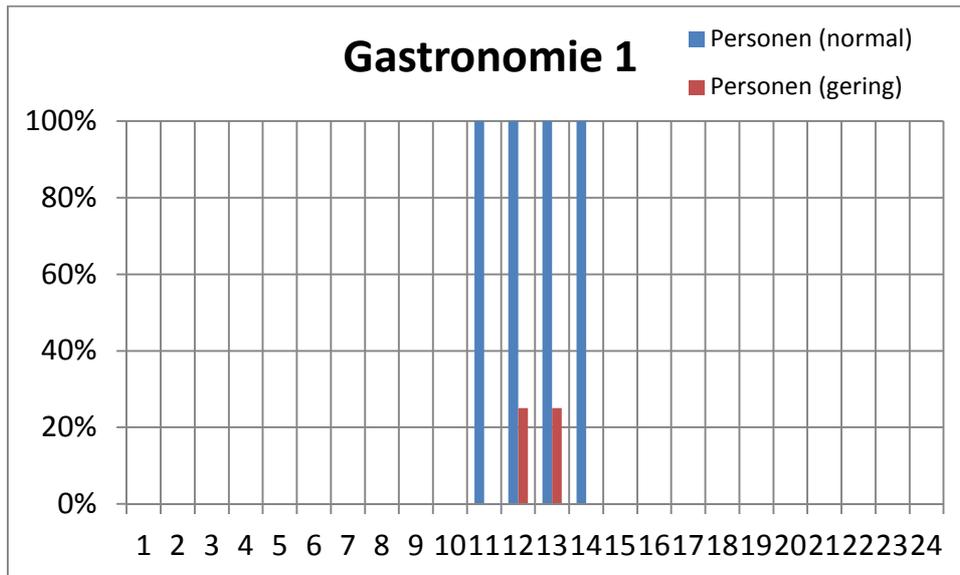


Abbildung 5: Lastprofil Gastronomie - Personen

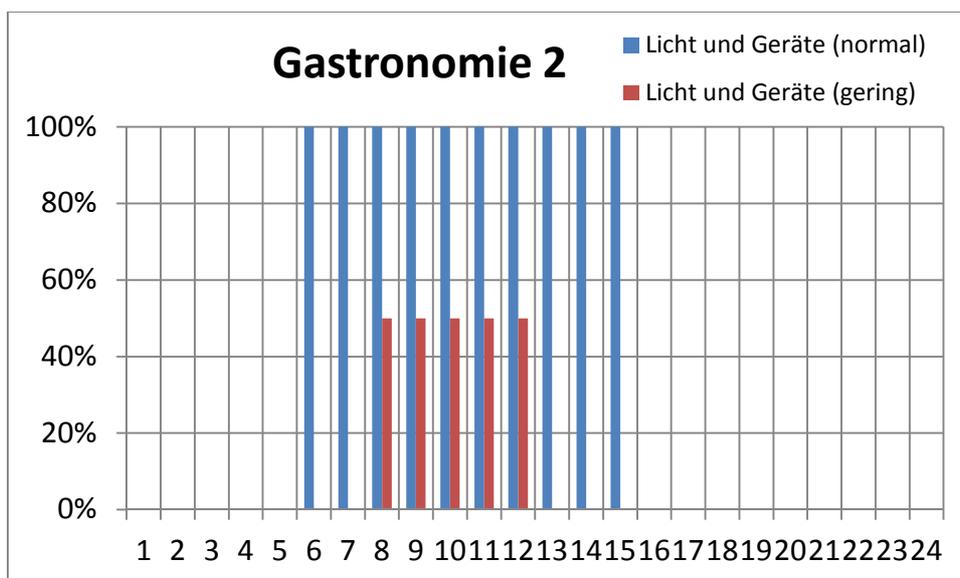


Abbildung 6: Lastprofil Gastronomie - Licht und Geräte

Abbildung 7 zeigt das Lastprofil für den Ausstellungsbereich für Personen, Beleuchtung und Geräte an Werktagen. Samstags ist ein reduzierter Betrieb angenommen, am Sonntag ist dieser gantztägig 0 %.

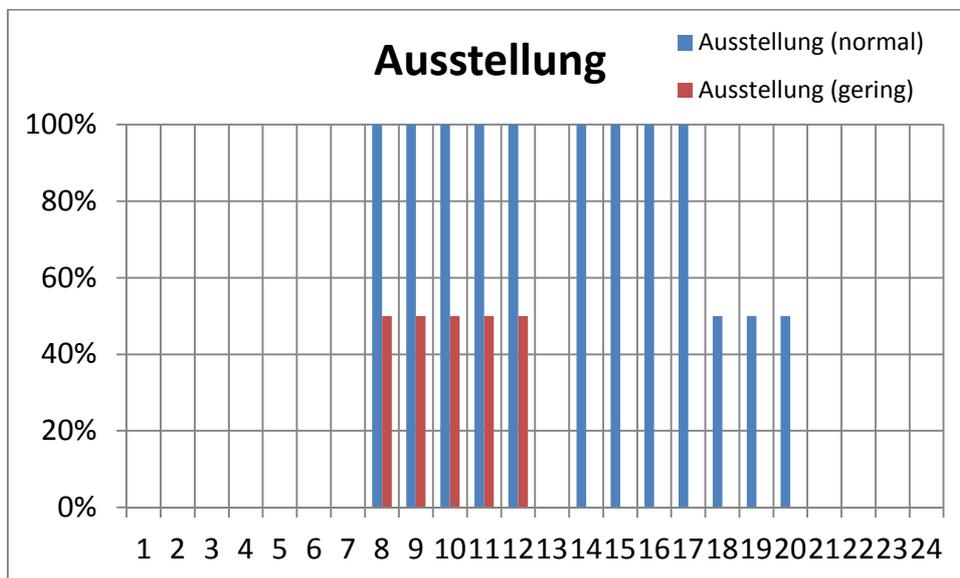


Abbildung 7: Lastprofil Ausstellungsbereich

Abbildung 8 zeigt das Lastprofil für den Seminarbereich für Personen, Beleuchtung und Geräte an Werktagen. Samstags ist ein reduzierter Betrieb angenommen, am Sonntag ist dieser gantztägig 0 %.

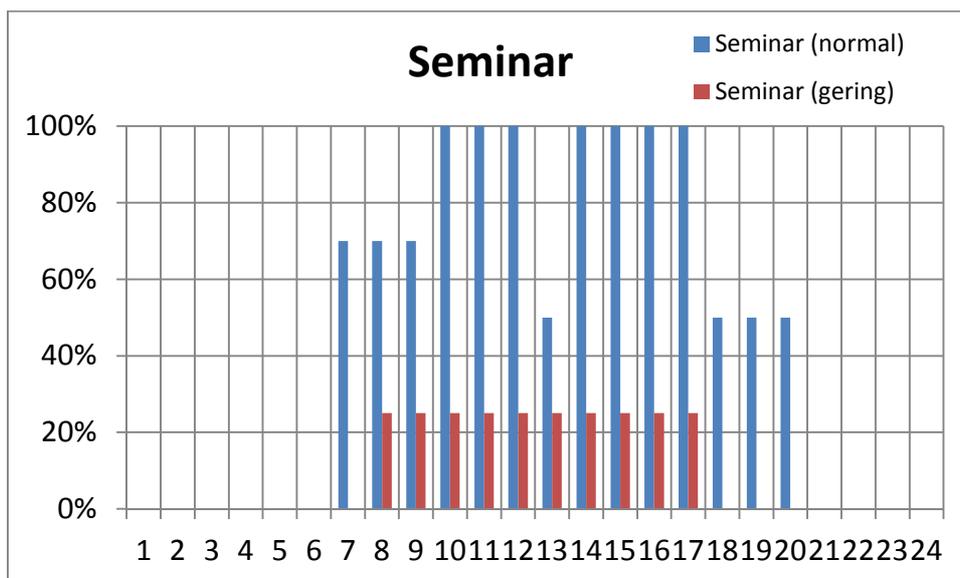


Abbildung 8: Lastprofil Seminarbereich

Abbildung 9 zeigt das Lastprofil der Maschinenhalle im Untergeschoss.

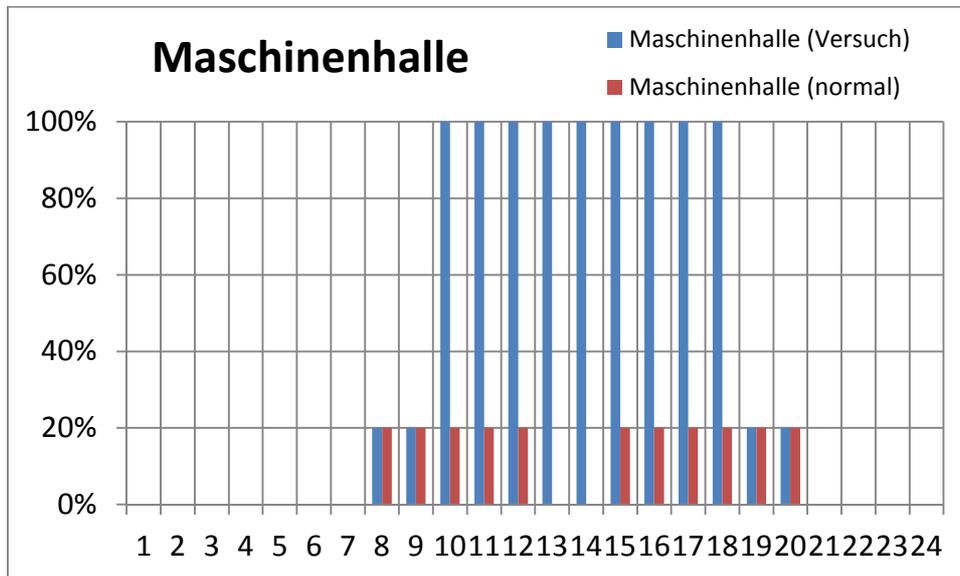


Abbildung 9: Lastprofil Maschinenhalle UG

Abbildung 10 zeigt das Lastprofil dauerbetriebener Geräte, welches ganzjährig angenommen wird.

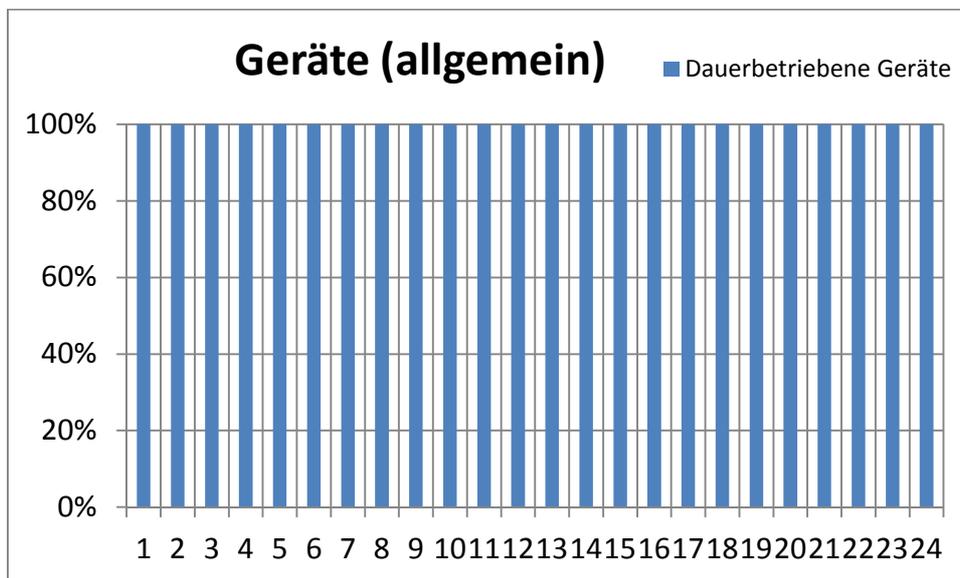


Abbildung 10: Lastprofil dauerbetriebener Geräte

## 4. Simulationsergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse der zu berechnenden Hauptvarianten (Var. A und B) dargestellt und anhand der Lastverläufe für die Energieformen Wärme, Kälte und Strom ausgewertet. Ergänzend werden energetischen Optimierungsmaßnahmen basierend auf den Ergebnissen von Nebenvarianten (Modifikation einer Hauptvariante) diskutiert.

### 4.1. Übersicht über die Simulations-Varianten

Es werden zwei Last-Varianten der Simulation ausgewertet, die sich auf die Belegungsdichte bei Veranstaltungen im Hörsaal/Auditorium beziehen:

- Variante A:
  - o 50 % Belegungsdichte an 3 Tagen die Woche
  - o mit E-Control-Verglasung
  - o mit Nachtauskühlung
  - o ohne Freikühlung
- Variante B:
  - o 100 % Belegungsdichte an 3 Tagen die Woche
  - o mit E-Control-Verglasung
  - o mit Nachtauskühlung
  - o ohne Freikühlung

Die thermischen Lasten pro Person wurden mit 100 W/Person festgelegt inklusive aller elektronischen Geräte. Die absolute Personenzahl für das Gebäude ergibt sich auf Basis der Belegungsdichten der einzelnen Nutzungsarten zu ca. 1.930 Personen (Variante A) bzw. 2.580 Personen (Variante B).

Folgende Nebenvarianten wurden für die spätere Diskussion berechnet:

- Auf Basis der Ergebnisse von Variante A erfolgt eine Diskussion des Einflusses der E-Control-Verglasung
- Auf Basis der Variante B erfolgt die Diskussion der Potentiale der Nachtauskühlung sowie der Kaltwassererzeugung durch eine Freikühlung

In den nachfolgenden Abschnitten 4.2 und 4.3 werden zunächst die allgemeinen Ergebnisse (Energieströme auf Load- und System-Level) der Simulation basierend auf Variante A dargestellt und erörtert. In Abschnitt 4.4 und 4.5 erfolgt die Darstellung des Gebäudeenergiebedarfs für Variante A und B, die in Abschnitt 4.6 gegenübergestellt und diskutiert werden. Abschnitt 4.7 beinhaltet die

Auswertung und Bewertung der E-Control-Verglasung, Abschnitt 4.8 die der Nachtauskühlung und Abschnitt 4.9 die der Kaltwassererzeugung mittels Freikühlung.

## **4.2. Energiebedarf der Räume (Loads)**

Aus den bauphysikalischen und nutzungsbedingten Rahmenbedingungen resultieren thermische Lasten, die auf die Raumtemperatur wirken. Die Raumtemperatur lässt sich aus der Energiebilanz für einen Raum ableiten. Aus der dynamisch betrachteten Raumtemperatur lässt sich dann diejenige Leistung ermitteln, die durch die Anlagentechnik (Heiz- oder Kühleinrichtung) zur Begrenzung der Raumtemperatur auf den zulässigen Bereich eingebracht werden muss.

Die Energieströme lassen sich dabei zu folgenden Hauptenergieströmen zusammenfassen:

- Wärmeübertragung durch Transmission (Wärmeleitung)
- Wärmeübertragung durch Strahlung
- Wärmeübertragung durch Infiltration (Fugen, Luftaustausch mit der Umgebung)
- Wärmeemission durch Personen (Nutzer)
- Wärmeemission durch Beleuchtung
- Wärmeemission durch Geräte (z.B. PC, Handy, Tablet)

Abbildung 11 stellt die Kühllastverteilung dar, die wesentlich durch die Wärmequellen Transmission durch Außenbauteile und Wärmeemission der Personen im Gebäude dominiert wird. Die in diesem Bericht dargestellten Energiebedarfszahlen gelten für das in den Rahmenbedingungen beschriebene Nutzerverhalten (siehe 3.6). Die äußeren Einflüsse auf die Kühllast (insgesamt 57 %) sind zu ca. 80 % auf die Transmission zurückzuführen, der Einfluss der Sonnenstrahlung ist vergleichsweise gering. Dieses Ergebnis basiert auf der Berücksichtigung der E-Control-Verglasung (siehe 3.4.2 und 4.7).

Abbildung 12 stellt die Heizlastverteilung in äquivalenter Form dar. Als Heizlasten werden Wärmeströme aufgrund von Wärmeleitung über die Außenbauteile an die Umgebung (Transmission) oder aufgrund von Stofftransport durch die Gebäudehülle (hier primär Infiltration durch Fensterlüftung) betrachtet. Ca. 55 % der Transmission ist auf die Dachflächen zurückzuführen, sowie ca. 30 % auf die Fensterflächen einschl. Rahmen. Die internen Wärmequellen (Nutzer, Beleuchtung, Geräte), sowie die Solarstrahlung decken im Heizfall mit ca. 9 % einen Teil dieser Heizlast.

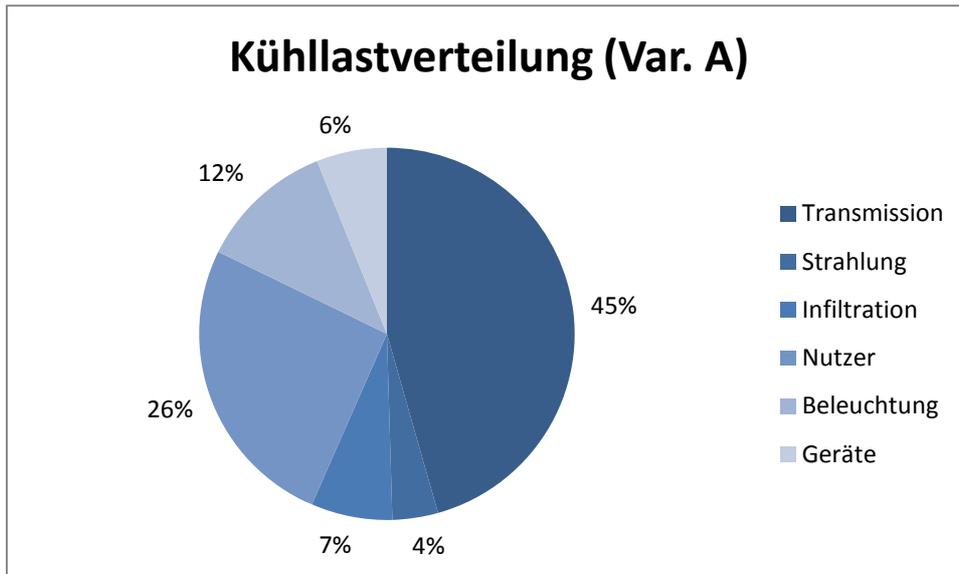


Abbildung 11: Verteilung der Kühllast auf die Hauptenergieströme

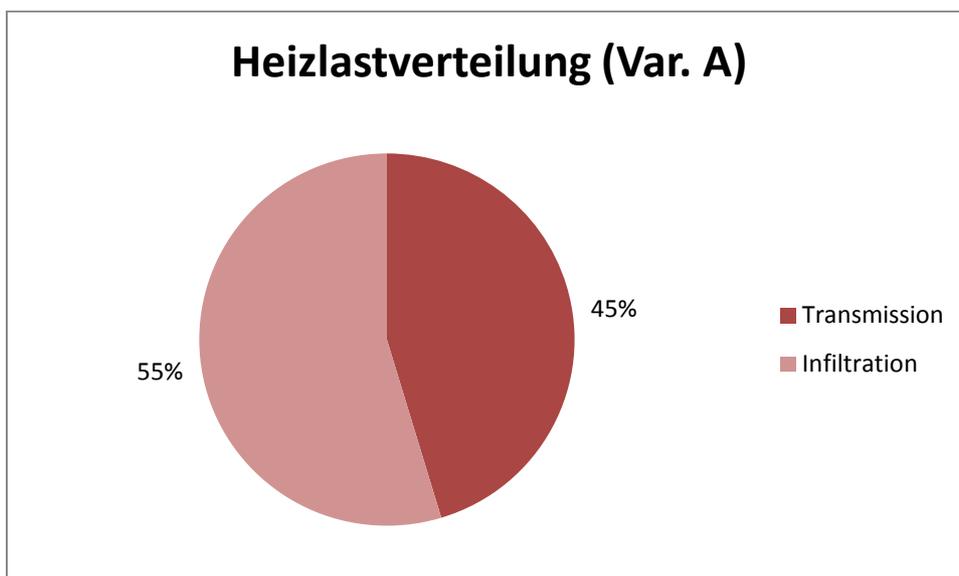


Abbildung 12: Verteilung der Heizlast auf die Hauptenergieströme

Tabelle 4 zeigt die zugehörigen Zahlenwerte der thermischen Lasten vergleichend für die Varianten A und B. Es sei darauf verwiesen, dass die Wärmeemission durch die Nutzer zu ca. 33 % aus latenter Wärmelast besteht. Eine detaillierte Betrachtung der Feuchtelasten wurde nicht durchgeführt und ist für ein Nicht-Wohngebäude dieser Nutzung nicht erforderlich, da Prozesse mit besonderen Feuchtelasten oder Bauteile mit besonderer Feuchteempfindlichkeit nicht bekannt sind.

Tabelle 4: Verteilung der thermischen Lasten auf die Energiequellen/-senken

Thermische Spitzenlasten	Var. A			Var. B		
	Kühllast (sens./lat.)		Heizlast	Kühllast (sens./lat.)		Heizlast
	kW	kW	kW	kW	kW	kW
Transmission Außenwände	4,3	0,0	-15,4	4,3	0,0	-15,4
Transmission Dach	56,9	0,0	-103,3	56,9	0,0	-103,3
Transmission Fenster (Glas, Rahmen)	43,4	0,0	-56,0	43,4	0,0	-56,0
Solarstrahlung Fenster (Glas)	23,5	0,0	1,4	23,5	0,0	1,4
Transmission durch Innenbauteile	168,1	0,0	-9,4	168,1	0,0	-9,4
Transmission gegen erdberührte Bauteile	-0,2	0,0	-1,9	-0,2	0,0	-1,9
thermische Last durch Nutzer	98,6	55,1	15,5	129,9	74,4	20,4
thermische Last durch Beleuchtung	69,8	0,0	11,7	69,8	0,0	11,7
thermische Last durch Geräte	36,3	0,0	6,1	42,1	0,0	7,0
Last durch Infiltration	22,4	19,5	-224,4	22,4	19,5	-224,4
<b>Zwischensumme</b>	<b>523,1</b>	<b>74,6</b>		<b>560,3</b>	<b>94,0</b>	
<b>Summe</b>		<b>597,7</b>	<b>375,9</b>		<b>654,2</b>	<b>370,0</b>

(Negative Werte entsprechen einem Wärmestrom über die Systemgrenze an die Umgebung)

### 4.3. Anlagentechnik

Die Versorgung der Räume mit thermischer Energie und Frischluft wird durch die in Kapitel 3.5 beschriebene Anlagentechnik abgebildet. Die Anlagen werden in Abhängigkeit des dynamischen Lastverhaltens der Räume und Zonen geregelt, so dass eine möglichst realitätsnahe Abbildung des Anlagenbetriebs und des damit verbundenen Energiebedarfs der Anlagentechnik zum Energietransport, zum Frischlufttransport und zur Luftaufbereitung gegeben ist.

Der Energiebedarf der Anlagentechnik hängt wesentlich von der technischen Ausstattung der Räume und Zonen ab. Kann der Energiebedarf eines Raumes nur zum Teil oder gar nicht gedeckt werden, da die dafür erforderliche Anlagentechnik nicht vorgesehen ist (z.B. keine Kühleinrichtung bei Kältelasten), so besteht die Möglichkeit, dass der Energiebedarf der Anlagentechnik geringer ist als der theoretische Energiebedarf des Gebäudes. In diesem Fall wird die aus der Energiebilanz resultierende (nicht zwingend kritische) Raumtemperatur berechnet.

Hinweis: Die Analyse der resultierenden Raumtemperaturen ist nicht Bestandteil dieser Simulation.

#### 4.3.1. Heizungsanlage

Die Heizungsanlage (alle „statischen Heizkreise“) versorgt alle Räume mit einer Grundlastbeheizung, die z.B. durch Heizkörper, Fußbodenheizung oder Konvektoren erreicht wird.

Abbildung 13 zeigt die Monatswerte der maximalen Leistung aller statischen Heizkreise. Die Heizperiode liegt im Zeitraum von Oktober bis April, die Heizleistung beträgt hier zwischen 250 und 340 kW. Außerhalb der Heizperiode werden nur geringe Leistungen im Bereich < 90 kW benötigt.

Abbildung 14 zeigt die zugehörigen Monatswerte des Wärmebedarfs. Es ist zu erkennen, dass die Leistung in den Monaten der Heizperiode April und Oktober nur zu einer geringen Stundenzahl bezogen werden wird (geringe Bezugsdauer), was auf die Übergangszeit zwischen Heiz- und Kühlbetrieb der Räume zurückzuführen ist.

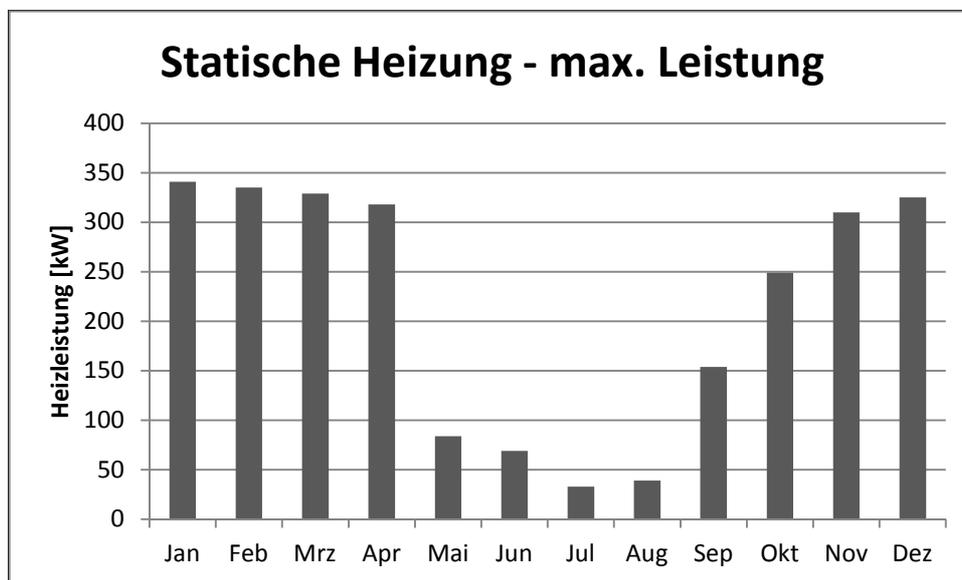


Abbildung 13: Monatswerte der maximalen Leistung statischer Heizkreise

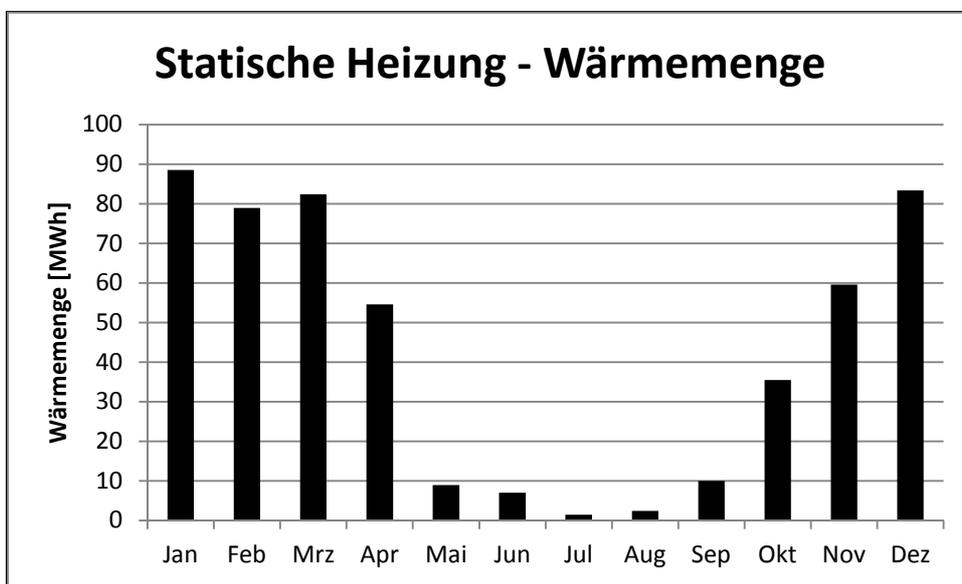


Abbildung 14: Monatswerte des Wärmebedarfs statischer Heizkreise

### 4.3.2. Lüftungstechnik

Die Auslegungseckdaten der Lüftungstechnik sind in Tabelle 5 gegeben. Insgesamt wird eine Fläche von ca. 7.000 m<sup>2</sup> mechanisch be- und entlüftet, auf der sich bis zu 2.580 Personen (bei Variante B) aufhalten. Der Summenvolumenstrom beträgt ca. 92.600 m<sup>3</sup>/h.

Tabelle 5: Auslegungseckdaten der Lüftungstechnik

Lüftungsanlagen	Einheit	RLT01 ( )	<i>RLT01 ( )</i>	RLT02	RLT03	RLT04	RLT05 Kühldecken, UKG
		Audimax	<i>Audimax</i>	Seminar (SE)	Cafeteria	Ausstell. Innenzon.	*)
versorgte Fläche	m <sup>2</sup>	965	965	811	466	2.610	2.320
versorgte Personen (max)	Pers.	643	1.287	405	275	421	190
Zuluftvolumenstrom	m <sup>3</sup> /h	36.360	36.360	11.850	32.950	4.920	6.550
Abluftvolumenstrom	m <sup>3</sup> /h	36.360	36.360	11.850	32.950	4.920	6.550
elektrische Leistung	kW	17,0	17,0	4,5	16,4	2,3	3,0
Heizleistung	kW	130,2	260,4	82,0	227,8	34,0	42,1
Kühlleistung	kW	102,8	108,1	35,3	98,0	14,6	19,2
Rückwärmezahl	%	75	75	75	25	75	75
Zus. Raumkühlung	Ja/Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Ja

\* Technik mit Zusatzkühlung, Kopierräume, Seminarräume (außer SE)

Tabelle 6 stellt den Energiebedarf der mechanisch be- und entlüfteten Bereiche unter den Annahmen der unterschiedlichen Personenbelegung der Varianten A und B bei sonst gleichen Rahmenbedingungen gegenüber.

Der Wärmebedarf ändert sich nur geringfügig, d.h. die zusätzlichen internen Lasten kompensieren weitgehend den zusätzlichen Wärmebedarf, der durch den (auch im Winter) erhöhten Außenluftvolumenstrom anfällt.

Der Kältebedarf steigt hingegen signifikant, da bereits bei geringeren Außentemperaturen aktiv gekühlt werden muss, um die Raumtemperaturen im Behaglichkeitsfeld zu halten. Dies ist unmittelbar auf die zusätzlichen internen Lasten zurückzuführen sowie den zusätzlichen Kältebedarf aufgrund der Außenluftaufbereitung.

Der Bedarf an elektrischer Energie beinhaltet neben dem erhöhten Energiebedarf durch die Nutzung (Geräte) auch den Energiebedarf zur Luftförderung, der rund 2/3 des zusätzlichen Bedarfs an elektrischer Energie begründet.

Tabelle 6: Variantenvergleich des Energiebedarfs der Lüftungstechnik

Raumklimatetechnik		Var. A	Var. B	B-A	(B-A)/A
Heizleistung	kW	567	564	-3	-0,5%
Kälteleistung	kW	217	304	87	40,1%
elektrische Leistung	kW	154	172	18	11,8%
Wärmebedarf	MWh/a	669	671	2	0,3%
Kältebedarf	MWh/a	46	61	15	33,0%
Bedarf elektr. Energie	MWh/a	564	637	73	12,9%
davon Luftförderung	MWh/a	235	283	48	20,4%

In Abbildung 15 ist der Leistungsbedarf, in Abbildung 16 der Energiebedarf der einzelnen Lüftungszonen dargestellt. Folgende Punkte seien hier diskutiert:

- Der vergleichsweise hohe Wärmebedarf des Gastronomiebereichs (RLT-03) ergibt sich aus dem im Mittel geringen Potential der Wärmerückgewinnung, welches aus dem um die Küchenabluft reduzierten Volumenstrom resultiert.
- Das Verhältnis aus Kühlleistungs- und Kühlenergiebedarf weist auf geringe Betriebszeiten mit Kühlbedarf hin. Diese sind witterungsabhängig und liegen im Bereich von 250 h/a.
- Der Kühlbedarf beinhaltet den Bedarf der Außenluftaufbereitung und der zusätzlichen Raumkühleinrichtung.

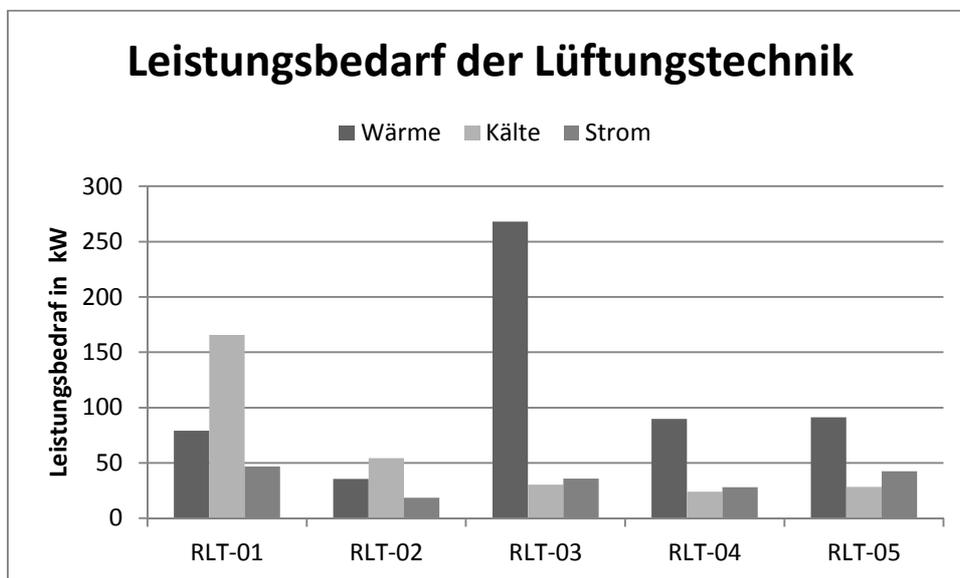


Abbildung 15: Leistungsbedarf der Lüftungstechnik

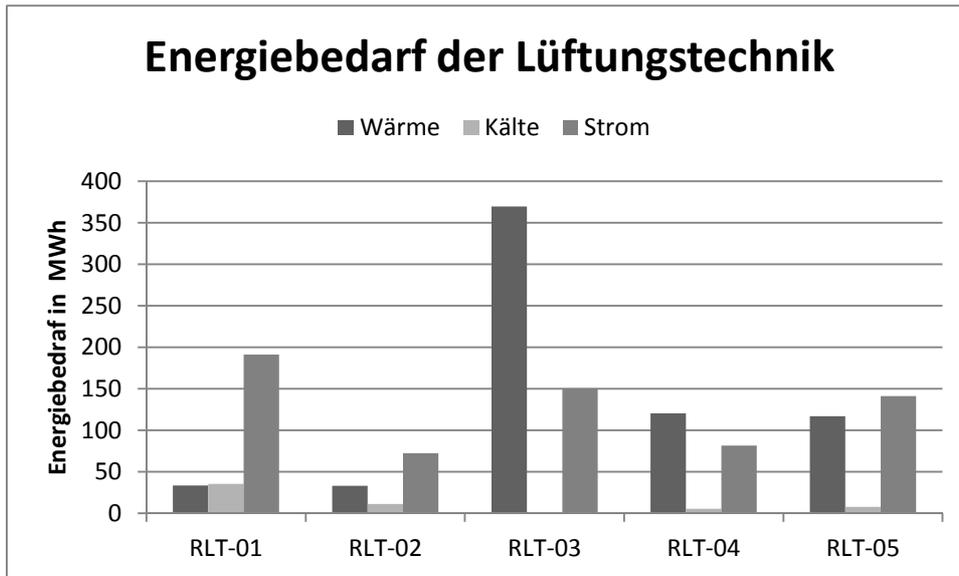


Abbildung 16: Energiebedarf der Lüftungstechnik

#### 4.4. Gebäudeenergiebedarf Variante A - 50 % Belegung bei Veranstaltungen

Abbildung 17 bis Abbildung 19 zeigen die Lastverläufe des Bedarfs an Wärme-, Kälte- und elektrischer Energie des Neubaus unter Berücksichtigung der Annahmen der Variante A.

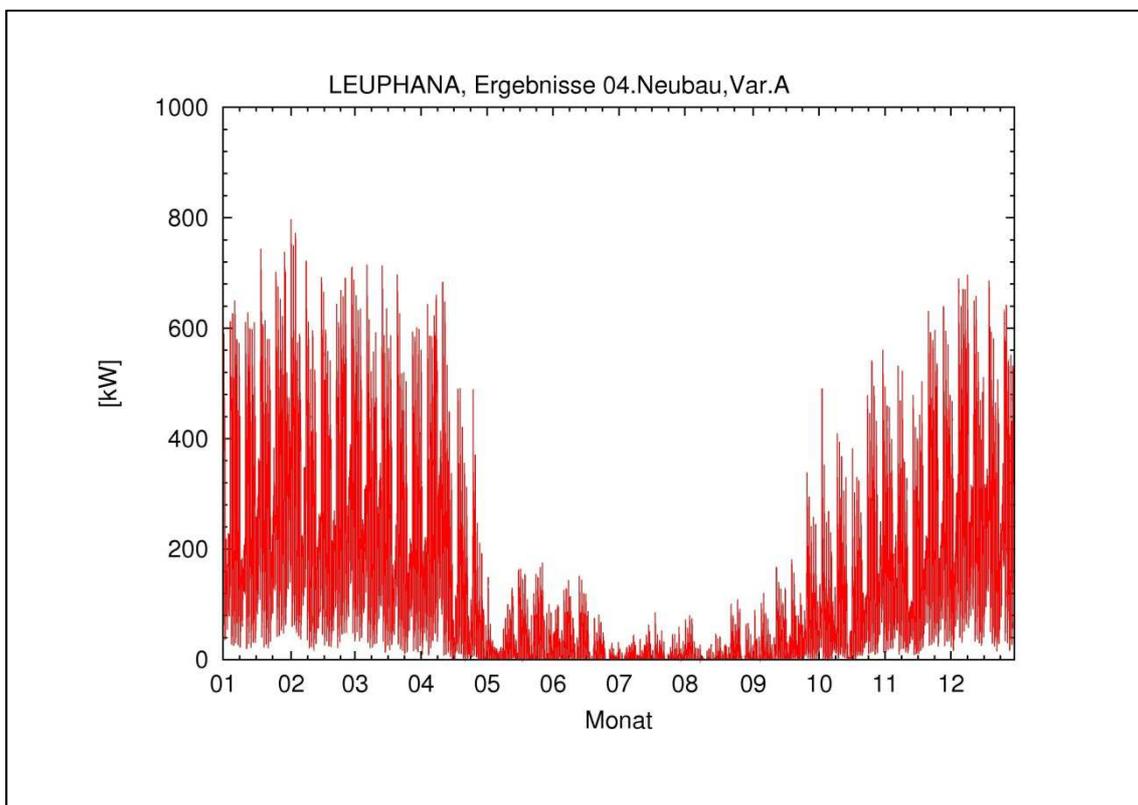


Abbildung 17: Lastgang Wärmebedarf Neubau (Var. A)

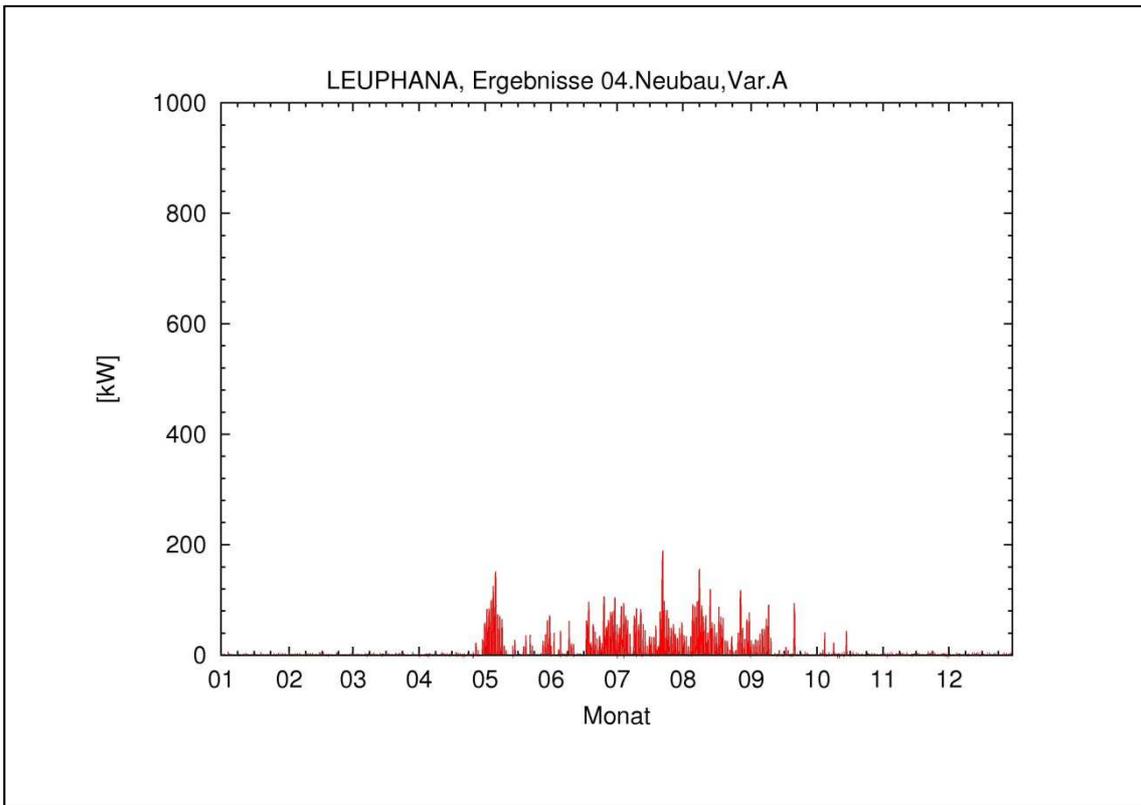


Abbildung 18: Lastgang Kältebedarf Neubau (Var. A)

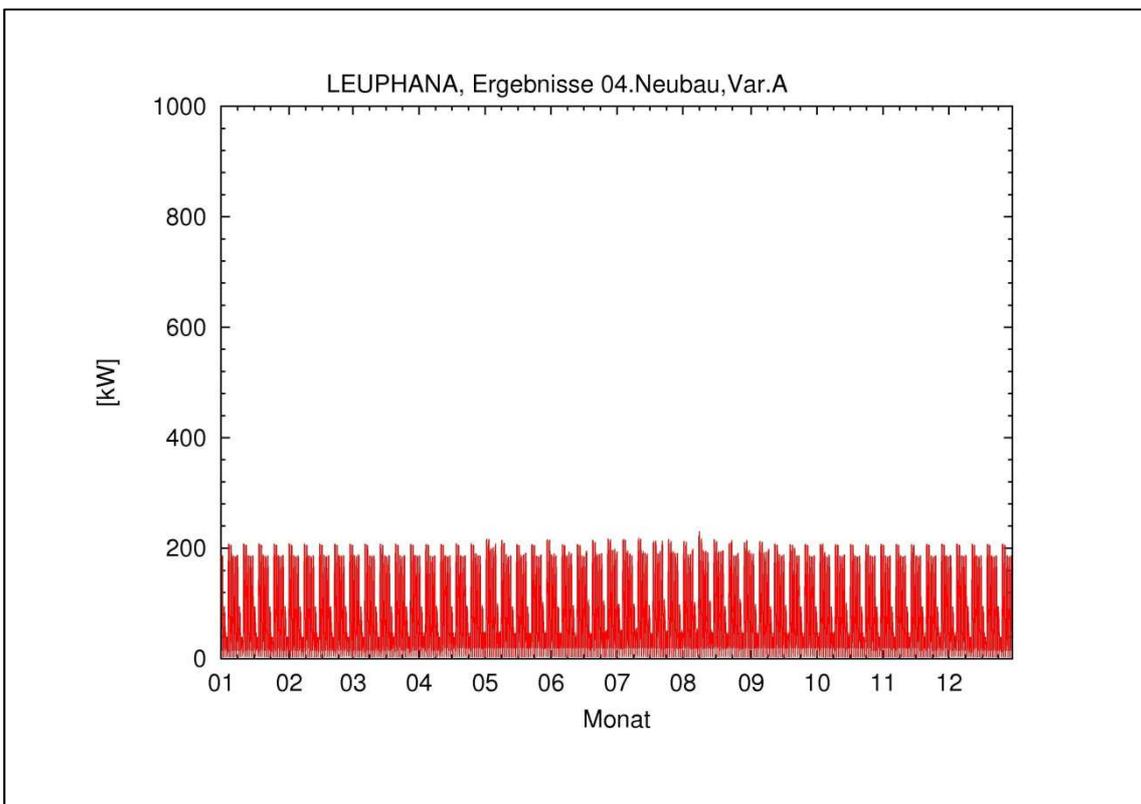


Abbildung 19: Lastgang elektrische Energie Neubau (Var. A)

#### 4.5. Gebäudeenergiebedarf Variante B - 100 % Belegung bei Veranstaltungen

Abbildung 19 bis Abbildung 21 zeigen die Lastverläufe des Bedarfs an Wärme-, Kälte- und elektrischer Energie unter Berücksichtigung der Annahmen der Variante B.

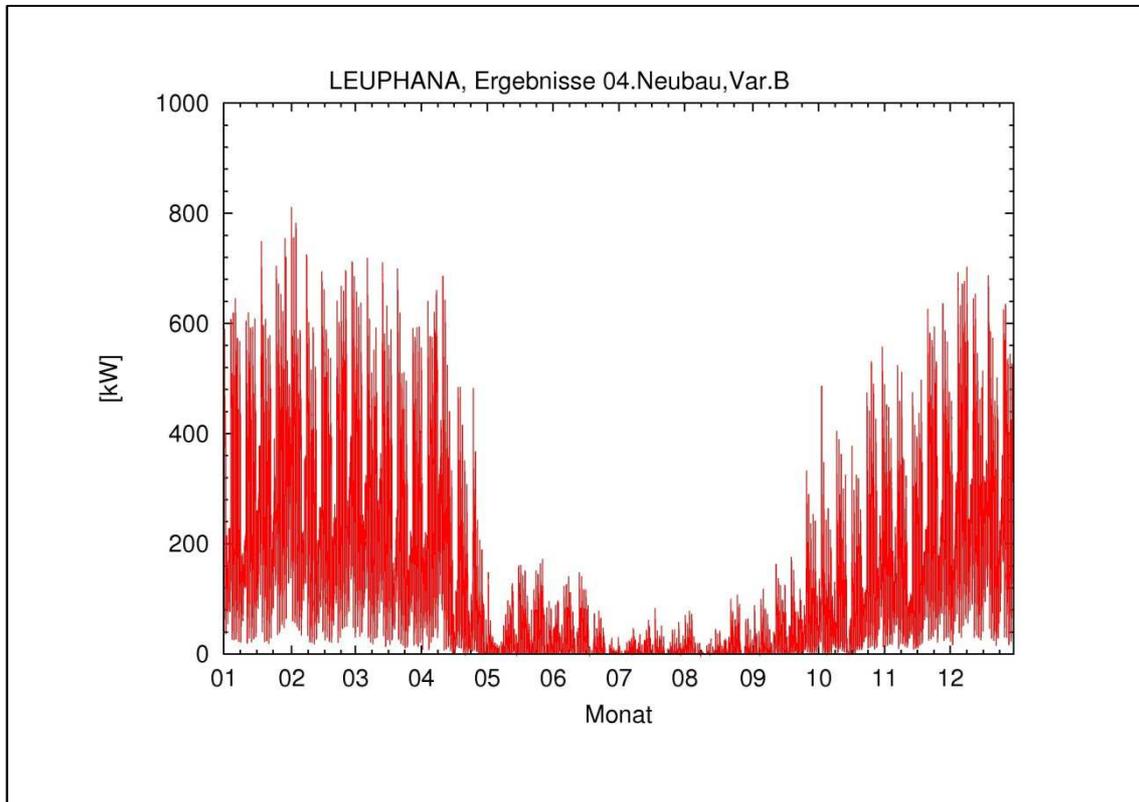


Abbildung 20: Lastgang Wärmebedarf Neubau (Var. B)

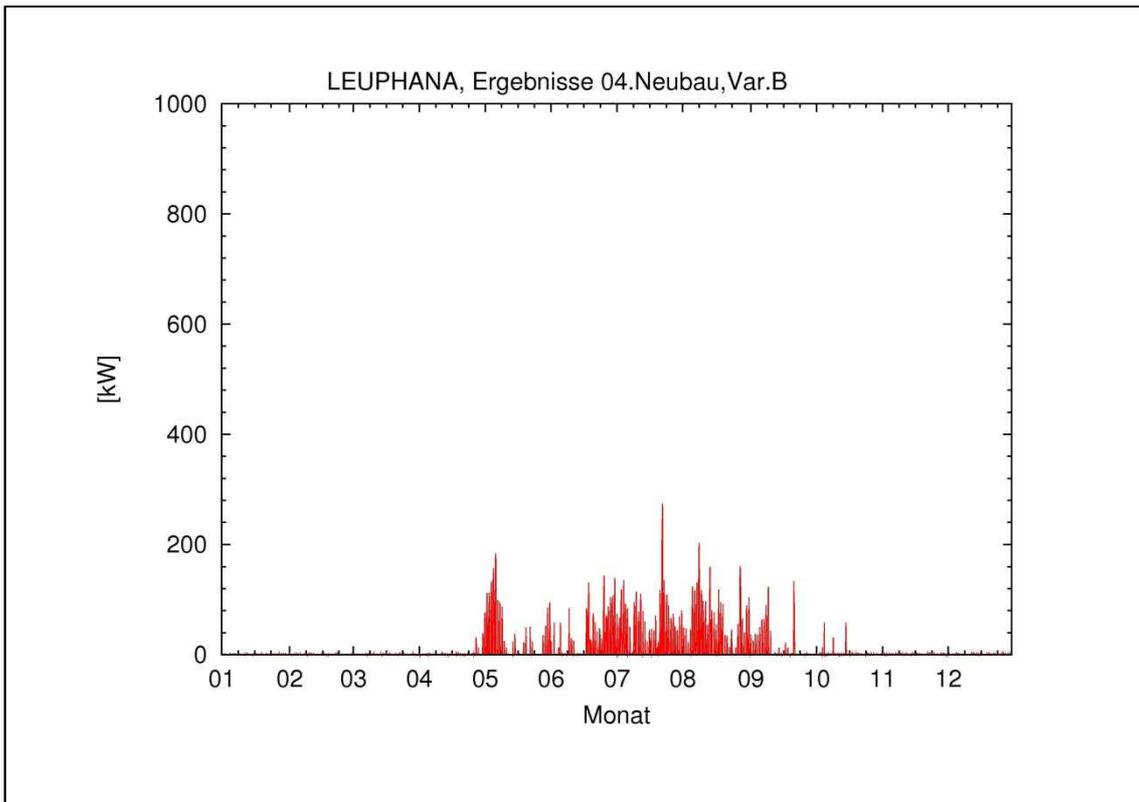


Abbildung 21: Lastgang Kälteenergie Neubau (Var. B)

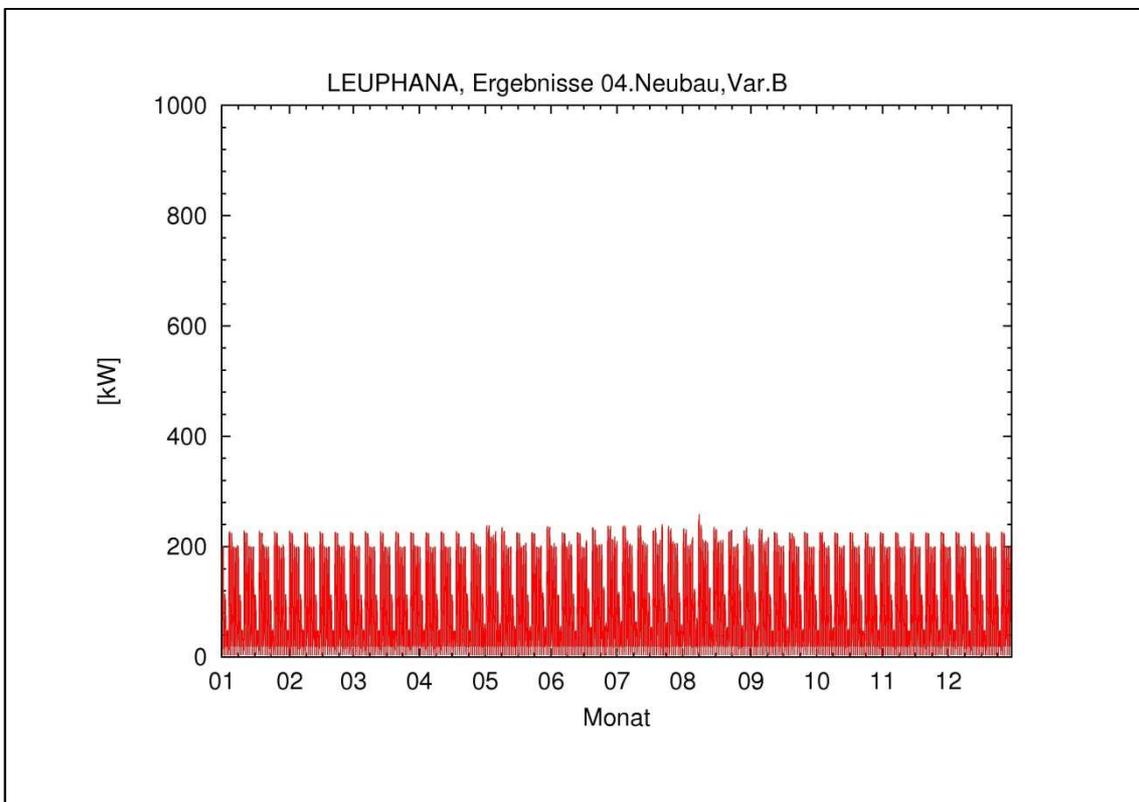


Abbildung 22: Lastgang elektrische Energie Neubau (Var. B)

#### 4.6. Simulationsergebnisse und Variantenvergleich

Die Simulation ergibt für jede Energieform die Spitzenlast, deren Verteilung (siehe Diagramme) und den Energiebedarf des Gebäudes, der sich als Fläche unter der Lastkurve ergibt. Die Ergebnisse sind - vergleichend für die betrachteten Varianten - als absolute Werte in Tabelle 7 dargestellt.

Die erhöhte Belegungsichte (Variante B) bei Veranstaltungen im Audimax (RLT-05) äußert sich in einem erhöhten Bedarf an Kälteenergie und -leistung zur Außenluftaufbereitung im Sommer sowie zur direkten Raumkühlung durch zusätzliche Raumkühleinrichtungen. Zudem steigt auch der Bedarf an elektrischer Energie zur Luftförderung und zum Betrieb von Geräten, die unmittelbar mit der Gebäudenutzung einhergehen. Die Änderung des Wärmebedarfs ist hingegen vernachlässigbar, da die zusätzlichen Wärmequellen den Wärmebedarf zur Außenluftaufbereitung und Raumheizung kompensieren. Die Differenz der Varianten A und B ist vollständig auf die veränderte Lastsituation in RLT-05 zurückzuführen.

Tabelle 7: Variantenvergleich des Energiebedarfs des Gebäudes

Gebäude		Var. A	Var. B	B-A	(B-A)/A
Heizleistung	kW	908	905	-4	-0,4%
Kälteleistung	kW	217	304	87	40,1%
elektrische Leistung	kW	230	259	29	12,5%
Wärmebedarf	MWh/a	1189	1184	-5	-0,4%
Kältebedarf	MWh/a	46	61	15	33,0%
Bedarf elektr. Energie	MWh/a	708	783	76	10,7%
davon Luftförderung	MWh/a	235	283	48	20,4%

Bezogen auf die Netto-Geschossfläche von ca. 17.400 m<sup>2</sup> (NGF) ergeben sich die spezifischen Verbrauchskennwerte des Gebäudes für beide Varianten zu den in Tabelle 8 dargestellten Werten.

Tabelle 8: Spezifische Verbrauchskennwerte des Gebäudes

flächenspez. Werte	Einheit	Var. A	Var. B
Fläche (NGF)	m <sup>2</sup>	17.400	17.400
spez. Wärmebedarf	kWh/m <sup>2</sup> a	68,3	68,1
spez. Kältebedarf	kWh/m <sup>2</sup> a	2,6	3,5
spez. elektr. Arbeitsbedarf	kWh/m <sup>2</sup> a	40,7	45,0
davon Luftförderung	kWh/m <sup>2</sup> a	13,5	16,3

#### 4.7. Potential der E-Control-Verglasung

Der Großteil der E-Control-Verglasung ist in Räumen installiert, die über keine Kühlung verfügen. Damit ist der Einfluss der E-Control-Verglasung auf den Kühlbedarf bei der hier berücksichtigten gebäudetechnischen Ausstattung sehr gering.

Um den Einfluss der E-Control-Verglasung energetisch abschätzen zu können, wurden zwei Simulationen unter den gleichen Rahmenbedingungen, jedoch mit den unterschiedlichen Schaltstufen (MIN/MAX) gerechnet. Tabelle 9 vergleicht den Energiebedarf der Systeme HZG-99 (enthält die außenliegenden Büros und Arbeitsräume) und RLT-05 (beinhaltet die Seminarräume mit Kühldecken (außer SE)), die von der E-Control-Verglasung beeinflusst werden. Es ist zu erkennen, dass der Kühlbedarf zwar um ca. 1/3 reduziert werden kann, dies jedoch nur zu sehr geringen absoluten Einsparungen führt. Dem steht ein höherer Mehrbedarf an Wärmeenergie entgegen, der die entfallene Strahlungsenergie im Heizfall der Räume kompensieren muss. Allein aus rein energietechnischer Perspektive ist die E-Control-Verglasung somit nicht sinnvoll.

Tabelle 9: Variantenvergleich des Energiebedarfs mit und ohne E-Control-Verglasung

E-Control		MIN	MAX	B-A	(B-A)/A
Heizleistung	kW	431	439	9	2,0%
Kälteleistung	kW	40	29	-11	-28,5%
elektrische Leistung	kW	95	95	0	0,0%
Wärmebedarf	MWh/a	592	651	59	9,9%
Kältebedarf	MWh/a	12	8	-4	-33,7%
Bedarf elektr. Energie	MWh/a	272	272	0	0,0%

Im Umkehrschluss ist jedoch festzuhalten, dass die thermische Behaglichkeit in diesen ungekühlten Räumen umso mehr von einer effektiven Begrenzung der Insolation, z.B. durch die E-Control-Verglasung, abhängt, die die Temperaturspitzen in den einzelnen Räumen begrenzt. Dazu stellt Tabelle 10 die mittleren Temperaturen (für das Jahr und jeden Monat unter Berücksichtigung ganzer Tage) der Zonen mit E-Control-Einfluss dar. Die Räume, in denen die mittlere Raumtemperatur um  $> 0,1$  K reduziert wird sind farblich hervorgehoben. Es ist also zu erkennen, dass E-Control zu einer spürbaren Verbesserung der thermischen Behaglichkeit in den Sommermonaten beitragen kann.

Tabelle 10: Einfluss der E-Control-Verglasung auf die thermische Behaglichkeit

Ø Raumtemperatur	HZG-99			RLT-05		
	MIN-Stufe (°C)	MAX-Stufe (°C)	Diff. (K)	MIN-Stufe (°C)	MAX-Stufe (°C)	Diff. (K)
Jahr	20,31	19,82	0,49	20,75	20,17	0,58
Jan	18,55	18,52	0,03	18,69	18,65	0,04
Feb	18,63	18,58	0,05	18,78	18,71	0,07
Mrz	18,73	18,64	0,09	18,92	18,81	0,11
Apr	19,24	19,00	0,24	19,54	19,24	0,30
Mai	21,72	20,62	1,10	22,55	21,21	1,34
Jun	21,73	20,72	1,01	22,54	21,33	1,21
Jul	22,70	21,68	1,02	23,62	22,39	1,23
Aug	22,72	21,65	1,07	23,51	22,30	1,21
Sep	21,56	20,67	0,89	22,10	21,12	0,98
Okt	19,86	19,56	0,30	20,14	19,80	0,34
Nov	19,24	19,21	0,03	19,43	19,39	0,04
Dez	18,88	18,86	0,02	19,02	19,00	0,02

#### 4.8. Potential der Nachtauskühlung

Variante B wurde sowohl mit als auch ohne Nachtauskühlbetrieb simuliert, um das Potential abschätzen zu können.

Der Nachtkühlbetrieb einer Anlage wird dann eingeschaltet, wenn ein Raum des versorgten Bereichs Kühlbedarf aufweist und die Außentemperatur 3 K unter der aktuellen Raumtemperatur liegt.

Tabelle 11 stellt den Energiebedarf unter den Annahmen von Variante B mit und ohne Nachtkühlbetrieb gegenüber. Es ist zu erkennen, dass die Einsparung der Kälteleistung (nicht des -bedarfs) durch den Nachtkühlbetrieb einem nennenswerten Mehrbedarf von Wärme und elektrischer Energie zur Luftförderung gegenüber steht. Allein aus rein energietechnischer Perspektive ist die Nachtauskühlung somit nicht sinnvoll.

Tabelle 11: Vergleich des Energiebedarfs der Variante B mit und ohne Nachtkühlbetrieb (NK)

Nachtauskühlung		Var. B mit NK	Var. B ohne NK	B-A	(B-A)/A
Heizleistung	kW	564	541	-23	-4,1%
Kälteleistung	kW	304	313	9	2,8%
elektrische Leistung	kW	172	172	0	0,0%
Wärmebedarf	MWh/a	671	599	-72	-10,7%
Kältebedarf	MWh/a	61	61	0	0,2%
Bedarf elektr. Energie	MWh/a	637	564	-73	-11,5%
davon Luftförderung	MWh/a	283	210	-73	-25,9%

Unter Berücksichtigung der thermischen Behaglichkeit ergibt sich jedoch eine erweiterte Bewertungsgrundlage. Dazu stellt Tabelle 12 die mittleren Temperaturen (für das Jahr und jeden Monat unter Berücksichtigung ganzer Tage) der mechanisch be- und entlüfteten Räume jeder Zone mit und ohne Nachtkühlbetrieb dar. Zudem ist das Potential der Nachtauskühlung zur Senkung dieser Mitteltemperatur in Kelvin angegeben. Auf Basis der negativen Extremwerte dieser Spalte (fett hervorgehoben) kann die Sinnhaftigkeit des Nachtkühlbetriebs für jede Anlage diskutiert werden. Werte, die eine Senkung der mittleren Temperatur um > 1K aufweisen sind farblich hervorgehoben.

Tabelle 12: Einfluss des Nachtkühlbetriebs auf die thermische Behaglichkeit

Ø Raumtemperatur	RLT-01			RLT-02			RLT-03			RLT-04			RLT-05		
	mit (°C)	ohne (°C)	Diff. (K)	mit (°C)	ohne (°C)	Diff. (K)	mit (°C)	ohne (°C)	Diff. (K)	mit (°C)	ohne (°C)	Diff. (K)	mit (°C)	ohne (°C)	Diff. (K)
Jahr	20,06	21,31	-1,25	20,36	20,46	-0,10	18,99	19,73	-0,74	20,21	20,31	-0,10	20,26	20,41	-0,15
Jan	18,93	19,56	-0,63	18,69	18,56	0,13	18,25	18,58	-0,33	18,06	17,97	0,09	18,70	18,72	-0,02
Feb	18,98	19,65	-0,67	18,82	18,70	0,12	18,29	18,72	-0,43	18,23	18,14	0,09	18,77	18,79	-0,02
Mrz	19,16	19,92	-0,76	18,96	18,88	0,08	18,37	18,83	-0,46	18,43	18,36	0,07	18,86	18,90	-0,04
Apr	19,52	20,51	-0,99	19,50	19,52	-0,02	18,46	19,11	-0,65	19,17	19,18	-0,01	19,30	19,36	-0,06
Mai	20,90	22,65	-1,75	21,73	22,00	-0,27	19,45	20,56	-1,11	22,08	22,34	-0,26	21,33	21,58	-0,25
Jun	21,02	22,75	-1,73	21,78	22,05	-0,27	19,76	20,73	-0,97	22,01	22,28	-0,27	21,45	21,70	-0,25
Jul	21,53	23,40	-1,87	22,81	23,15	-0,34	20,42	21,50	-1,08	23,16	23,47	-0,31	22,52	22,86	-0,34
Aug	21,46	23,33	-1,87	22,55	22,90	-0,35	20,33	21,43	-1,10	22,97	23,29	-0,32	22,43	22,79	-0,36
Sep	20,70	22,41	-1,71	21,29	21,57	-0,28	19,19	20,19	-1,00	21,44	21,73	-0,29	21,25	21,55	-0,30
Okt	19,85	21,06	-1,21	19,73	19,81	-0,08	18,48	19,18	-0,70	19,55	19,61	-0,06	19,85	19,96	-0,11
Nov	19,53	20,51	-0,98	19,33	19,32	0,01	18,40	19,02	-0,62	18,92	18,88	0,04	19,45	19,51	-0,06
Dez	19,05	19,79	-0,74	18,97	18,87	0,10	18,35	18,83	-0,48	18,35	18,26	0,09	19,05	19,08	-0,03
Nachtbetrieb (h/a)	2020	0		2177	0		1022	0		2020	0		2171	0	

Die Zonen der Anlagen RLT-02, RLT-04 und RLT-05 weisen eine um maximal 0,35 K niedrigere Monatsmitteltemperatur auf, was eine nur geringfügige Verbesserung der thermischen Behaglichkeit bewirkt. Für die Zonen der Anlage RLT-01 (Audimax) und RLT-03 (Gastronomie) ist ein stärkerer Effekt zu erkennen, der insbesondere in den Sommermonaten zu einer signifikanten Verbesserung der thermischen Behaglichkeit beitragen kann.

Als Ergebnis dieser Betrachtung stellt sich die Notwendigkeit heraus, den Nachtkühlbetrieb zonenweise zu diskutieren und – im Falle der Realisierung – die genaue Parametrierung und Programmierung kritisch zu prüfen, wodurch eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und des Nutzens erzielt werden kann.

#### 4.9. Potential der Kaltwassererzeugung mittels Freikühlturm

Das Potential einer Kaltwassererzeugung mittels Freikühlturm wird bestimmt durch das Zusammenspiel von:

- dem angestrebten Temperaturniveau des Kaltwassers
- dem zeitlichen Zusammenhang von Kühlbedarf und Feuchtkugeltemperatur der Außenluft
- sowie der Auslegung des Kühlturms

Um das Nutzungspotential freier Kühlung im Neubau zu ermitteln, wird die Kälteversorgungsanlage dieses Gebäudes über das Nahkältenetz um einen Verdunstungskühlturm erweitert. Der Kältebedarf des Gebäudes resultiert aus der Kühlung der Außenluft in den Raumluftechnischen Anlagen, sowie aus dem Betrieb der Umluftkühlgeräte in den elektrotechnischen Sonderräume. Um das Potential der Integration von freier Kühlung zu maximieren, werden die Auslegungstemperaturen der Komponenten auf eine Kaltwassertemperatur von ca. 16 °C ausgelegt. Damit ist zugleich die minimale Temperatur in den RLT-Anlagen und damit das Entfeuchtungspotential der Kühler begrenzt, was für diese Betrachtung als akzeptabel angenommen wird.

**Das Ergebnis der Simulation zeigt folgendes Potential: Unter den Annahmen von Variante B ergibt sich ein Kältebedarf des Gebäudes von 61,6 MWh/a. Das Nahkältenetz deckt mit 60,2 MWh/a ca. 97,7 %, die freie Kühlung mit 1,5 MWh/a ca. 2,3 % des Gesamtkältebedarfs.**

Dieses geringe Freikühl-Potential resultiert aus der Witterungsabhängigkeit der Kühllasten, die durch hohe Außentemperaturen bedingt werden. Das Potential der freien Kühlung mittels Verdunstungskühlturm ist jedoch ebenfalls außentemperaturabhängig, so dass der Deckungsanteil der freien Kühlung aufgrund der erreichbaren Vorlauftemperaturen begrenzt ist, d.h. die Gleichzeitigkeit von Kühllast und geeigneter Vorlauftemperaturen stellt den begrenzenden Faktor dar.

Das vorhandene Deckungspotential von 2,3 % resultiert aus den Übergangszeiten, in denen eine ausreichend niedrige Vorlauftemperatur zur Luftaufbereitung durch freie Kühlung gewonnen werden kann, sowie aus der Deckung des Kühlbedarfs der Umluftkühlgeräte und Kühldecken, die einen witterungsunabhängigen (also auch bei niedrigen Außentemperaturen) Kühlbedarf generieren.

## 5. Fazit

Das Ergebnis der Gebäude- und Anlagensimulation ist die Energiebedarfsstruktur des geplanten Gebäudes. Neben der elektrischen Energie wird dem Gebäude insbesondere Wärmeenergie zugeführt werden müssen. Der Kältebedarf ist aufgrund des Umfangs der geplanten Kühltechnik vergleichsweise gering.

Außenliegende Räume werden mit wenigen Ausnahmen nicht gekühlt, so dass witterungsabhängige Wärmequellen sich nur sehr begrenzt auf den Energiebedarf der Anlagentechnik auswirken. Damit sind jedoch insbesondere diese Räume kritisch mit Blick auf die entstehenden Raumtemperaturen zu bewerten. Insbesondere die E-Control-Verglasung und deren Steuerung gewinnen somit aus arbeitsphysiologischer Sicht an Bedeutung.

Die Auswertung der Simulationsergebnisse für die Lüftungstechnik zeigt die Notwendigkeit einer detaillierten Prüfung und Planung des Nachtkühlbetriebes. Dieser ist ebenso wie die E-Control-Verglasung aus rein energietechnischer und wirtschaftlicher Sicht zu diskutieren, kann aber für verschiedene Bereiche im Gebäude zur thermischen Behaglichkeit beitragen. Auch hier ist insbesondere die Steuerung des Nachtkühlbetriebes detailliert zu betrachten.

Der Einsatz von Freikühlern ist sowohl durch den geringen Kältebedarf des Gebäudes als auch durch die Gleichzeitigkeit des Kältebedarfs mit geeigneten Umgebungsbedingungen kritisch zu betrachten. Zwar besteht ein geringfügiges Potential zur Freikühlung, jedoch erfordert eine signifikante Einbindung der Freikühlung eine Anpassung des anlagentechnischen Konzepts.

Die Versorgung des geplanten Gebäudes wird über die externe Energiezentrale auf dem Campus erfolgen. Aufgrund der geringen Temperaturniveaus zum Heizen und Kühlen kann eine Optimierung dieser Energieversorgung durch die Integration des Neubaus erreicht werden. Das Potential hierzu ist insbesondere im Bereich der Hydraulik zu sehen, sowie in der Stützung des BHKW-Betriebs durch die Verwendung von geeigneten thermischen Speichern.

**Titel** **Leuphana Universität Lüneburg**  
**Neubau Zentralgebäude Universität Lüneburg**  
Funktionales Monitoringkonzept

**Projektnummer edbs** ed\_575

Ingenieurgesellschaft  
für energieeffiziente Gebäude mbH

Konzepte – Planung – Betrieb



Mühlenpfordtstraße 23  
38106 Braunschweig

tel: 0531-391 3525

fax: 0531-391 3523

info@energydesign-bs.de

www.energydesign-bs.de

**Auftraggeber** **Leuphana Universität Lüneburg**  
Scharnhorststraße 1  
21335 Lüneburg

**Projektbearbeitung** **energydesign braunschweig GmbH**  
Mühlenpfordtstraße 23  
38106 Braunschweig  
t: 0531-391 63408  
f: 0531-391 3523

Dr.-Ing. Stefan Plesser  
Staatl. gepr. Techniker HKL Nicolas Ahrens-Hein

Aktualisiert:  
B.Eng. Maik Wussler  
B.Sc. Samuel Rischmüller

**Bearbeitungsstand** **Zur Abstimmung Historisierung und Datenexport**

**Datum** 13.02.2017

**Version** V1.8

Geschäftsführer:  
Dipl.-Ing. Carsten Bremer  
Dr.-Ing. Stefan Plesser

Handelsregisternummer:  
HRB 200015

St.Nr.: 2314 01421000870  
Ust ID.: DE243664925

Bankverbindung  
Konto: 1 9999 4500  
BLZ: 250 500 00  
BIC/Swift: NOLADE2HXXX  
IBAN: DE97250500000199994500

Braunschweigische  
Landessparkasse BLSK

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. EINLEITUNG</b> .....	<b>3</b>
1.1. RANDBEDINGUNGEN UND QUELLEN .....	4
1.2. TERMINE .....	5
<b>2. ZIELE DES BETRIEBSMONITORINGS</b> .....	<b>6</b>
2.1. GRUNDLAGEN MESSTECHNIK UND DATENEXPORTFUNKTIONALITÄT .....	7
2.2. MESSDATENERFASSUNG BEI ZÄHLERN.....	8
2.3. VORGABE AKS/BMK.....	9
2.4. SCHNITTSTELLEN UND INFRASTRUKTUR DER GA- UND AUTOMATIONSEBENE .....	9
2.5. EXEMPLARISCHER AUFBAU EINER EXPORTDATEI.....	10
2.6. DEFINITION VON ENERGIEARTEN .....	11
2.7. PRIMÄRENERGIEFAKTOREN .....	12
<b>3. VALIDIERUNG VON PLANUNGSZIELEN ENERGIE</b> .....	<b>12</b>
3.1. WETTERDATEN.....	12
3.2. DARSTELLUNG EINZELKRITERIEN MONITORING ZENTRALGEBÄUDE .....	13
A) GEBÄUDEGESAMTBETRACHTUNG .....	13
B) EINZELANLAGENBETRACHTUNG LÜFTUNG.....	14
C) EINZELANLAGENBETRACHTUNG HEIZUNG.....	20
D) EINZELANLAGENBETRACHTUNG TWW .....	23
E) EINZELANLAGENBETRACHTUNG KÄLTE .....	24
F) EINZELANLAGENBETRACHTUNG STROM.....	26
G) EINZELANLAGENBETRACHTUNG KOMFORT (MODELLRÄUME MIT PRÄSENZMELDER) ...	27
H) EINZELANLAGENBETRACHTUNG KOMFORT (MODELLRÄUME OHNE PRÄSENZMELDER)	28
I) EINZELANLAGENBETRACHTUNG KOMFORT (OPEN-SPACE-RÄUME) .....	29
J) ZÄHLERSCHEMATA .....	30
K) ENERGIEVERSORGUNG UND MESSKONZEPT NACH ENOB-LEITFADEN .....	33

Mühlenpfordtstraße 23  
38106 Braunschweig

tel: 0531-391 3555  
fax: 0531-391 8125

info@energydesign-bs.de  
www.energydesign-bs.de

## 1. EINLEITUNG

Dieser Bericht beschreibt das Konzept für das energetische Betriebsmonitoring für den Neubau des Zentralgebäudes C40 der Leuphana Universität in Lüneburg. Der Bauherr ist die Leuphana Universität Lüneburg, Scharnhorststraße 1, 21335 Lüneburg. Der Bericht beschreibt neben den grundsätzlichen Zielen auch die technischen Rahmenbedingungen, welche für die Umsetzung des Betriebsmonitorings notwendig sind.

Mühlenpfordtstraße 23  
38106 Braunschweigtel: 0531-391 3555  
fax: 0531-391 8125info@energydesign-bs.de  
www.energydesign-bs.de

Es obliegt dem Fachplanerteam, der Leuphana Universität und der Fa. energydesign braunschweig gmbh gemeinsam belastbare Kennwerte für das Betriebsmonitoring zu dokumentieren. Die meisten Zielwerte und Teilenergiekennwerte werden fortlaufend der Planungs- und Auslegungsphase entnommen. Ergänzend zu den Kennwerten aus der Planung sollen Zielwerte aus den Berechnungen des Energieeinsparnachweises entnommen werden.

Die Berechnungen der EnEV dienen dem rechnerischen Nachweis, sowohl zur Einhaltung der gesetzlich geforderten Grenzwerte nach DIN V 18599.

Dieses Konzept soll als Grundlagenvorgabe für die Ausführungs- bzw. Montageplanung verstanden werden. Eine intensive Abstimmung zwischen den Planungsteams ist daher notwendig. Das Fachplanungsteam ist für die Einspielung in den Projektablauf zuständig (LV, Beauftragungen, Inbetriebnahme, Abnahme). Die Umsetzung des Konzeptes ist Bestandteil diverser Forschungsprojekte und muss daher zwingend eingehalten werden.

Sollten aus der Planung lückenhafte oder keine Zielwerte vorhanden sein, sollen effiziente Zielwerte aus der Praxis herangezogen und dargestellt werden. In diesem Fall sind Unterlagen/Angaben von den jeweiligen Fachplanern beizustellen.



Luftaufnahme der zuk. Liegenschaft, Google maps

## 1.1. Randbedingungen und Quellen

Die Randbedingungen, mit denen die Zielkennwerte definiert wurden, basieren im Wesentlichen auf Unterlagen, welche in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt wurden.

Das Konzept wird ab dem Zeitpunkt der Ausführungsplanung permanent aktualisiert.

Ingenieurgesellschaft  
für energieeffiziente Gebäude mbH  
Konzepte – Planung – Betrieb

Mühlenpfordtstraße 23  
38106 Braunschweig

tel: 0531-391 3555  
fax: 0531-391 8125

info@energydesign-bs.de  
www.energydesign-bs.de

Nr.	Was	Wer	Datum/Stand
1.	Energiekonzept	Leuphana/energydesign	Wie umgesetzt
2.	Grundrisse <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lüftung</li> <li>• Heizung</li> <li>• Sanitär</li> </ul>	emutec® GmbH Oststraße 11 22844 Norderstedt	Wird ergänzt
3.	Schema <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lüftung</li> <li>• Heizung</li> <li>• Sanitär</li> </ul>	emutec® GmbH Oststraße 11 22844 Norderstedt	Wird ergänzt
4.	MSR <ul style="list-style-type: none"> <li>• Schema</li> <li>• Funktionsbeschreibung</li> </ul>	emutec® GmbH Oststraße 11 22844 Norderstedt	Wird ergänzt
5.	Starkstrom <ul style="list-style-type: none"> <li>• Grundrisse</li> <li>• Schema</li> <li>• Blockschaltbilder</li> <li>• Funktionsbeschreibung</li> </ul>	emutec® GmbH Oststraße 11 22844 Norderstedt	Wird ergänzt
6.	EnEV-Nachweis	Arup Deutschland GmbH Herr Guariento Joachimstaler Straße 41 10623 Berlin	13.03.2013
7.	Zählerschemata <ul style="list-style-type: none"> <li>• Strom</li> <li>• Hydraulik</li> </ul>	emutec® GmbH Oststraße 11 22844 Norderstedt	Wird ergänzt

## 1.2. Termine

Für die Bearbeitung ist folgende Zeitschiene geplant:

Meilensteine		Zeitfenster
1	Anforderung Leuphana Universität	April 2015
2	Abstimmung Zählerkonzept	Mai/Juni 2015
3	Vorlage Monitoringkonzept mit Zieldefinitionen	Juni 2015
4	Freigabe Monitoringkonzept	Juni 2015
5	Monitoring mit Monatsberichten	noch offen
6	Monitoring mit Quartalsberichten (Abgabe Bericht)	noch offen
7	Monitoring mit Halbjahresberichten (Abgabe Bericht)	noch offen
8	Jahresbericht	noch offen

Mühlenpfordtstraße 23  
38106 Braunschweigtel: 0531-391 3555  
fax: 0531-391 8125info@energydesign-bs.de  
www.energydesign-bs.de

Die Angaben orientieren sich ergänzend am Bauablauf und werden bei Abweichungen während des Prozesses im Konzept aktualisiert.

Das Betriebsmonitoring erfolgt über einen Zeitraum von 3 Jahren.

Die Berichterstattung erfolgt in einem ½-Jahreszyklus.

### 1. Betriebsjahr

- Halbjahresbericht inkl. Präsentation und Abstimmung des ersten Berichts beim AG
- Jahresabschlussbericht nach dem 1. Jahr (Einregulierungsphase)

### 2. Betriebsjahr

- Halbjahresbericht inkl. Präsentation beim AG
- Jahresabschlussbericht nach dem 2. Jahr

### 3. Betriebsjahr

- Jahresabschlussbericht nach dem 3. Jahr
- Abschluss-Präsentation beim AG

Voraussetzung für die Durchführung des Monitorings ist die Bereitstellung der notwendigen Daten vom AG an den AN in der festgelegten Form und Zeit, welche nachfolgend präzise definiert werden.

## 2. ZIELE DES BETRIEBSMONITORINGS

Das Betriebsmonitoring verfolgt grundsätzlich nachfolgende Ziele:

1. Umsetzung und Einhaltung „Leitfaden für das Monitoring der Demonstrationsbauten im Förderkonzept EnBau und EnSan“ (EnOB 2012)
2. Vergleich der Planungsziele im Betrieb (EnEV gem. DIN V 18599)
3. Sammlung und Darstellung der Energieverbräuche
4. Sammlung und Darstellung von Funktionsabläufen der energetisch relevanten Energieverbraucher und Erzeuger der TGA
5. Hinweise zur Betriebsoptimierung
6. Unterstützung bei der Außendarstellung (Detailabstimmung vorher notwendig)

Die energetischen Ziele sind nach DIN V 18599 und ergänzenden Unterlagen im Wesentlichen:

▪ <b>Kältebedarf</b>	<b>2,6 kWh/m<sup>2</sup>·a</b>
▪ <b>Heizwärmebedarf</b>	<b>52,4 kWh/m<sup>2</sup>·a</b>
▪ <b>Strombedarf ges.</b>	<b>17,3 kWh/m<sup>2</sup>·a</b>
▪ <b>Hilfsenergie Strom</b>	<b>0,4 kWh/m<sup>2</sup>·a</b>
▪ <b>Heizlast</b>	<b>52,2 W/m<sup>2</sup></b>
▪ <b>PE</b>	<b>59 kWh/m<sup>2</sup>·a</b>

Die Fa. energydesign braunschweig gmbh dokumentiert die Planungsziele (Soll-Werte), die Komponenten der Gebäudeautomationssysteme erfassen im Betrieb die entsprechenden Ist-Werte und stellen diese gemäß Schnittstellenabstimmung der Leuphana Universität und damit der Fa. energydesign braunschweig gmbh zur Verfügung.

Für die Betriebsanalysen werden Betriebszustände (z.B. Nutzung, Komfort, Stand-by), Energieflüsse im Gebäude und Daten der Gebäudeautomation (z.B. Systemtemperaturen, Betriebszustände, Ventilstellungen etc.) in hoher zeitlicher Auflösung (grundsätzlich **15 minütig**) erfasst. Einzig die Modellräume sind für ein höheres Messintervall (**1 minütig**) vorgesehen.

Die Daten werden ausgewertet, mit den zuvor festgelegten Planungszielen, sofern vorhanden, verglichen und analysiert.

## 2.1. Grundlagen Messtechnik und Datenexportfunktionalität

Monitoringdatenpunkte der jeweiligen Liegenschaften werden aus den Automationsebenen (DDC/Loggingsystem) der einzelnen Gebäude-ISP's an die GLT übergeben. Die Anbindung erfolgt über BACnet. Die Messdaten sind über einen Zeitraum von mindestens 3 Jahren in einer Datenbank der GLT zu speichern und über ein Datenbackup zu sichern. Frühestens nach 3 Jahren dürfen die zuerst aufgezeichneten Daten überschrieben werden. Es ist ausreichend Datenspeicher zur Speicherung aller aktuellen und historischen Messwerte vorzuhalten.

Soweit nicht anders dargestellt, sind alle Messungen oder Meldungen in einer Liegenschaft als 15-minütige Momentanwert-Messungen mit Aufschaltung auf die GLT (Managementebene) vorzusehen. Dies betrifft sämtliche physikalischen und virtuellen Datenpunkte.

In jedem ISP, an denen Monitoringdaten gesammelt werden, ist zusätzlich eine Datensicherung der Monitoringdaten zu realisieren. Die Daten sind in der Qualität des Kapitels 2.5 „Exemplarischer Aufbau einer Exportdatei“ auf SD-Speichersystemen abzulegen. Die Speicherkapazität ist auf mind. 4 Monate Datenaufzeichnung auszuliegen.

Die Werte der Datenpunkte werden auf der Managementebene (GLT) so aufbereitet, dass automatisch eine csv-Datei für einen festzulegenden Datenzeitraum (Dateninhalt der csv-Datei, z.B. 1 Monat) erzeugt wird. Die Namen der csv-Dateien enthalten jeweils einen festzulegenden Klartextnamen. Enthalten sollte sein: Bauherr, Liegenschaft, Gebäudes sowie das Datum der Speicherung (Beispiel: „BauherrYY\_XX\_GebXY\_120728.csv“ für eine Speicherung am 28. Juli 2012). Diese Daten werden dann monatlich über einen E-Mail-Client an eine festgelegte externe E-Mailadresse versendet oder auf einem von extern zugänglichen Laufwerk verfügbar gemacht.

Ingenieurgesellschaft  
für energieeffiziente Gebäude mbH  
Konzepte – Planung – Betrieb

Mühlenpfordtstraße 23  
38106 Braunschweig

tel: 0531-391 3555  
fax: 0531-391 8125

info@energydesign-bs.de  
www.energydesign-bs.de

## 2.2. Messdatenerfassung bei Zählern

Alle Zähler sind als MBUS-Zähler vorzusehen, welche eine Auslesung von 15 Minuten über einen Zeitraum von mind. 3,0 Jahren Laufzeit erlauben (Batteriestandzeit). Bei hydraulischen Zählern sind daher ggf. externe Spannungsversorgungen vorzusehen (230V/24V) oder alternativ mit Spannungsversorgung über MBUS. Bei den Elektrozählern sind alternativ auch andere Busschnittstellen (z.B. KNX) erlaubt. Die Anzahl der Buskonvertierungen ist auf ein Minimum zu begrenzen, da jede Konvertierung Datenausfälle zur Folge haben kann. Die vorgesehenen Messgeräte sind mit dem Auftraggeber und energydesign braunschweig abzustimmen.

Bei weit verzweigten M-BUS-Netzen ist auf die geforderte Kommunikationsperformance zu achten. Gleiches gilt bei der Anzahl der Busteilnehmer bei einem Abfrageintervall von 15 Minuten oder bei den Modellräumen bei einem Abfrageintervall von 1 Minute. Es sind ggf. separate M-BUS Netze aufzubauen. Die Automations- und Managementebene ist entsprechend auf die Aufnahme und Verarbeitung der Daten zu konzipieren.

Enthaltene Wandlerfaktoren (sofern vorhanden) in den Zählern oder auf der Automations-ebene sind vor der Datenspeicherung und dem Export von der GA (KNX-Ebene) auf die „echten“ Werte umzuwandeln.

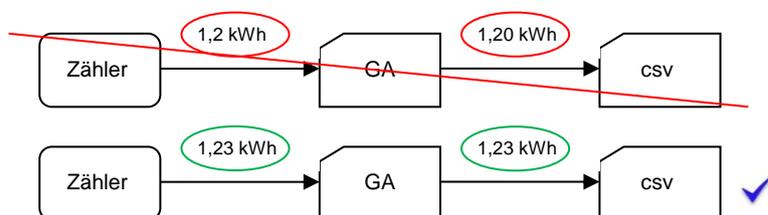
Die Genauigkeit der physikalischen Werte ist wie folgt umzusetzen:

- Arbeit [0,10 kWh]
- Temperaturen [0.1 °C]
- Leistung [0,10 kW]
- Durchfluss [0,10 m³/h]
- weitere Größen sind während der Montageplanung mit dem AG abzustimmen

Die Wertigkeiten der Messwerte sind so umzusetzen, dass die geforderte Genauigkeit auch so vom Fühler oder Energie- und Durchflussmesser geliefert wird und so 1:1 von der GA verarbeitet wird. Die Verarbeitung und Erzeugung von Genauigkeiten, die nicht vom Fühler, Energie- oder Durchflussmesser geliefert wird, ist nicht gewünscht.

### Ein Event-Logging (Change of Value) ist nicht zulässig.

Beispiel:



Hinsichtlich der Zählermessung gelten grundsätzlich folgende zusätzliche Anforderungen:

Ingenieurgesellschaft  
für energieeffiziente Gebäude mbH  
Konzepte – Planung – Betrieb

#### Wärme- und Kältezähler

Folgende physikalischen Werte sind über das BUS-Protokoll abzufragen:

- Arbeit : [kWh] (Zählerstand)
- Leistung : [kW]
- Momentane VL-Temperatur : [°C]
- Momentane RL-Temperatur : [°C]

Mühlenpfordtstraße 23  
38106 Braunschweig

tel: 0531-391 3555  
fax: 0531-391 8125

#### Stromzähler

Folgende physikalischen Werte sind über das Protokoll abzufragen:

- Wirkarbeit : [kWh] (Zählerstand)
- Leistung : [kW]

info@energydesign-bs.de  
www.energydesign-bs.de

#### Trinkwasserzähler

Bei Trinkwasserzählern, welche anstatt einer MBUS-Schnittstelle nur einen S0 oder Impulsausgang anbieten, sollte die Impulsrate mindestens 1 Impuls je 10 Liter betragen. Bei der Messung von größeren Verbräuchen je Zeiteinheit kann in Abstimmung mit energydesign braunschweig gmbh eine alternative Impulsrate vereinbart werden. Die Spannungsversorgung (Batterie) der Impulsgeber ist auf 10-12 Jahren auszulegen oder über ein externes Netzteil mit einer Betriebsspannung zu versorgen.

Folgende physikalischen Werte sind über das Protokoll abzufragen:

- Durchfluss : [m³] (Zählerstand)

### **2.3. Vorgabe AKS/BMK**

Ergänzend gibt es eine Vorgabe zum AKS/BMK welche zwingend einzuhalten ist.

Der Schlüssel ist kurzfristig mitzuteilen, damit dieser im Monitoringkonzept hinterlegt werden kann.

### **2.4. Schnittstellen und Infrastruktur der GA- und Automationsebene**

Im Rahmen der Entwurfs- und Ausführungsplanung wurden umfangreiche Schnittstellen geschaffen und definiert. Diese Schnittstellen zwischen den Fachplanungsinstanzen und Gewerken sind kurzfristig als Übersichtsschema mitzuteilen, damit diese eindeutig sind und im Monitoringkonzept hinterlegt werden können.

## 2.5. Exemplarischer Aufbau einer Exportdatei

	A	B	C	D	E	F
1	Messstelle	1	2	3	4	5
2	GLT-ID	M011DAF1	M011DAF2	M011DAF3	M012DAF4	M012DAF5
3	Klartextbezeichnung	L01/01 ABL Ventilator GE Stromzähler	L01/01 ABL Ventilator ME Wirkleistung	L01/01 ABL Ventilator FR Frequenz AB-Ventilator	L01/01 ZUL Ventilator GE Stromzähler	L01/01 ZUL Ventilator ME Wirkleistung
4	Langtext					
5	min					
6	max					
7	Einheit	KWh	KW	Hz	KWh	KW
8	23.01.2012 00:15	2784	0	0	4013	0
9	23.01.2012 00:18	2784	0	0	4013	0
10	23.01.2012 00:21	2784	0	0	4013	0
11	23.01.2012 00:24	2784	0	0	4013	0
12	23.01.2012 00:27	2784	0	0	4013	0
13	23.01.2012 00:30	2784	0	0	4013	0
14	23.01.2012 00:33	2784	0	0	4013	0
15	23.01.2012 00:36	2784	0	0	4013	0
16	23.01.2012 00:39	2784	0	0	4013	0
17	23.01.2012 00:42	2784	0	0	4013	0
18	23.01.2012 00:45	2784	0	0	4013	0
19	23.01.2012 00:48	2784	0	0	4013	0
20	23.01.2012 00:51	2784	0	0	4013	0
21	23.01.2012 00:54	2784	0	0	4013	0
22	23.01.2012 00:57	2784	0	0	4013	0
23	23.01.2012 01:00	2784	0	0	4013	0
24	23.01.2012 01:03	2784	0	0	4013	0
25	23.01.2012 01:06	2784	0	0	4013	0
26	23.01.2012 01:09	2784	0	0	4013	0
27	23.01.2012 01:12	2784	0	0	4013	0
28	23.01.2012 01:15	2784	0	0	4013	0
29	23.01.2012 01:18	2784	0	0	4013	0
30	23.01.2012 01:21	2784	0	0	4013	0
31	23.01.2012 01:24	2784	0	0	4013	0
32	23.01.2012 01:27	2784	0	0	4013	0
33	23.01.2012 01:30	2784	0	0	4013	0
34	23.01.2012 01:33	2784	0	0	4013	0
35	23.01.2012 01:36	2784	0	0	4013	0
36	23.01.2012 01:39	2784	0	0	4013	0
37	23.01.2012 01:42	2784	0	0	4013	0
38	23.01.2012 01:45	2784	0	0	4013	0
39	23.01.2012 01:48	2784	0	0	4013	0
40	23.01.2012 01:51	2784	0	0	4013	0
41	23.01.2012 01:54	2784	0	0	4013	0
42	23.01.2012 01:57	2784	0	0	4013	0

Der Screenshot zeigt exemplarisch den Aufbau einer csv-Exportdatei, welche mit EXCEL geöffnet wurde.

Ingenieurgesellschaft  
für energieeffiziente Gebäude mbH

Konzepte – Planung – Betrieb

Mühlenpfordtstraße 23  
38106 Braunschweig

tel: 0531-391 3555  
fax: 0531-391 8125

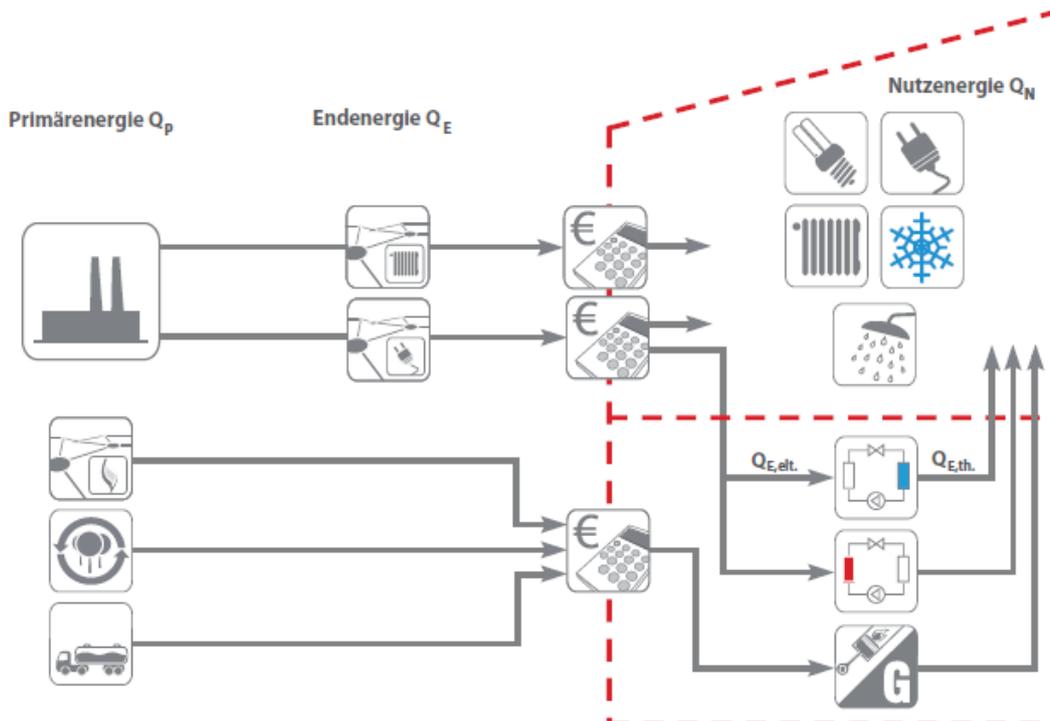
info@energydesign-bs.de  
www.energydesign-bs.de

## 2.6. Definition von Energiearten

Im Konzept werden Energieen nach drei Arten unterschieden:

- Primärenergie  $Q_P$
- Endenergie  $Q_E$
- Nutzenergie  $Q_N$

Im Folgenden werden diese Arten kurz erläutert.



Als Primärenergie  $Q_P$  bezeichnet man den mit Primärenergie-Aufwandszahlen (Primärenergiefaktoren  $f_P$ ) gewichtete Gesamtenergiebedarf eines Gebäudes. Primärenergieträger sind z.B. Steinkohle, Braunkohle, Erdöl, Erdgas, Wasser, Wind, Kernbrennstoffe, Solarstrahlung, Biomasse, Holz.

Die Endenergie  $Q_E$  ist zum einen die Energie, die dem Gebäude zur Deckung des Wärme-, Kälte- und Strombedarfs direkt zugeführt werden muss und zum anderen die Energie, die aufgrund von Umwandlungsprozessen zur weiteren Nutzung im Gebäude entsteht. Die Umwandlungs- und Transportverluste außerhalb des Gebäudes werden nicht berücksichtigt. Die Endenergien werden direkt, meist an der Übergabestelle von Energieversorger zum Verbraucher, gemessen. Bei Wärmepumpen und Kältemaschinen gibt es z.B. zwei Endenergiearten. Zum Antrieb der Maschinen benötigt man elektrische Endenergie  $Q_{E,elektrisch}$ . Diese wird unter bestimmten Umwandlungsfaktoren zu thermischer Endenergie  $Q_{E,thermisch}$  umgewandelt. Fernwärme, Fernkälte und Strom sind klassische Endenergiearten.

Unter der Nutzenergie  $Q_N$  versteht man den Anteil der Endenergie, welcher vom Verbraucher nach Abzug von im Gebäude entstandenen Verlusten für die Deckung des Wärme-, Kälte- und Strombedarfs zur Verfügung steht. Klassische „Verbraucher“ für Nutzenergie sind z.B.: Kühldecken, Heizkörper, elektrisch betriebene Geräte wie Durchlauferhitzer.

## 2.7. Primärenergiefaktoren

Der Primärenergiefaktor wird wie folgt angesetzt:

Strom:	2,6	
Fernwärme:	0,25	
Fernkälte:	0,375	(Abstimmung mit emutec)
Bezugsfläche (EnEV):	17.400,0 m <sup>2</sup>	(Abstimmung mit emutec)
NGF-Fläche:	17.152,0 m <sup>2</sup>	(Abstimmung mit emutec)
Gebäudevolumen:	62.463,6 m <sup>3</sup>	(Abstimmung mit emutec)

Ingenieurgesellschaft  
für energieeffiziente Gebäude mbH  
Konzepte – Planung – Betrieb

Mühlenpfordtstraße 23  
38106 Braunschweig

tel: 0531-391 3555  
fax: 0531-391 8125

info@energydesign-bs.de  
www.energydesign-bs.de

## 3. VALIDIERUNG VON PLANUNGSZIELEN ENERGIE

Im Folgenden werden die einzelnen Zielsetzungen aus der Planung, die im Betriebsmonitoring validiert werden sollen, beschrieben.

### 3.1. Wetterdaten

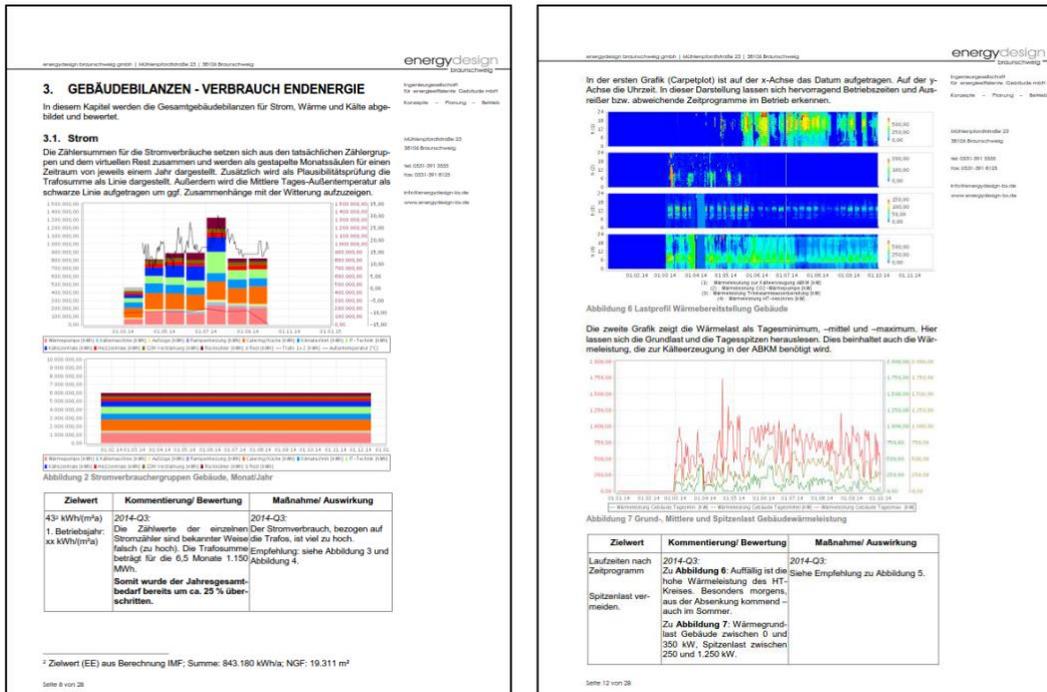
#### 3.1.1. Datenpunktliste Wetterdaten

#	Datenpunkt	Einheit
1.	Außenlufttemperatur	°C, 15-Minuten-Auflösung
2.	Luftfeuchtigkeit	%, 15-Minuten-Auflösung
3.	Windgeschwindigkeit	m/s, 15-Minuten-Auflösung
4.	Windrichtung	15-Minuten-Auflösung
5.	Globalstrahlung horizontal und senkrecht Süd	W/m <sup>2</sup> , 15-Minuten-Auflösung

### 3.2. Darstellung Einzelkriterien Monitoring Zentralgebäude

In der Planung wurden vereinzelt Planungsziele für den Jahres-Energiebedarf und Teil-kennwerte definiert (DIN V 18599). Im Folgenden werden die Ziele mit den Validierungsmethoden dargestellt. Aufgrund dieser Aufstellung werden in der Berichtsphase entsprechende Darstellungsgrafiken erstellt.

Siehe folgende Musterdarstellung aus einem Bericht:



Ingenieurgesellschaft für energieeffiziente Gebäude mbH

Konzepte – Planung – Betrieb

Mühlenpfordtstraße 23  
38106 Braunschweig

tel: 0531-391 3555  
fax: 0531-391 8125

info@energydesign-bs.de  
www.energydesign-bs.de

#### a) Gebäudegesamtbetrachtung

**Allgemeine Anmerkung zu Zählern:** Rechenwerte bzw. Wertübermittlungen dürfen keine Zählwertschwelle haben und müssen die Verbräuche mit ausreichender Genauigkeit (Nachkommastellen) ausgeben. Andernfalls sind zusätzlich die Lastgänge in kW zu liefern.

##### 3.2.1. Datenpunktliste Gebäude-Ebene Strom, Wärme, Kälte

#	Datenpunkt	Einheit
1.	Gebäudestromverbrauch (BEZUG EVU)	kWh, kumulierend, 15-Minuten-Auflösung
2.	Gebäude-Wärmeverbrauch (Fernwärme)	kWh, kumulierend, 15-Minuten-Auflösung
3.	Gebäude-Kälteverbrauch (Nahkälte)	kWh, kumulierend, 15-Minuten-Auflösung
4.	Gebäude-Trinkwasser KALT (PWC)	m³, kumulierend, 15-Minuten-Auflösung
5.	Gebäude-Trinkwasser WARM (PWH)	m³, kumulierend, 15-Minuten-Auflösung

**b) Einzelanlagenbetrachtung Lüftung**

Ingenieurgesellschaft  
für energieeffiziente Gebäude mbH  
Konzepte – Planung – Betrieb

**3.2.2. RLT 1.0 - Auditorium**

#	Datenpunkte RLT 1.0	Einheit, Intervall
1.	Betriebsmeldung Heizen	1/0, 15-Minuten-Auflösung
2.	Betriebsmeldung Kühlen	1/0, 15-Minuten-Auflösung
3.	Betriebsmeldung Nachtauskühlung	1/0, 15-Minuten-Auflösung
4.	Betriebsmeldung Betriebsstufe	1-4, 15-Minuten-Auflösung
5.	Stellsignal FU ZUL	%, 15-Minuten-Auflösung
6.	Zuluftvolumenstrom	m <sup>3</sup> /h, 15-Minuten-Auflösung
7.	Energieverbrauch Zuluftventilator	kWh, 15-Minuten-Auflösung
8.	Stellsignal FU ABL	%, 15-Minuten-Auflösung
9.	Abluftvolumenstrom	m <sup>3</sup> /h, 15-Minuten-Auflösung
10.	Energieverbrauch Abluftventilator	kWh, 15-Minuten-Auflösung
11.	Betriebsmeldung Heizregister-Pumpe	1/0, 15-Minuten-Auflösung
12.	Stellsignal Heizregister-Ventil	%, 15-Minuten-Auflösung
13.	Stellsignal Kühlregister-Ventil	%, 15-Minuten-Auflösung
14.	Stellsignal WRG	%, 15-Minuten-Auflösung
15.	Stellsignal AUL-Klappe	%, 15-Minuten-Auflösung
16.	Stellsignal FOL-Klappe	%, 15-Minuten-Auflösung
17.	Stellsignal UML-Klappe	%, 15-Minuten-Auflösung
18.	Temperatur ZUL	°C, 15-Minuten-Auflösung
19.	Temperatur ZUL nach WRG	°C, 15-Minuten-Auflösung
20.	Temperatur ABL	°C, 15-Minuten-Auflösung
21.	Temperatur AUL	°C, 15-Minuten-Auflösung
22.	Temperatur VL Heizregister	°C, 15-Minuten-Auflösung
23.	Temperatur RL Heizregister	°C, 15-Minuten-Auflösung
24.	Temperatur VL Kühlregister	°C, 15-Minuten-Auflösung
25.	Temperatur RL Kühlregister	°C, 15-Minuten-Auflösung
26.	Differenzdruck ZUL	Pa, 15-Minuten-Auflösung
27.	Differenzdruck ABL	Pa, 15-Minuten-Auflösung
28.	CO <sub>2</sub> -Gehalt ABL	ppm, 15-Minuten-Auflösung

Mühlenpfordtstraße 23  
38106 Braunschweig

tel: 0531-391 3555  
fax: 0531-391 8125

info@energydesign-bs.de  
www.energydesign-bs.de

**3.2.3. RLT 3.0 - Foyer**

#	Datenpunkte RLT 3.0	Einheit, Intervall
1.	Betriebsmeldung Heizen	1/0, 15-Minuten-Auflösung
2.	Betriebsmeldung Kühlen	1/0, 15-Minuten-Auflösung
3.	Betriebsmeldung Nachtauskühlung	1/0, 15-Minuten-Auflösung
4.	Stellsignal FU ZUL	%, 15-Minuten-Auflösung
5.	Zuluftvolumenstrom	m <sup>3</sup> /h, 15-Minuten-Auflösung
6.	Energieverbrauch Zuluftventilator	kWh, 15-Minuten-Auflösung
7.	Stellsignal FU ABL	%, 15-Minuten-Auflösung
8.	Abluftvolumenstrom	m <sup>3</sup> /h, 15-Minuten-Auflösung
9.	Energieverbrauch Abluftventilator	kWh, 15-Minuten-Auflösung
10.	Betriebsmeldung Heizregister-Pumpe	1/0, 15-Minuten-Auflösung
11.	Stellsignal Heizregister-Ventil	%, 15-Minuten-Auflösung
12.	Stellsignal Kühlregister-Ventil	%, 15-Minuten-Auflösung
13.	Stellsignal WRG	%, 15-Minuten-Auflösung
14.	Stellsignal AUL-Klappe	%, 15-Minuten-Auflösung
15.	Stellsignal FOL-Klappe	%, 15-Minuten-Auflösung
16.	Stellsignal UML-Klappe	%, 15-Minuten-Auflösung
17.	Temperatur ZUL	°C, 15-Minuten-Auflösung
18.	Temperatur ZUL nach WRG	°C, 15-Minuten-Auflösung
19.	Temperatur ABL	°C, 15-Minuten-Auflösung
20.	Temperatur AUL	°C, 15-Minuten-Auflösung
21.	Temperatur VL Heizregister	°C, 15-Minuten-Auflösung
22.	Temperatur RL Heizregister	°C, 15-Minuten-Auflösung
23.	Temperatur VL Kühlregister	°C, 15-Minuten-Auflösung
24.	Temperatur RL Kühlregister	°C, 15-Minuten-Auflösung
25.	Differenzdruck ZUL	Pa, 15-Minuten-Auflösung
26.	Differenzdruck ABL	Pa, 15-Minuten-Auflösung
27.	CO <sub>2</sub> -Gehalt ABL	ppm, 15-Minuten-Auflösung
28.	Zuluftfeuchte (rel.)	%, 15-Minuten-Auflösung
29.	Abluftfeuchte (rel.)	%, 15-Minuten-Auflösung

Ingenieurgesellschaft  
für energieeffiziente Gebäude mbH  
Konzepte – Planung – Betrieb

Mühlenpfordtstraße 23  
38106 Braunschweig

tel: 0531-391 3555  
fax: 0531-391 8125

info@energydesign-bs.de  
www.energydesign-bs.de

**3.2.4. RLT 4.0 – Allgemeine Luftversorgung**

#	Datenpunkte RLT 4.0	Einheit, Intervall
1.	Betriebsmeldung Heizen	1/0, 15-Minuten-Auflösung
2.	Betriebsmeldung Kühlen	1/0, 15-Minuten-Auflösung
3.	Betriebsmeldung Nachtauskühlung	1/0, 15-Minuten-Auflösung
4.	Stellsignal FU ZUL	%, 15-Minuten-Auflösung
5.	Zuluftvolumenstrom	m <sup>3</sup> /h, 15-Minuten-Auflösung
6.	Energieverbrauch Zuluftventilator	kWh, 15-Minuten-Auflösung
7.	Stellsignal FU ABL	%, 15-Minuten-Auflösung
8.	Abluftvolumenstrom	m <sup>3</sup> /h, 15-Minuten-Auflösung
9.	Energieverbrauch Abluftventilator	kWh, 15-Minuten-Auflösung
10.	Betriebsmeldung Heizregister-Pumpe	1/0, 15-Minuten-Auflösung
11.	Stellsignal Heizregister-Ventil	%, 15-Minuten-Auflösung
12.	Stellsignal Kühlregister-Ventil	%, 15-Minuten-Auflösung
13.	Stellsignal WRG	%, 15-Minuten-Auflösung
14.	Stellsignal AUL-Klappe	%, 15-Minuten-Auflösung
15.	Stellsignal FOL-Klappe	%, 15-Minuten-Auflösung
16.	Stellsignal UML-Klappe	%, 15-Minuten-Auflösung
17.	Temperatur ZUL	°C, 15-Minuten-Auflösung
18.	Temperatur ZUL nach WRG	°C, 15-Minuten-Auflösung
19.	Temperatur ABL	°C, 15-Minuten-Auflösung
20.	Temperatur AUL	°C, 15-Minuten-Auflösung
21.	Temperatur VL Heizregister	°C, 15-Minuten-Auflösung
22.	Temperatur RL Heizregister	°C, 15-Minuten-Auflösung
23.	Temperatur VL Kühlregister	°C, 15-Minuten-Auflösung
24.	Temperatur RL Kühlregister	°C, 15-Minuten-Auflösung
25.	Differenzdruck ZUL	Pa, 15-Minuten-Auflösung
26.	Differenzdruck ABL	Pa, 15-Minuten-Auflösung
27.	CO <sub>2</sub> -Gehalt ABL	ppm, 15-Minuten-Auflösung
28.	Zuluftfeuchte (rel.)	%, 15-Minuten-Auflösung
29.	Abluftfeuchte (rel.)	%, 15-Minuten-Auflösung

Ingenieurgesellschaft  
für energieeffiziente Gebäude mbH  
Konzepte – Planung – Betrieb

Mühlenpfordtstraße 23  
38106 Braunschweig

tel: 0531-391 3555  
fax: 0531-391 8125

info@energydesign-bs.de  
www.energydesign-bs.de

**3.2.5. RLT 6.0 - Cafeteria**

#	Datenpunkte RLT 6.0	Einheit, Intervall
1.	Betriebsmeldung Heizen	1/0, 15-Minuten-Auflösung
2.	Betriebsmeldung Kühlen	1/0, 15-Minuten-Auflösung
3.	Betriebsmeldung Nachtauskühlung	1/0, 15-Minuten-Auflösung
4.	Stellsignal FU ZUL	%, 15-Minuten-Auflösung
5.	Zuluftvolumenstrom	m <sup>3</sup> /h, 15-Minuten-Auflösung
6.	Energieverbrauch Zuluftventilator	kWh, 15-Minuten-Auflösung
7.	Stellsignal FU ABL	%, 15-Minuten-Auflösung
8.	Abluftvolumenstrom	m <sup>3</sup> /h, 15-Minuten-Auflösung
9.	Energieverbrauch Abluftventilator	kWh, 15-Minuten-Auflösung
10.	Betriebsmeldung Heizregister-Pumpe	1/0, 15-Minuten-Auflösung
11.	Stellsignal Heizregister-Ventil	%, 15-Minuten-Auflösung
12.	Stellsignal Kühlregister-Ventil	%, 15-Minuten-Auflösung
13.	Stellsignal WRG	%, 15-Minuten-Auflösung
14.	Stellsignal AUL-Klappe	%, 15-Minuten-Auflösung
15.	Stellsignal FOL-Klappe	%, 15-Minuten-Auflösung
16.	Stellsignal UML-Klappe	%, 15-Minuten-Auflösung
17.	Temperatur ZUL	°C, 15-Minuten-Auflösung
18.	Temperatur ZUL nach WRG	°C, 15-Minuten-Auflösung
19.	Temperatur ABL	°C, 15-Minuten-Auflösung
20.	Temperatur AUL	°C, 15-Minuten-Auflösung
21.	Temperatur VL Heizregister	°C, 15-Minuten-Auflösung
22.	Temperatur RL Heizregister	°C, 15-Minuten-Auflösung
23.	Temperatur VL Kühlregister	°C, 15-Minuten-Auflösung
24.	Temperatur RL Kühlregister	°C, 15-Minuten-Auflösung
25.	Differenzdruck ZUL	Pa, 15-Minuten-Auflösung
26.	Differenzdruck ABL	Pa, 15-Minuten-Auflösung
27.	CO <sub>2</sub> -Gehalt ABL	ppm, 15-Minuten-Auflösung
28.	Zuluftfeuchte (rel.)	%, 15-Minuten-Auflösung
29.	Abluftfeuchte (rel.)	%, 15-Minuten-Auflösung

Ingenieurgesellschaft  
für energieeffiziente Gebäude mbH  
Konzepte – Planung – Betrieb

Mühlenpfordtstraße 23  
38106 Braunschweig

tel: 0531-391 3555  
fax: 0531-391 8125

info@energydesign-bs.de  
www.energydesign-bs.de

**3.2.6. RLT 7.0 - Ausstellungsflächen**

#	Datenpunkte RLT 3.0	Einheit, Intervall
1.	Betriebsmeldung Heizen	1/0, 15-Minuten-Auflösung
2.	Betriebsmeldung Nachtauskühlung	1/0, 15-Minuten-Auflösung
3.	Stellsignal FU ZUL	%, 15-Minuten-Auflösung
4.	Zuluftvolumenstrom	m <sup>3</sup> /h, 15-Minuten-Auflösung
5.	Energieverbrauch Zuluftventilator	kWh, 15-Minuten-Auflösung
6.	Stellsignal FU ABL	%, 15-Minuten-Auflösung
7.	Abluftvolumenstrom	m <sup>3</sup> /h, 15-Minuten-Auflösung
8.	Energieverbrauch Abluftventilator	kWh, 15-Minuten-Auflösung
9.	Betriebsmeldung Heizregister-Pumpe	1/0, 15-Minuten-Auflösung
10.	Stellsignal Heizregister-Ventil	%, 15-Minuten-Auflösung
11.	Stellsignal WRG	%, 15-Minuten-Auflösung
12.	Stellsignal AUL-Klappe	%, 15-Minuten-Auflösung
13.	Stellsignal FOL-Klappe	%, 15-Minuten-Auflösung
14.	Stellsignal UML-Klappe	%, 15-Minuten-Auflösung
15.	Temperatur ZUL	°C, 15-Minuten-Auflösung
16.	Temperatur ZUL nach WRG	°C, 15-Minuten-Auflösung
17.	Temperatur ABL	°C, 15-Minuten-Auflösung
18.	Temperatur AUL	°C, 15-Minuten-Auflösung
19.	Temperatur VL Heizregister	°C, 15-Minuten-Auflösung
20.	Temperatur RL Heizregister	°C, 15-Minuten-Auflösung
21.	Differenzdruck ZUL	Pa, 15-Minuten-Auflösung
22.	Differenzdruck ABL	Pa, 15-Minuten-Auflösung
23.	CO <sub>2</sub> -Gehalt ABL	ppm, 15-Minuten-Auflösung
24.	Zuluftfeuchte (rel.)	%, 15-Minuten-Auflösung
25.	Abluftfeuchte (rel.)	%, 15-Minuten-Auflösung

Ingenieurgesellschaft  
für energieeffiziente Gebäude mbH  
Konzepte – Planung – Betrieb

Mühlenpfordtstraße 23  
38106 Braunschweig

tel: 0531-391 3555  
fax: 0531-391 8125

info@energydesign-bs.de  
www.energydesign-bs.de

**3.2.7. RLT 8.0 – Küche/Spülküche**

#	Datenpunkte RLT 8.0	Einheit, Intervall
1.	Betriebsmeldung Heizen	1/0, 15-Minuten-Auflösung
2.	Betriebsmeldung Kühlen	1/0, 15-Minuten-Auflösung
3.	Betriebsmeldung Nachtauskühlung	1/0, 15-Minuten-Auflösung
4.	Stellsignal FU ZUL	%, 15-Minuten-Auflösung
5.	Zuluftvolumenstrom	m <sup>3</sup> /h, 15-Minuten-Auflösung
6.	Energieverbrauch Zuluftventilator	kWh, 15-Minuten-Auflösung
7.	Stellsignal FU ABL	%, 15-Minuten-Auflösung
8.	Abluftvolumenstrom	m <sup>3</sup> /h, 15-Minuten-Auflösung
9.	Energieverbrauch Abluftventilator	kWh, 15-Minuten-Auflösung
10.	Betriebsmeldung Heizregister-Pumpe	1/0, 15-Minuten-Auflösung
11.	Stellsignal Heizregister-Ventil	%, 15-Minuten-Auflösung
12.	Stellsignal Kühlregister-Ventil	%, 15-Minuten-Auflösung
13.	Stellsignal WRG	%, 15-Minuten-Auflösung
14.	Stellsignal AUL-Klappe	%, 15-Minuten-Auflösung
15.	Stellsignal FOL-Klappe	%, 15-Minuten-Auflösung
16.	Stellsignal UML-Klappe	%, 15-Minuten-Auflösung
17.	Temperatur ZUL	°C, 15-Minuten-Auflösung
18.	Temperatur ZUL nach WRG	°C, 15-Minuten-Auflösung
19.	Temperatur ABL	°C, 15-Minuten-Auflösung
20.	Temperatur AUL	°C, 15-Minuten-Auflösung
21.	Temperatur VL Heizregister	°C, 15-Minuten-Auflösung
22.	Temperatur RL Heizregister	°C, 15-Minuten-Auflösung
23.	Temperatur VL Kühlregister	°C, 15-Minuten-Auflösung
24.	Temperatur RL Kühlregister	°C, 15-Minuten-Auflösung
25.	Differenzdruck ZUL	Pa, 15-Minuten-Auflösung
26.	Differenzdruck ABL	Pa, 15-Minuten-Auflösung
27.	CO <sub>2</sub> -Gehalt ABL	ppm, 15-Minuten-Auflösung
28.	Zuluftfeuchte (rel.)	%, 15-Minuten-Auflösung
29.	Abluftfeuchte (rel.)	%, 15-Minuten-Auflösung

Ingenieurgesellschaft  
für energieeffiziente Gebäude mbH  
Konzepte – Planung – Betrieb

Mühlenpfordtstraße 23  
38106 Braunschweig

tel: 0531-391 3555  
fax: 0531-391 8125

info@energydesign-bs.de  
www.energydesign-bs.de

**c) Einzelanlagenbetrachtung Heizung**

Grundsätzlich wurden in den Ausführungsschemata der HLS die Energiezähler dargestellt. Es erfolgt die Dokumentation der derzeitigen Stände und Umfänge im weiteren Verlauf. Separate Gewerke-**Zählerschemata** sollen erstellt werden.

Grundsätzlich sind je Heizkreis folgende Parameter über die GA an die GLT und dem Datenexport zu übergeben:

Ingenieurgesellschaft  
für energieeffiziente Gebäude mbH  
Konzepte – Planung – Betrieb

Mühlenpfordtstraße 23  
38106 Braunschweig

tel: 0531-391 3555  
fax: 0531-391 8125

info@energydesign-bs.de  
www.energydesign-bs.de

**3.2.8. Datenpunktliste Anlagen-Ebene Heizkreise**

#	Datenpunkte je Heizkreis	Einheit
1.	Wärmeverbrauch	kWh, kumulierend, 15-Minuten-Auflösung
2.	Außenlufttemperatur	°C, 15-Minuten-Auflösung
3.	Temperatur VL	°C, 15-Minuten-Auflösung
4.	Temperatur RL	°C, 15-Minuten-Auflösung
5.	Betriebsmeldung Umwälzpumpe	1/0, 15-Minuten-Auflösung
6.	Stellung Mischerventil	%, 15-Minuten-Auflösung

**Gesamtschema:**

**Projekt**  
**Neubau Zentralgebäude**  
Leuphana Universität Lüneburg  
Scharmhorststraße 1  
21335 Lüneburg

**Bauherr**  
Stiftung Universität Lüneburg  
Scharmhorststraße 1  
21335 Lüneburg

**Entwurf**  
Leuphana Universität Lüneburg  
Prof. Daniel Liebskind  
Scharmhorststraße 1  
21335 Lüneburg

**Planverfasser**  
**GEBR. KNUF**  
Heizungsbau GmbH  
Lingen, Handelsstraße 7  
Seit 1910  
Wärmetechnik Lufttechnik Wassertechnik

**Maßstab** 1:1  
**Leistungsphase** 9  
**Bearbeiter** Gr.  
**Planerstellung** 09.03.2015  
**Indikatordatum** ---/---/---

LUE\_W11\_8\_000\_XX\_9802\_---.dwg 1456x594mm

**Zählerliste - Heizungsanlage**

Nr.	Einbauort	DN	Qn m³/h
ZH-01	KG - Verteilerabgang Einspeisung NT-Netz	65	25
ZH-02	KG - Verteilerabgang Cafeteria	20	2,5
ZH-03	KG - Verteilerabgang RLT-Zentrale 1		
ZH-04	KG - RLT 6.0	25	6
ZH-05	KG - RLT 7.0	20	2,5
ZH-06	KG - RLT 8.0	40	10
ZH-07	KG - Verteilerabgang Einspeisung MT-Netz	65	25
ZH-08	KG - Verteilerabgang Heizflächen SU	25	3,5
ZH-09	KG - Verteilerabgang Heizflächen FZ	40	10
ZH-10	KG - Verteilerabgang Heizflächen SE	25	3,5
ZH-11	KG - Verteilerabgang Heizflächen AU	20	0,6
ZH-12	KG - Verteilerabgang RLT-Zentrale 2		
ZH-13	KG - Verteilerabgang Trinkwassererwärmung	40	10
ZH-14	KG - RLT 1.0	25	3,5
ZH-15	KG - RLT 3.0	20	2,5
ZH-16	KG - RLT 4.0	40	10

Ingenieurgesellschaft  
für energieeffiziente Gebäude mbH  
Konzepte – Planung – Betrieb

Mühlenpfordtstraße 23  
38106 Braunschweig

tel: 0531-391 3555  
fax: 0531-391 8125

info@energydesign-bs.de  
www.energydesign-bs.de

### Heizungsschema Auditorium:

Plan Code: LUE\_W11\_5\_000\_AU\_9S12\_... Kurz-Nr.: H9S12

Planinhalt: Heizungsinstallation Auditorium Strangschema

Mit der Ausführung unter Berücksichtigung der in grün eingetragenen Änderung einverstanden.  
Diese Genehmigung erstreckt sich nur auf die Ausführung mit dem Entwurfsabsichten und Planung. Sie erstreckt sich nicht auf die Montage- oder Lieferform nicht von der Verantwortung für die Richtigkeit von Konstruktion und Ausführung.  
Norderstedt, den 20.03.2015  
G. Mulfec GmbH  
J. A. Ch. Horn

Projekt: **Neubau Zentralgebäude**  
Leuphana Universität Lüneburg **EINGEGANGEN**  
20.03.2015  
Scharnhorststraße 1  
21335 Lüneburg

Bauherr: **Stiftung Universität Lüneburg**  
Scharnhorststraße 1  
21335 Lüneburg  
Tel: +49 (0) 4131 677-1000  
Fax: +49 (0) 4131 677-1090

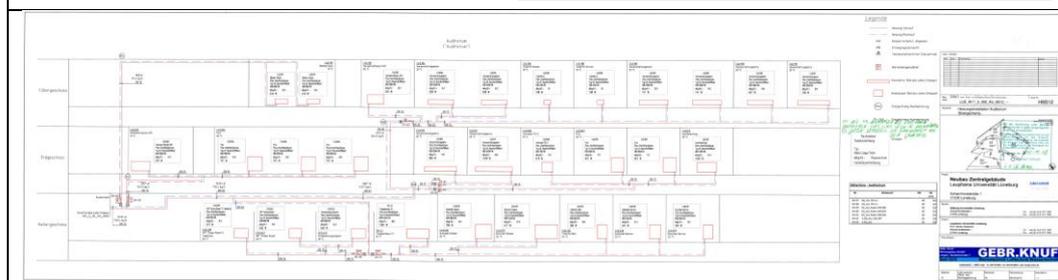
Entwurf: **Leuphana Universität Lüneburg**  
Prof. Daniel Libeskind  
Scharnhorststraße 1  
21335 Lüneburg  
Tel: +49 (0) 4131 677-1000  
Fax: +49 (0) 4131 677-1090

Planverfasser: **GEBR. KNUF**  
Heizungsbau GmbH  
Lingen, Handelsstraße 7  
Seit 1910 **Wärmetechnik Lufttechnik Wassertechnik**  
Handelsstraße 7 - 49809 Lingen - Tel. 0591/973890 - Fax 0591/973933 - gbr-knuf@t-online.de

Maßstab	Leistungsphase Werk- und Montageplanung	Bearbeiter	Planerstellung	Indextatum
%		Gr.	09.03.2015	-/-

#### Zählerliste - Auditorium

Nr.	Einbaort	DN	Qn m³/h
ZH-57	KG_AU, TR-2.1	20	0,6
ZH-58	KG_AU, TR-2.1	20	0,6
ZH-59	EG_AU, Nahe C40.002	20	0,6
ZH-60	EG_AU, Nahe C40.010	20	0,6
ZH-61	EG_AU, Nahe C40.010	20	0,6
ZH-62	1.OG_AU, C40.197	20	0,6
ZH-63	1.OG_AU	20	0,6



### Heizungsschema Schacht Aufzug 1

Planinhalt: Heizungsinstallation Forschungszentrum Strangschema Schacht Aufzug I

Mit der Ausführung unter Berücksichtigung der in grün eingetragenen Änderung einverstanden.  
Diese Genehmigung erstreckt sich nur auf die Ausführung mit dem Entwurfsabsichten und Planung. Sie erstreckt sich nicht auf die Montage- oder Lieferform nicht von der Verantwortung für die Richtigkeit von Konstruktion und Ausführung.  
Norderstedt, den 20.03.2015  
G. Mulfec GmbH  
J. A. Ch. Horn

Projekt: **Neubau Zentralgebäude**  
Leuphana Universität Lüneburg **EINGEGANGEN**  
20.03.2015  
Scharnhorststraße 1  
21335 Lüneburg

Bauherr: **Stiftung Universität Lüneburg**  
Scharnhorststraße 1  
21335 Lüneburg  
Tel: +49 (0) 4131 677-1000  
Fax: +49 (0) 4131 677-1090

Entwurf: **Leuphana Universität Lüneburg**  
Prof. Daniel Libeskind  
Scharnhorststraße 1  
21335 Lüneburg  
Tel: +49 (0) 4131 677-1000  
Fax: +49 (0) 4131 677-1090

Planverfasser: **GEBR. KNUF**  
Heizungsbau GmbH  
Lingen, Handelsstraße 7  
Seit 1910 **Wärmetechnik Lufttechnik Wassertechnik**  
Handelsstraße 7 - 49809 Lingen - Tel. 0591/973890 - Fax 0591/973933 - gbr-knuf@t-online.de

Maßstab	Leistungsphase Werk- und Montageplanung	Bearbeiter	Planerstellung	Indextatum
%		Gr.	09.03.2015	-/-

#### Zählerliste - Forschungszentrum

Nr.	Einbaort	DN	Qn m³/h
ZH-38	2.OG_FZ, Schacht Aufzug 1	20	0,6
ZH-39	3.OG_FZ, Schacht Aufzug 1	20	0,6
ZH-40	4.OG_FZ, Schacht Aufzug 1	20	0,6
ZH-41	5.OG_FZ, Schacht Aufzug 1	20	0,6
ZH-42	7.OG_FZ, Nahe Schacht Aufzug 1	20	0,6
ZH-43	C40.310	20	0,6
ZH-44	C40.309	20	0,6
ZH-45	C40.308	20	0,6
ZH-46	C40.410	20	0,6
ZH-47	C40.409	20	0,6
ZH-48	C40.408	20	0,6
ZH-49	C40.606-1	20	0,6
ZH-50	C40.606-2	20	0,6
ZH-51	C40.601	20	0,6

Ingenieurgesellschaft  
für energieeffiziente Gebäude mbH  
Konzepte – Planung – Betrieb

Mühlenpfordtstraße 23  
38106 Braunschweig

tel: 0531-391 3555  
fax: 0531-391 8125

info@energydesign-bs.de  
www.energydesign-bs.de



### Heizungsschema Schacht Aufzug 4

Plan Code	Objekt LUE_W11_5_000_FZ_9S09	Kurz-Nr. H9S09		
Projekt Heizungsinstallation Forschungszentrum Strangschema				
<p>Stand Ausführungsplanung Index: Datum:</p> <p>Mit der Ausführung unter Beachtung der in grün eingekreisten Änderung einverstanden. Leistungsverpflichtung erstreckt sich nur auf Übereinstimmung mit dem Einheitsabschnitts-Strang-Planung. Sie erbringt die Montage- und Lieferfirma nicht von der Verantwortung für die Richtigkeit von Konstruktion und Ausführung. Korrespondenz: 2015-07-09 G. Mumtaz GmbH J. A. G. Knuß</p>				
Projekt <b>Neubau Zentralgebäude</b> Leuphana Universität Lüneburg Scharnhorststraße 1 21335 Lüneburg				
Bauherr Stiftung Universität Lüneburg Scharnhorststraße 1 21335 Lüneburg Tel: +49 (0) 4131 677-1000 Fax: +49 (0) 4131 677-1000				
Entwurf Leuphana Universität Lüneburg Prof. Daniel Lieskind Scharnhorststraße 1 21335 Lüneburg Tel: +49 (0) 4131 677-1000 Fax: +49 (0) 4131 677-1000				
Planverfasser <b>GEBR. KNUF</b> Heizungsbau GmbH Lingen, Handelsstraße 7 Seit 1910 Wärmetechnik Lufttechnik Wassertechnik Handelsstraße 7 - 49089 Lingen - Tel. 0591/973990 - Fax 0591/973933 - geb-knu@t-online.de				
Maßstab %	Leistungsphase Werk und Montageplanung	Bearbeiter Gr.	Planstellungs- datum 09.03.2015	Individuum ---

#### Zählerliste - Forschungszentrum

Nr.	Einbauort	DN	Qn m³/h
ZH-24	KG_FZ	20	0,6
ZH-25	EG_FZ, Schacht V	20	0,6
ZH-26	M_FZ, Schacht V	20	0,6
ZH-27	1.OG_FZ, Schacht V	20	0,6
ZH-28	2.OG_FZ, Schacht V	20	0,6
ZH-29	3.OG_FZ, Schacht V	20	0,6
ZH-30	4.OG_FZ, Schacht V	20	0,6
ZH-31	5.OG_FZ, Schacht V	20	0,6
ZH-32	C40.328	20	0,6
ZH-33	C40.329	20	0,6
ZH-34	C40.330	20	0,6
ZH-35	C40.428	20	0,6
ZH-36	C40.429	20	0,6
ZH-37	C40.330	20	0,6



**d) Einzelanlagenbetrachtung TWW**

Ingenieurgesellschaft  
für energieeffiziente Gebäude mbH  
Konzepte – Planung – Betrieb

**3.2.9. Datenpunktliste PWW-Erzeugung Heizregelkreis**

#	Datenpunkte PWW-Erzeugung	Einheit
1.	Wärmeverbrauch	kWh, kumulierend, 15-Minuten-Auflösung
2.	Außenlufttemperatur	°C, 15-Minuten-Auflösung
3.	Temperatur VL prim.	°C, 15-Minuten-Auflösung
4.	Temperatur RL prim.	°C, 15-Minuten-Auflösung
5.	Betriebsmeldung Umwälzpumpe prim.	1/0, 15-Minuten-Auflösung
6.	Stellung Mischerventil	%, 15-Minuten-Auflösung
7.	Speichertemperatur oben	°C, 15-Minuten-Auflösung
8.	Speichertemperatur unten	°C, 15-Minuten-Auflösung
9.	Vorlauftemperatur sek.	°C, 15-Minuten-Auflösung
10.	Betriebsmeldung Umwälzpumpe sek.	1/0, 15-Minuten-Auflösung

Mühlenpfordtstraße 23  
38106 Braunschweig

tel: 0531-391 3555  
fax: 0531-391 8125

info@energydesign-bs.de  
www.energydesign-bs.de

**3.2.10. Datenpunktliste TWW-Zapfmengenmessung**

#	Datenpunkte Zapfmengenmessung	Einheit
1.	Zapfmenge Küche	m <sup>3</sup> , kumulierend, 15-Minuten-Auflösung
2.	Zapfmenge Cafeteria	m <sup>3</sup> , 15-Minuten-Auflösung

**e) Einzelanlagenbetrachtung Kälte**

Ingenieurgesellschaft  
für energieeffiziente Gebäude mbH  
Konzepte – Planung – Betrieb

**3.2.11. Datenpunktliste PKW-Versorgung FKS (Kaltwasserübergabe EON)**

#	Datenpunkte PKW-Versorgung	Einheit
1.	Kälteverbrauch	kWh, kumulierend, 15-Minuten-Auflösung
2.	Vorlauftemperatur	°C, 15-Minuten-Auflösung
3.	Rücklauftemperatur	°C, 15-Minuten-Auflösung

Mühlenpfordtstraße 23  
38106 Braunschweig

tel: 0531-391 3555  
fax: 0531-391 8125

info@energydesign-bs.de  
www.energydesign-bs.de

**3.2.12. Datenpunktliste Anlagen-Ebene Kühlkreise**

Grundsätzlich sind je Kühlkreis folgende Parameter über die GA an die GLT und dem Datenexport zu übergeben:

#	Datenpunkte je Kühlkreis	Einheit
1.	Kälteverbrauch	kWh, kumulierend, 15-Minuten-Auflösung
2.	Außenlufttemperatur	°C, 15-Minuten-Auflösung
3.	Temperatur VL	°C, 15-Minuten-Auflösung
4.	Temperatur RL	°C, 15-Minuten-Auflösung
5.	Betriebsmeldung Umwälzpumpe	1/0, 15-Minuten-Auflösung

Weitere Feldzähler gemäß Schema LUE\_HKA\_5\_000\_XX\_9S01\_g-F ab Zähler ZK11  
(Die Einzelparameter je Kriterium/Thema sind mit in die Exportfunktionalität zu implementieren):

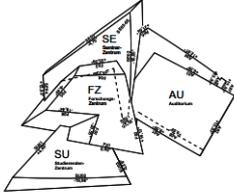
Ingenieurgesellschaft  
für energieeffiziente Gebäude mbH  
Konzepte – Planung – Betrieb

Mühlenpfordtstraße 23  
38106 Braunschweig

tel: 0531-391 3555  
fax: 0531-391 8125

info@energydesign-bs.de  
www.energydesign-bs.de

**Gesamtschema:**



**Projekt**  
**Neubau Zentralgebäude**  
**Leuphana Universität Lüneburg**  
Scharmhorststraße 1  
21335 Lüneburg

**Bauherr**  
Stiftung Universität Lüneburg  
Scharmhorststraße 1  
21335 Lüneburg  
Tel: +49 (0) 4131 677-1000  
Fax: +49 (0) 4131 677-1090

**Entwurf**  
Leuphana Universität Lüneburg  
Prof. Daniel Liebskind  
Scharmhorststraße 1  
21335 Lüneburg  
Tel: +49 (0) 4131 677-1000  
Fax: +49 (0) 4131 677-1090

**Planungsphase**  
emutec  
Engineering für Mensch, Umwelt und Technik  
Oststraße 11  
22544 Nordstedt  
Tel: +49 (0) 40 - 30 95 66 -0  
Fax: +49 (0) 40 - 30 95 66 -40  
e-mail: kontakt@emutec.de

**Plan Code**  
LUE\_HKA\_5\_000\_XX\_9S01\_g-F

**Planungsphase**  
Kälteinstallation  
Schaltschema

**Maßstab**  
Ausführungsplanung

**Bearbeiter**  
SP

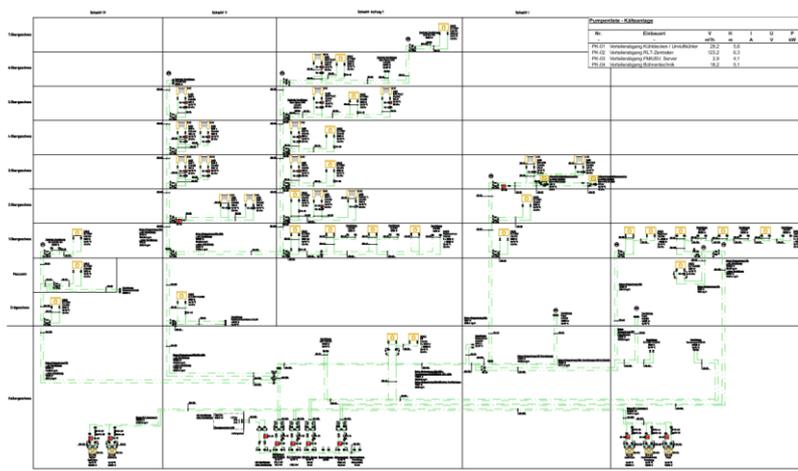
**Planerstellung**  
25.02.2013

**Indextatum**  
27.02.2015

**Zählerliste - Kälteanlage**

Nr.	Einbauort	DN	Qn m³/h
ZK-01	KG - Wärmeübergabestation	200	250
ZK-02	KG - Verteilerabgang Kühldecken Umluftkühler	100	60
ZK-03	KG - Verteilerabgang RLT - Zentralen	200	250
ZK-04	KG - Verteilerabgang FM/USV, Sener	40	10
ZK-05	KG - Verteilerabgang Bühnentechnik	80	40
ZK-06	KG - Kühlregister RLT 1.0	80	40
ZK-07	KG - Kühlregister RLT 3.0	80	40
ZK-08	KG - Kühlregister RLT 4.0	80	40
ZK-09	KG - Kühlregister RLT 8.0	100	60
ZK-10	KG - Kühlregister RLT 6.0	65	25
ZK-11	5.OG - C40.533, Schacht V	20	0,6
ZK-12	4.OG - C40.440, Schacht V-1	20	0,6
ZK-13	4.OG - C40.420, Schacht V-2	20	0,6
ZK-14	3.OG - C40.338, Schacht V-1	20	0,6
ZK-15	3.OG - C40.320, Schacht V-2	20	0,6
ZK-16	2.OG - C40.235 & C40.232, Schacht V	20	0,6
ZK-17	6.OG - C40.613, Schacht Aufzug 1	20	0,6
ZK-18	5.OG - C40.511, Schacht Aufzug 1-1	20	0,6
ZK-19	5.OG - C40.512, Schacht Aufzug 1-2	20	0,6
ZK-20	4.OG - C40.416, Schacht Aufzug 1	20	0,6
ZK-21	3.OG - C40.316, Schacht Aufzug 1	20	0,6
ZK-22	2.OG - C40.206, Schacht Aufzug 1	20	0,6
ZK-23	3.OG - C40.354 & C40.355, Schacht I	20	0,6



**Legende**

- ... (various symbols and line types)

**Vertikale - Kälteanlage**

Nr.	Einbauort	DN	Qn m³/h
ZK-01	KG - Wärmeübergabestation	200	250
ZK-02	KG - Verteilerabgang Kühldecken Umluftkühler	100	60
ZK-03	KG - Verteilerabgang RLT - Zentralen	200	250
ZK-04	KG - Verteilerabgang FM/USV, Sener	40	10
ZK-05	KG - Verteilerabgang Bühnentechnik	80	40
ZK-06	KG - Kühlregister RLT 1.0	80	40
ZK-07	KG - Kühlregister RLT 3.0	80	40
ZK-08	KG - Kühlregister RLT 4.0	80	40
ZK-09	KG - Kühlregister RLT 8.0	100	60
ZK-10	KG - Kühlregister RLT 6.0	65	25
ZK-11	5.OG - C40.533, Schacht V	20	0,6
ZK-12	4.OG - C40.440, Schacht V-1	20	0,6
ZK-13	4.OG - C40.420, Schacht V-2	20	0,6
ZK-14	3.OG - C40.338, Schacht V-1	20	0,6
ZK-15	3.OG - C40.320, Schacht V-2	20	0,6
ZK-16	2.OG - C40.235 & C40.232, Schacht V	20	0,6
ZK-17	6.OG - C40.613, Schacht Aufzug 1	20	0,6
ZK-18	5.OG - C40.511, Schacht Aufzug 1-1	20	0,6
ZK-19	5.OG - C40.512, Schacht Aufzug 1-2	20	0,6
ZK-20	4.OG - C40.416, Schacht Aufzug 1	20	0,6
ZK-21	3.OG - C40.316, Schacht Aufzug 1	20	0,6
ZK-22	2.OG - C40.206, Schacht Aufzug 1	20	0,6
ZK-23	3.OG - C40.354 & C40.355, Schacht I	20	0,6

**f) Einzelanlagenbetrachtung Strom**

Grundsätzlich wurden in den Schemata der HLS/ELT die Energiezähler dargestellt.

Es erfolgt die Dokumentation der derzeitigen Stände und Umfänge im weiteren Verlauf.

Separate Gewerke-Zählerschemata sollen erstellt werden.

Grundsätzlich sind je Zähler folgende Parameter über die GA an die GLT und den Datenexport zu übergeben:

**3.2.13. Datenpunktliste Stromzähler**

#	Datenpunkte Stromzähler	Einheit
1.	Stromverbrauch	kWh, kumulierend, 15-Minuten-Auflösung
2.	Strom-Leistungsaufnahme	kW, 15-Minuten-Auflösung

**g) Einzelanlagenbetrachtung Komfort (Modellräume mit Präsenzmelder)**

Folgende Räume werden nach diesem Muster ausgestattet:

- 
- C40.328, C40.329, C40.330, C40.338, C40.308, C40.309 und C40.310**

Nr.	Thema	Inhalte und Darstellung	Zielwert
3.2.14.	Raum-Heizung statisch, Heizkörper	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Wärme-Verbrauch [kWh]</li> <li>2. Wärme-Leistungsaufnahme [kW]</li> <li>3. Vorlauf-Temperatur [°C]</li> <li>4. Rücklauf-Temperatur [°C]</li> </ol>	
3.2.15.	Raum-Strom Strom-Verbrauch	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Strom-Verbrauch [kWh]</li> <li>2. Strom-Leistungsaufnahme [kW]</li> </ol> <p>Es erfolgt nur eine MBUS-Zählervorsehung für den gesamten Raum!</p> <p>Eine spätere Differenzierung erfolgt autark über das Forschungsprojekt. Messung der Einzel-Stromverbraucher über Plugwise-System:</p> 	
3.2.16.	Raumtemperatur	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Raum-Temperatur [°C]</li> <li>• Raum-Sollwert errechnet [°C]</li> </ul>	
3.2.17.	Fensterkontakt	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fensterzustand AUF/ZU [0/1] (Jedes Fenster einzeln, sofern mehrere Fenster vorhanden)</li> </ul>	
3.2.18.	Sonnenschutz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schaltungszustand [0/1 oder 0-10]</li> </ul>	
3.2.19.	Blendschutz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abstimmung SIEMENS erforderlich. Ggf. über KNX??</li> </ul>	
3.2.20.	Türkontakt	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Türzustand AUF/ZU [0/1]</li> </ul>	
3.2.21.	Präsenz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Raumpräsenz [0/1]</li> </ul>	
3.2.22.	Überschreitung CO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Raum-Kohlendioxidkonzentration CO<sub>2</sub> [ppm]</li> </ul>	
3.2.23.	Verlauf VOC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Raum-VOC-Veränderungen [0-10]</li> </ul>	
3.2.24.	Regelventil	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stellbefehl Ventil [stetig oder AUF/ZU] <b>Klärung erforderlich, welche Antriebstechnik verbaut wird.</b></li> </ul>	

Mühlenpfordtstraße 23  
38106 Braunschweigtel: 0531-391 3555  
fax: 0531-391 8125info@energydesign-bs.de  
www.energydesign-bs.de

**h) Einzelanlagenbetrachtung Komfort (Modellräume ohne Präsenzmelder)**

Folgende Räume werden nach diesem Muster ausgestattet:

- C40.428, C40.429, C40.430, C40.440, C40.408, C40.409 und C40.410

Nr.	Thema	Inhalte und Darstellung	Zielwert
3.2.25.	Raum-Heizung statisch, Heizkörper	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Wärme-Verbrauch [kWh]</li> <li>2. Wärme-Leistungsaufnahme [kW]</li> <li>3. Vorlauf-Temperatur [°C]</li> <li>4. Rücklauf-Temperatur [°C]</li> </ol>	
3.2.26.	Raum-Kühlung C40.440	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Kälte-Verbrauch [kWh]</li> <li>2. Kälte-Leistungsaufnahme [kW]</li> <li>3. Vorlauf-Temperatur [°C]</li> <li>4. Rücklauf-Temperatur [°C]</li> </ol>	Kühlung nur in dem Gruppenraum C40.440  <b>Klärung des Monitoring: Direktkälte, Kaltwasser? Hybrid-Wärtemengenzähler für Heiz- und Kühlbetrieb?!</b>
3.2.27.	Raum-Strom Strom-Verbrauch	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Strom-Verbrauch [kWh]</li> <li>2. Strom-Leistungsaufnahme [kW]</li> </ol> <p>Es erfolgt nur eine MBUS-Zählervorsehung für den gesamten Raum!</p> <p>Eine spätere Differenzierung erfolgt autark über das Forschungsprojekt. Messung der Einzel-Stromverbraucher über Plugwise-System:</p> 	
3.2.28.	Raumtemperatur	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Raum-Temperatur [°C]</li> <li>• Raum-Sollwert errechnet [°C]</li> </ul>	
3.2.29.	Fensterkontakt	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fensterzustand AUF/ZU [0/1] (Jedes Fenster einzeln, sofern mehrere Fenster vorhanden)</li> </ul>	
3.2.30.	Sonnenschutz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schaltungszustand [0/1 oder 0-10]</li> </ul>	
3.2.31.	Blendschutz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abstimmung SIEMENS erforderlich. Ggf. über KNX??</li> </ul>	
3.2.32.	Türkontakt	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Türzustand AUF/ZU [0/1]</li> </ul>	
3.2.33.	Überschreitung CO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Raum-Kohlendioxidkonzentration CO<sub>2</sub> [ppm]</li> </ul>	
3.2.34.	Verlauf VOC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Raum-VOC-Veränderungen [0-10]</li> </ul>	
3.2.35.	Regelventil	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stellbefehl Ventil [stetig oder AUF/ZU]</li> </ul> <b>Klärung erforderlich, welche Antriebstechnik verbaut wird.</b>	

Mühlenpfordtstraße 23  
38106 Braunschweigtel: 0531-391 3555  
fax: 0531-391 8125info@energydesign-bs.de  
www.energydesign-bs.de

**i) Einzelanlagenbetrachtung Komfort (Open-Space-Räume)**

Die Räume im 5. und 6. OG werden nach diesem Muster ausgestattet:

Nr.	Thema	Inhalte und Darstellung	Zielwert
3.2.36.	Raum-Heizung statisch, Heizkörper	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Wärme-Verbrauch [kWh]</li> <li>2. Wärme-Leistungsaufnahme [kW]</li> <li>3. Vorlauf-Temperatur [°C]</li> <li>4. Rücklauf-Temperatur [°C]</li> </ol>	Einzelmessung der Open-Space-Räume im 5. OG und 6. OG se- parat → Somit 2 Zähler
3.2.37.	Raum-Strom Strom-Verbrauch	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Strom-Verbrauch [kWh]</li> <li>2. Strom-Leistungsaufnahme [kW]</li> </ol>	Einzelmessung der Open-Space-Räume im 5. OG und 6. OG se- parat → Somit 2 Zähler
3.2.38.	Raumtemperatur	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Raum-Temperatur [°C]</li> <li>• Raum-Sollwert errechnet [°C]</li> </ul>	
3.2.39.	Fensterkontakt	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fensterzustand AUF/ZU [0/1] (Jedes Fenster einzeln, sofern mehrere Fenster vorhanden)</li> </ul>	
3.2.40.	Überschreitung CO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Raum-Kohlendioxidkonzentration CO<sub>2</sub> [ppm]</li> </ul>	
3.2.41.	Regelventil	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stellbefehl Ventil [stetig oder AUF/ZU] <b>Klärung erforderlich, welche Antriebstechnik verbaut wird.</b></li> </ul>	

Mühlenpfordtstraße 23  
38106 Braunschweigtel: 0531-391 3555  
fax: 0531-391 8125info@energydesign-bs.de  
www.energydesign-bs.de

**j) Zählerschemata**

Nachfolgend sind die Energiezähler dargestellt, welche zur Validierung der Zielwerte notwendig sind. Die Sensor- und Aktordaten sind den vor genannten Tabellen zu entnehmen.

Ingenieurgesellschaft  
für energieeffiziente Gebäude mbH  
Konzepte – Planung – Betrieb

Abbildung 1 Schema Wärmemessung [kWh] (Gebäudeenergiebilanz)

Mühlenpfordtstraße 23  
38106 Braunschweig

tel: 0531-391 3555  
fax: 0531-391 8125

info@energydesign-bs.de  
www.energydesign-bs.de

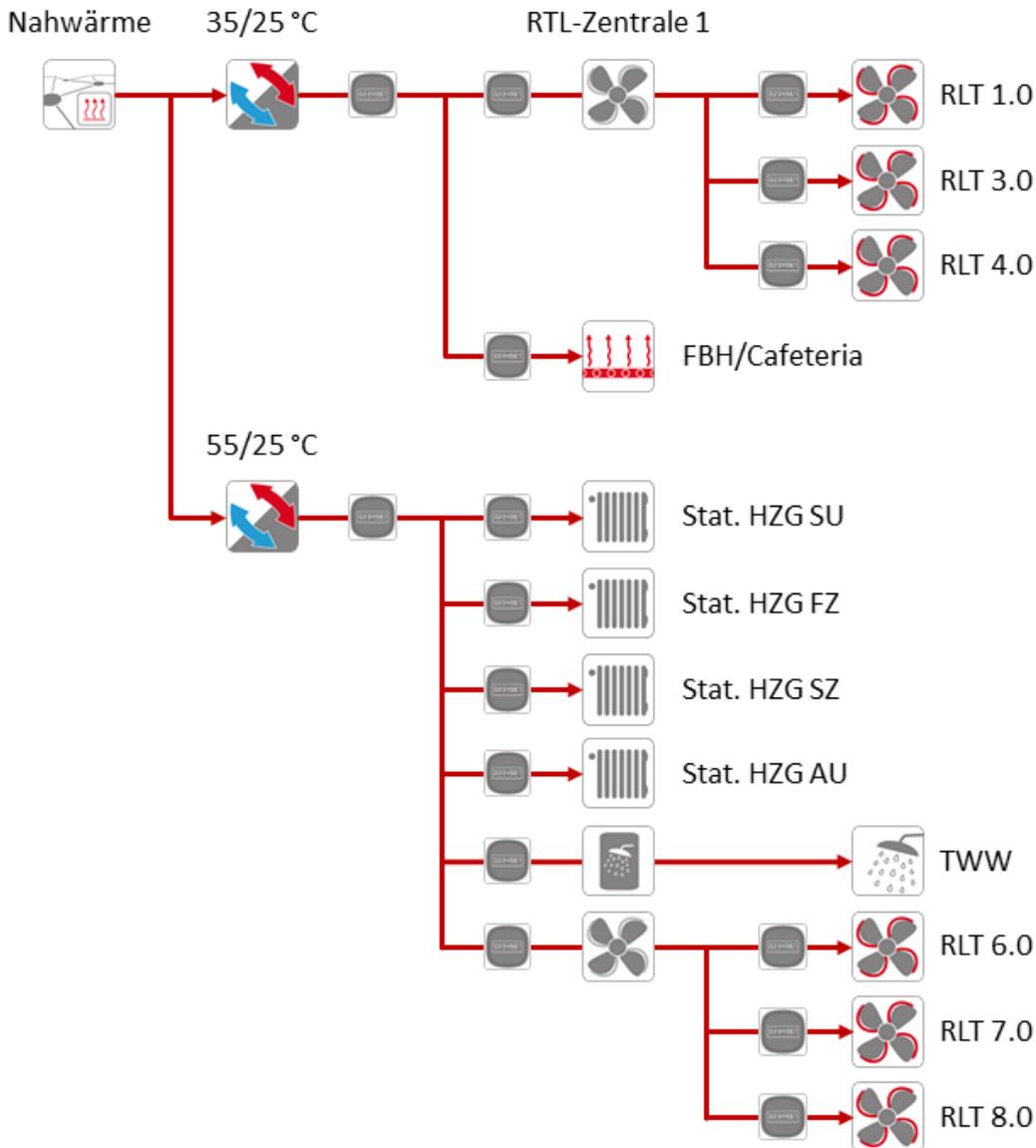
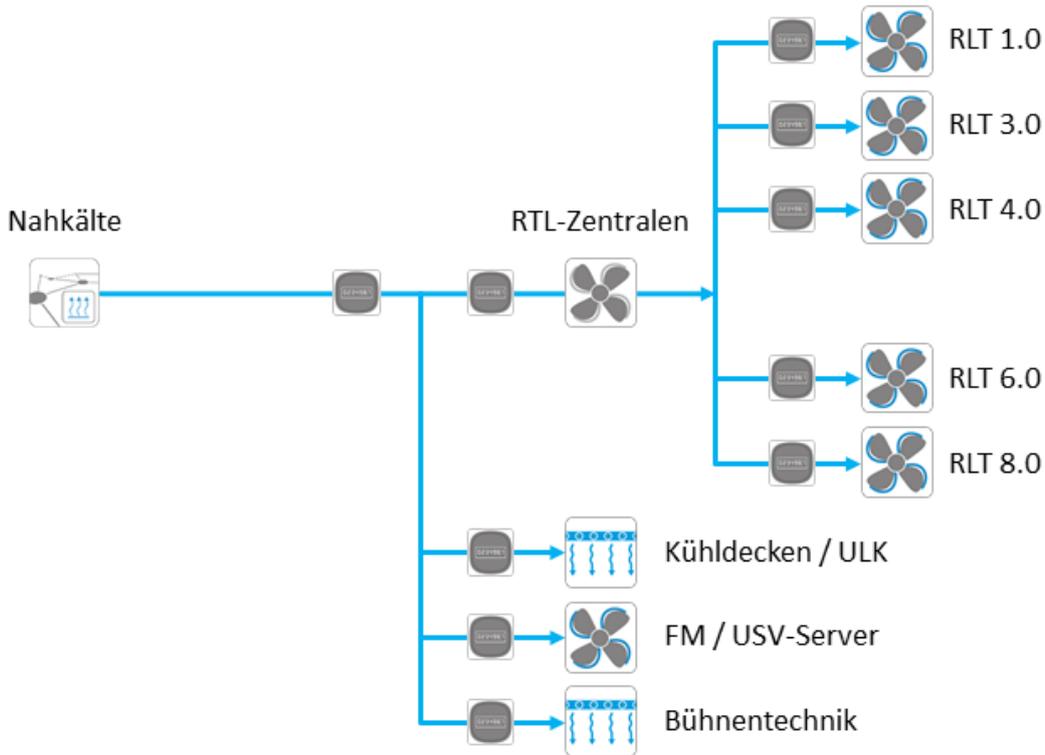


Abbildung 2 Schema Kältemessung [kWh] (Gebäudeenergiebilanz)

Ingenieurgesellschaft  
für energieeffiziente Gebäude mbH  
Konzepte – Planung – Betrieb



Mühlenpfordtstraße 23  
38106 Braunschweig

tel: 0531-391 3555  
fax: 0531-391 8125

info@energydesign-bs.de  
www.energydesign-bs.de

Abbildung 3 Schema Strommessung [kWh] (Gebäudeenergiebilanz)

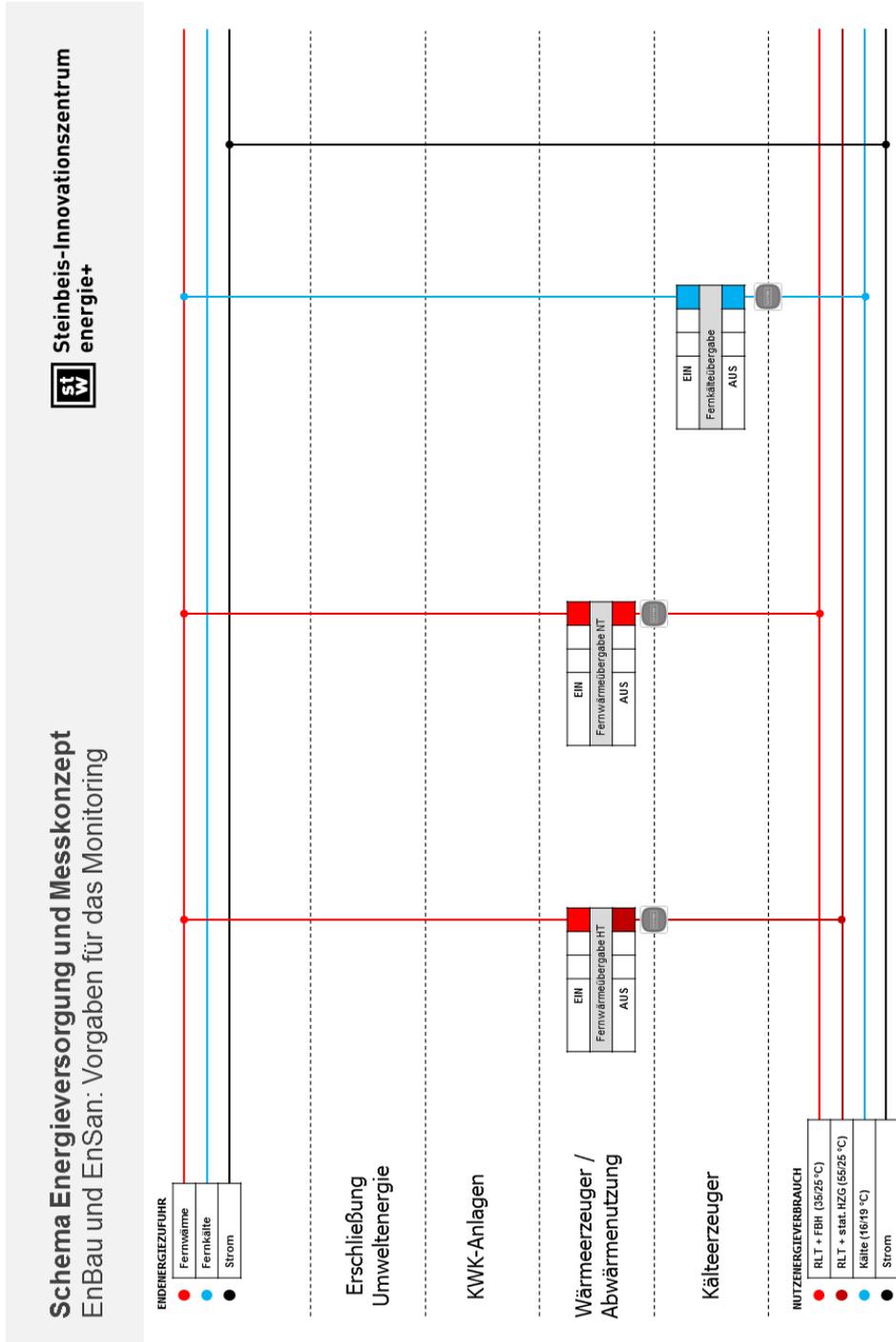
Ergänzungen erfolgen nach Fertigstellung der abgestimmten AP.



k) Energieversorgung und Messkonzept nach EnOB-Leitfaden

Ingenieurgesellschaft  
für energieeffiziente Gebäude mbH  
Konzepte – Planung – Betrieb

Abbildung 5 Gesamtschema Energieversorgung und Messkonzept EnOB [kWh]



1

Mühlenpfordtstraße 23  
38106 Braunschweig

tel: 0531-391 3555  
fax: 0531-391 8125

info@energydesign-bs.de  
www.energydesign-bs.de

Erstellung: Maik Wussler, B. Eng. (SIZe+)

14.02.2017

Thermische Gebäude- und Anlagensimulation

**LEUPHANA Universität Lüneburg**

**Neubau Zentralgebäude**

**Bericht zur Auswertung einzelner Raumtemperaturen**

**Stand 10.11.2015**

**Energie- und Prozesstechnik Aachen GmbH**

Jülicher Straße 338, 52070 Aachen

Tel.: 0241 / 15 90 9-0, Fax: 0241 / 15 90 9-29

[www.epa-aachen.de](http://www.epa-aachen.de)

Dr.-Ing. H.J. Röttger

Dipl.-Ing. (FH) T. Schild, M.B.A.

[hjr@epa-aachen.de](mailto:hjr@epa-aachen.de)

[ts@epa-aachen.de](mailto:ts@epa-aachen.de)

# 1. Inhaltsverzeichnis

1.	Inhaltsverzeichnis.....	II
2.	Abbildungsverzeichnis.....	III
3.	Tabellenverzeichnis.....	IV
1.	Aufgabenstellung .....	1
2.	Thermischer Komfort.....	1
3.	Rahmenbedingungen.....	2
3.1.	Lage des Gebäudes.....	2
3.2.	Wetterdaten .....	2
3.3.	Bauphysik.....	3
3.4.	Nutzungsarten .....	4
4.	Untersuchte Räume .....	5
4.1.	Modellräume .....	6
4.2.	Besprechungsraum .....	7
4.3.	Seminarraum .....	8
5.	Ergebnisse .....	9
5.1.	Modellräume .....	10
5.2.	Innenliegender Besprechungsraum .....	12
5.3.	Seminarraum .....	14
6.	Fazit.....	14

## 2. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verlauf Außenwerte für Lüneburg.....	2
Abbildung 2: Orientierung des Gebäudes .....	5
Abbildung 3: Grundriss Modellräume 40.408-40.410.....	6
Abbildung 4: Grundriss, innenliegender Besprechungsraum 40.440.....	7
Abbildung 5: Grundriss Seminarraum .....	8
Abbildung 6: Detail Nacht- und Wochenendabsenkung.....	9
Abbildung 7: Raumtemperaturkurve 40.408.....	10
Abbildung 8: Raumtemperaturkurve 40.409.....	11
Abbildung 9: Raumtemperaturkurve 40.410.....	11
Abbildung 10: Raumtemperaturvergleich der Räume 40.408 und 40.410.....	12
Abbildung 11: Detail Nacht- und Wochenendabsenkung Raum 40.440 .....	13
Abbildung 12: Raumtemperaturkurve 40.440.....	13
Abbildung 13: Raumtemperaturkurve 40.704.....	14

### 3. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bauteilliste und U-Werte .....	3
Tabelle 2: Nutzungsarten und -parameter .....	4
Tabelle 3: Raumdetails.....	5

## **1. Aufgabenstellung**

Die Liegenschaft der LEUPHANA Universität Lüneburg wird um einen Neubau erweitert, welcher in das bestehende Energieversorgungssystem eingebunden werden soll. Um den Leistungs- und Energiebedarf des Gebäudes und damit die Auswirkungen auf die Energieversorgung der Liegenschaft abschätzen zu können, soll eine thermische Gebäude- und Anlagensimulation erstellt werden. Die Ergebnisse dienen zudem der Plausibilisierung der Planung und Absicherung der Investitionen in effiziente Energietechnik.

Dieser Bericht ergänzt den Ergebnisbericht der Simulation vom 01.07.2015 um eine Auswertung einzelner Raumtemperaturkurven. Gemäß Schreiben vom 18.08.2015 soll die thermische Behaglichkeit folgender Räume auf Basis der Simulationsergebnisse diskutiert werden:

- Modellräume, Forschungszentrum 4.OG, Räume 40.408 - 40.410
- innenliegender Besprechungsraum, Forschungszentrum 4.OG, Räume 40.440
- Seminarraum, Forschungszentrum 7.OG, Räume 40.704

## **2. Thermischer Komfort**

Die Wahrnehmung und Bewertung des Raumklimas ist von verschiedenen Größen abhängig. Neben der Raumlufttemperatur beeinflussen auch die Luftfeuchtigkeit, die Oberflächentemperatur der umgebenden Bauteile, die Luftfeuchtigkeit und die lokale Strömungsgeschwindigkeit die sogenannte thermische Behaglichkeit. Diese Größen werden in Abhängigkeit des Bekleidungs- und Aktivitätsgrades unterschiedlich bewertet. Auch die Dynamik dieser Größen (Änderungsgeschwindigkeiten) können die subjektive Wahrnehmung zusätzlich beeinflussen.

In diesem Bericht wird als Referenzgröße für die thermische Behaglichkeit die Raumlufttemperatur herangezogen. Diese Größe ist eine Ergebnisvariable der Simulation. Die Begrenzung auf die Raumlufttemperatur kann für die Abschätzung der thermischen Behaglichkeit als hinreichend genau erachtet werden. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund der für ein Universitätsgebäude üblichen Kleidungs- und Bewegungsstrukturen innerhalb der betrachteten Räume.

### 3. Rahmenbedingungen

#### 3.1. Lage des Gebäudes

geographische Breite = 50.1194°

geographische Länge = -8.6622°

Höhenlage = 110 m

Zeitzone = MEZ

Azimut = 135°

#### 3.2. Wetterdaten

Als Wetterdatensatz wird das nach Abbildung 1 für die Region Lüneburg geltende Testreferenzjahr angewendet. Dieses entspricht dem Testreferenzjahr von Hamburg für den Zeitraum 01.01.2010 bis 31.12.2010.

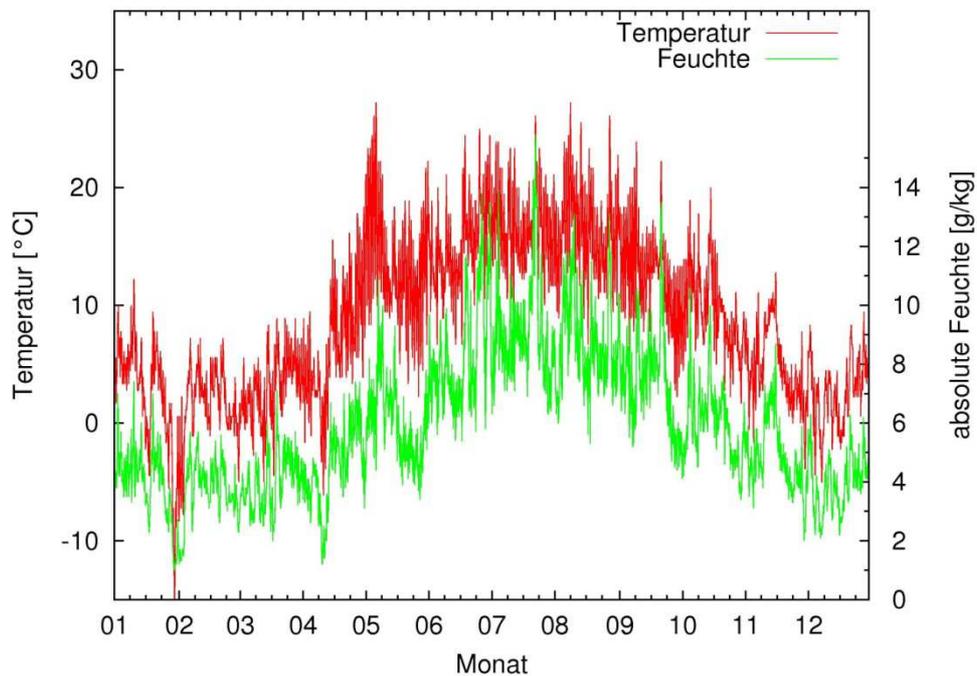


Abbildung 1: Verlauf Außenwerte für Lüneburg

### 3.3. Bauphysik

Tabelle 1 zeigt die im Modell verwendete Bauteilliste nebst den zugehörigen U-Werten.

*Tabelle 1: Bauteilliste und U-Werte*

<b>Bauteil</b>	<b>Bauteil-Kürzel</b>	<b>U-Wert (W/m<sup>2</sup>K)</b>
Bodenplatte gegen Erdreich	UG-BP	0,284
Deckenaufbau UG bis Mitte Beton	UG-DE	2,014
Außenwand UG gegen Erdreich	UG-AWE	0,19
Außenwand UG gegen Außenluft	UG-AW	0,19
Innenwand UG Kalksandstein	UG-IW	2,938
Boden EG zu UG bis Mitte Beton	EG-BO	1,94
Deckenaufbau EG bis Mitte Beton - mit Abhangdecke	EG-DA	2,116
Deckenaufbau EG bis Mitte Beton - Betonuntersicht	EG-DB	5,975
Boden OG zu OG bis Mitte Beton	OG-BO	1,871
Deckenaufbau OG bis Mitte Beton - mit Abhangdecke	OG-DA	1,888
Deckenaufbau OG bis Mitte Beton - Betonuntersicht	OG-DB	4,454
Außenwand Fassade Typ 1	F1	0,108
30er Innenwand	IW30	1,519
24er Innenwand	IW24	1,802
115er Innenwand	IW11	2,946
Dach (Gründach)	DACH	0,468

### 3.4. Nutzungsarten

Die Nutzungsarten beinhalten alle Daten, die zur Beschreibung der Nutzung und den daraus resultierenden Anforderungen erforderlich sind. Zu jeder Nutzungsart werden Betriebszeiten, Raumklimaanforderungen, Raumbelegungen und Lastdichten (nutzungsabhängig) definiert, mit denen der Energiebedarf ermittelt wird. Tabelle 2 zeigt die verwendeten Nutzungsarten und die zugehörigen Parameter für die Simulation.

Die Wärmeabgabe einer Person wird standardmäßig mit folgenden Werten berücksichtigt:

sensibler Wärmeabgabe = 80 W/Person

latente Wärmeabgabe = 20 W/Person

Tabelle 2: Nutzungsarten und -parameter

Nr.	Hauptnutzungsart	Auslegungstemperatur °C Heizen(Kühlen)	Personen (absolut)	Personen m <sup>2</sup> /Person	Leistung Geräte W/m <sup>2</sup>	Leistung Beleuchtung W/m <sup>2</sup>
1	Büros	21		13	5	5
2A	Hörsaal/Auditorium 50 %	20		1,5	11	10
2B	Hörsaal/Auditorium 100 %	20		0,75	21	10
3	Bibliothek	21		10	5	30
4	Konferenz/Seminar	21		2	5	11
6	Labor	20	4		10	10
7	Lager und Nebenflächen	15		100	0	5
8	Flur und Verkehrsfläche	15		100	0	4
9	Mensa / Cafeteria / Gastronomie	20	250		50	20
10	Sanitär	24		100	0	0
11	Technik und sonstige Flächen	15		100	0	0
12	EDV	15(**30)		100	0	0
13	Ausstellungsfläche	20		3	0	0
14	Kombizonen (vgl. Flur mit Sitzecken)	20		26	2	5
15	Einzel-Arbeitsraum (EAR)	20	1		4	10
16	Doppel-Arbeitsraum (DAR)	20	2		4	10
17	Gruppen-Arbeitsraum (GAR)	20		13	4	10
18	Technik mit Kühlung	5(**30)		0	25	0
19	Kopierraum (in Fluren)	15		100	*0,15 kW	4
20	Dimmer-Raum	5(**30)		0	*5,0 kW	0
21	Regieraum	21		8	*1,0 kW	5
22	Maschinenhalle	15(**30)		50	*2,0 kW	10
23	Küche	20	25		10	20

\*gemäß Nutzervorgabe als absolute Werte in kW (Volllast); \*\*im Kühlfall

## 4. Untersuchte Räume

Die in diesem Bericht untersuchten Räume befinden sich im Gebäudeteil Forschungszentrum. Alle außenliegenden Räume befinden sich in dem in Abbildung 2 farblich hinterlegten Abschnitt. Tabelle 3 zeigt einige Eckdaten zu den einzelnen Räumen.

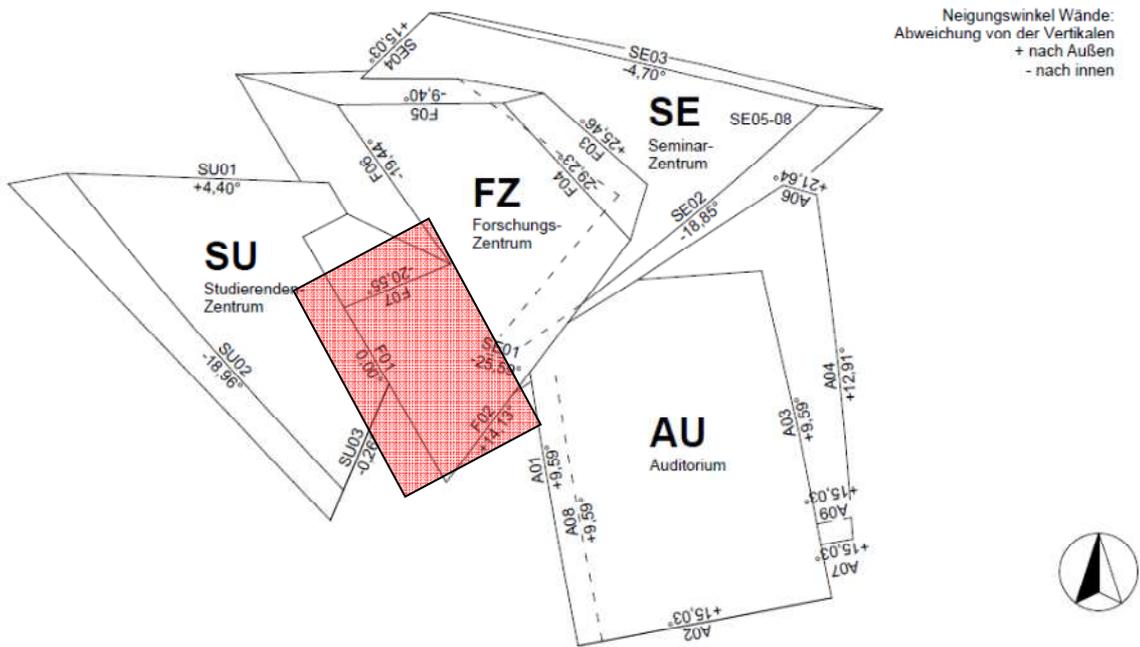


Abbildung 2: Orientierung des Gebäudes

Tabelle 3: Raumdetails

Raum	Nutzungsart	Fläche (HNF)	Geschoss	Lage
40.408	Doppelarbeitsraum	19,8 m <sup>2</sup>	4.OG	außenliegend
40.409	Einzelarbeitsraum	12,4 m <sup>2</sup>	4.OG	außenliegend
40.410	Einzelarbeitsraum	12,0 m <sup>2</sup>	4.OG	außenliegend
40.440	Gruppenarbeitsraum	29,7 m <sup>2</sup>	4.OG	innnliegend
40.704	Seminarraum	138,8 m <sup>2</sup>	7.OG	außenliegend

## 4.1. Modellräume

Diese Raumgruppe befindet sich im 4.OG des Forschungszentrums. Abbildung 3 zeigt einen Ausschnitt aus dem Grundriss des Geschosses (nicht eingenordet). Der Raum 40.408 hat zwei Wände mit Fensterband, eine in Süd-Ost-Ausrichtung, die andere in Süd-West-Ausrichtung. Die gleiche Ausrichtung haben die Außenwände der Räume 40.409 und 40.410.

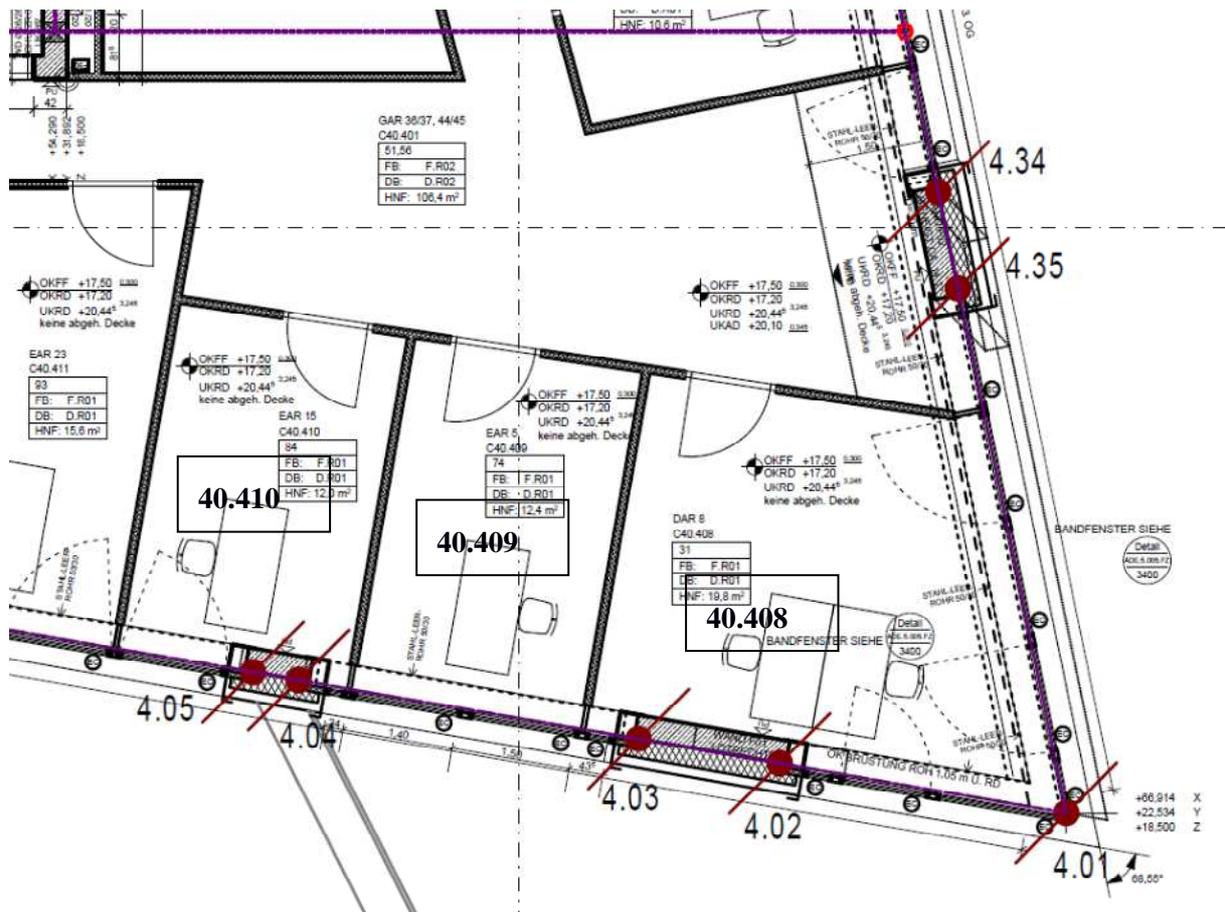


Abbildung 3: Grundriss Modellräume 40.408-40.410

## 4.2. Besprechungsraum

Dieser Raum befindet sich ebenfalls im 4.OG des Forschungszentrums. Es handelt sich um einen innenliegenden Besprechungsraum, der umfassend an Verkehrsflächen und mit einer Wand an das massiv konstruierte Treppenhaus grenzt.

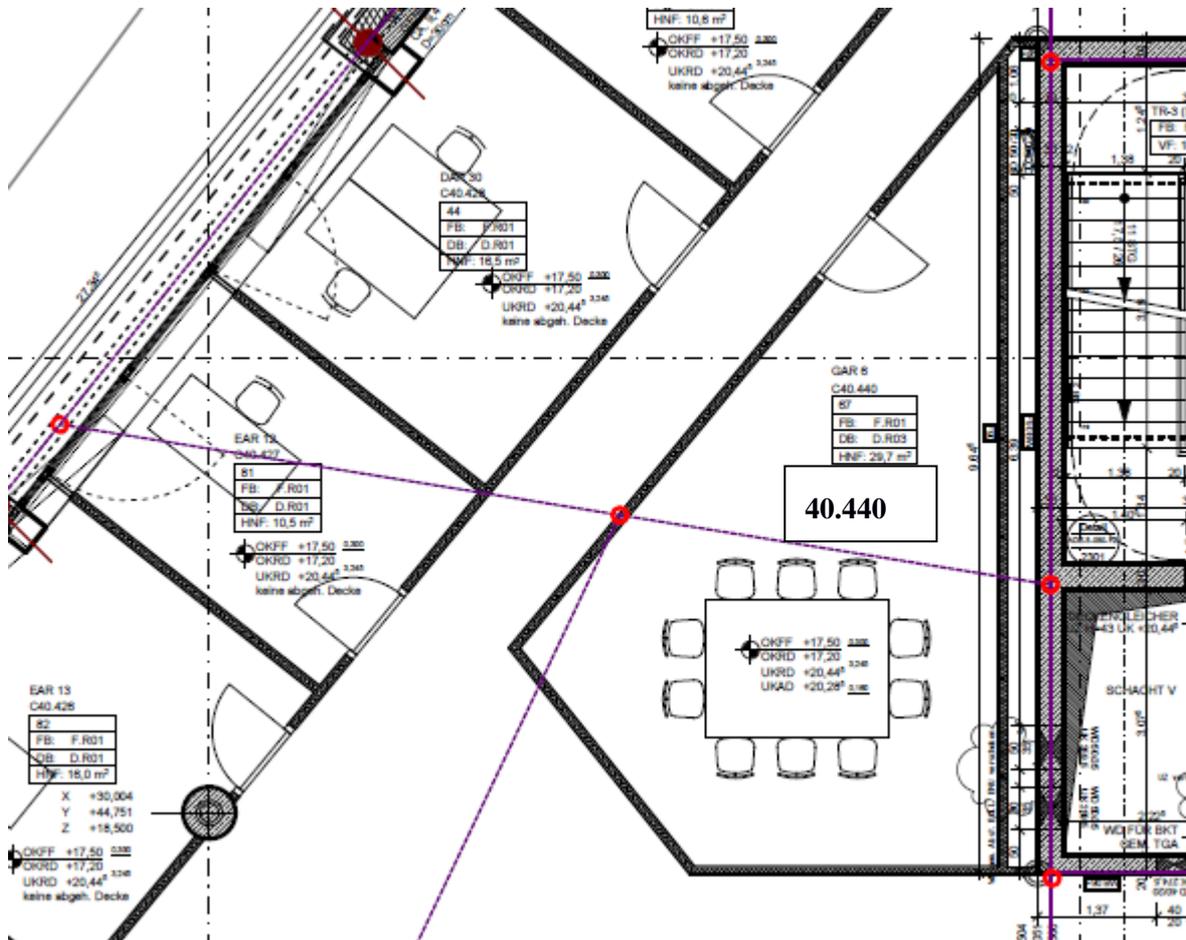


Abbildung 4: Grundriss, innenliegender Besprechungsraum 40.440

### 4.3. Seminarraum

Dieser Raum befindet sich im 7.OG des Forschungszentrums. Es handelt sich um einen Seminarraum, der gemäß Planung für ca. 72 Personen bestuhlt sein wird. Der Raum verfügt über eine Außenwand mit langem Fensterband in Süd-Ost-Ausrichtung, sowie einer Außenwand mit langem Fensterband in Süd-West-Ausrichtung.

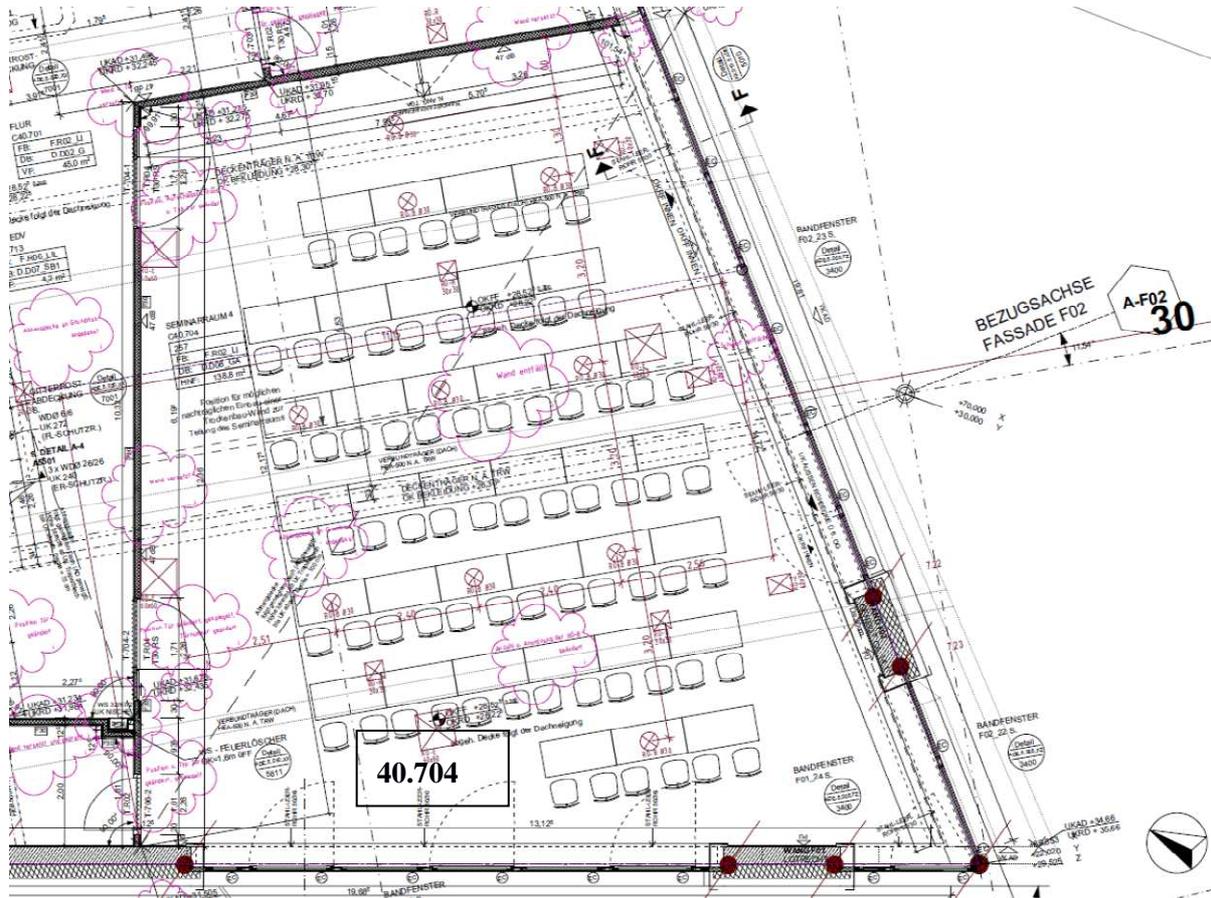


Abbildung 5: Grundriss Seminarraum

## 5. Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Form der Raumtemperaturkurve gegeben. Diese zeigen die Entwicklung der Raumtemperatur (rote Kurve) sowie die korrespondierende Außentemperaturkurve ( $T_{\text{ambient}}$ ) für das zu Grunde gelegte Testreferenzjahr (graue Kurve).

In allen Diagrammen (Abbildung 7 bis Abbildung 13) sind die vorgesehenen regelungstechnische Optimierung der Nacht- und der Wochenendabsenkung zu erkennen, wie der Auszug (Anfang Januar) der Kurve für Raum 40.408 in Abbildung 6 zeigt. Diese Kurve beginnt mit einem Wochenende, zu dem niedrigere Raumtemperaturen zur Reduzierung des Heizbedarfs zugelassen werden. Zu den Betriebsstunden hin wird die Raumtemperatur auf die notwendige Temperatur angehoben und zur Nacht wiederum gesenkt. Somit sinkt die mittlere treibende Temperaturdifferenz und somit der Heizwärmeverlust durch Transmission.

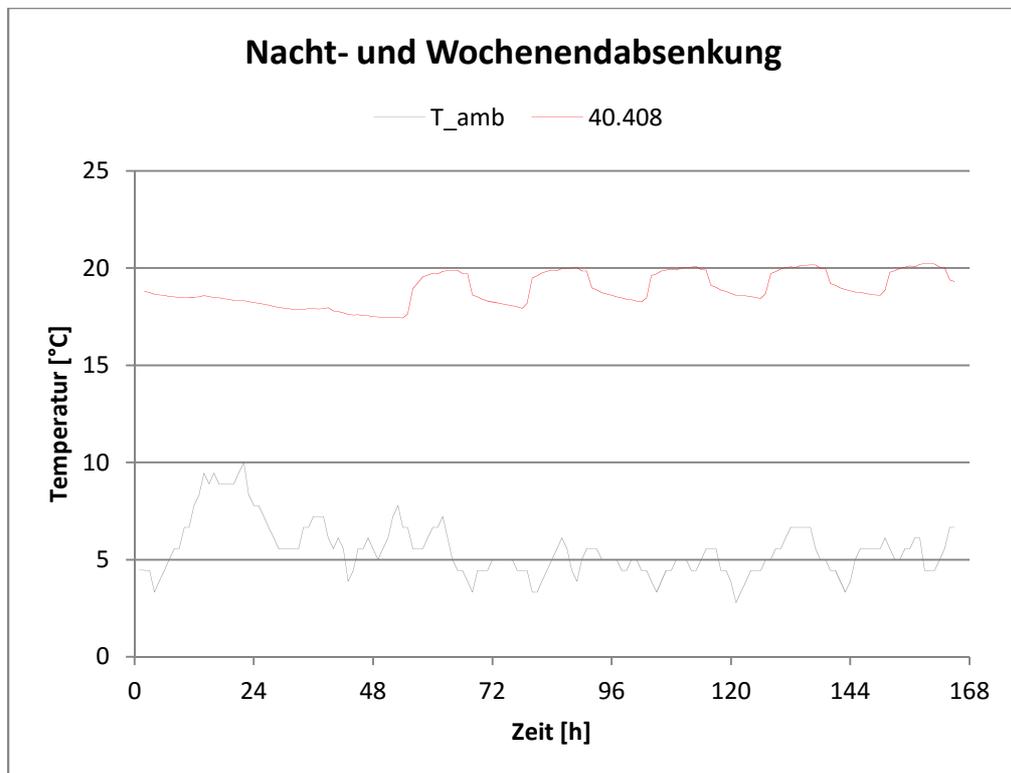


Abbildung 6: Detail Nacht- und Wochenendabsenkung

Bei der nachfolgenden Diskussion sei zu bedenken gegeben, dass die Simulation auf den im Hauptbericht aufgeführten Bedingungen basiert sowie auf Wetterbedingungen eines Testreferenzjahres, welches keine Extrembedingungen enthält. Eine abweichende Realisierung der Heiz- und Kühleinrichtungen, sowie der Bauphysik und der Sonnenschutzsteuerung können die Raumtemperaturen beeinflussen.

## 5.1. Modellräume

Die Raumtemperaturkurven der Modellräume zeigen einen erwartungsgemäß sehr ähnlichen Verlauf. Sie zeigen behagliche Raumtemperaturen im Bereich von 20 °C im Winter bis hin zu 26 °C im Sommer. Lediglich die Raumtemperaturkurve des Eckraumes 40.408 (Abbildung 7) zeigt eine etwas stärkere Volatilität als die der beiden anderen Räume (Abbildung 8 und Abbildung 9), mit geringfügig höheren Temperaturen von bis zu 1 K (ersichtlich bei Auswertung der zugehörigen Wertereihen). Dies resultiert aus der höheren Personenbelegung des Doppelarbeitsraumes und der nach Süd-Ost orientierten Fassade des Raumes 40.408.

Abbildung 10 zeigt den Verlauf der Temperaturdifferenz dieser beiden Räume. Es ist zu erkennen, dass die Temperaturen durch diesen zusätzlichen Fassadenteil in der kalten Jahreszeit höher liegen als in dem anderen Raum. Der Grund hierfür ist neben der Personenbelegung auch die Insolation, die im Eck-Raum aufgrund der morgens tiefer stehenden Sonne höher ausfällt als dies bei den anderen beiden Räumen.

Der Vergleich der beiden Einzelarbeitsräume zeigt ebenfalls - wenn auch geringfügige - Unterschiede bei der Temperaturschwankung. Dies ist auf einen höheren Fensterflächenanteil im Raum 40.409 zurückzuführen. Raum 40.410 weist eine geringere Fensterfläche aufgrund eines opaken Bauteils in der Fassade auf. Auf einen grafischen Vergleich sei aufgrund der Geringfügigkeit verzichtet.

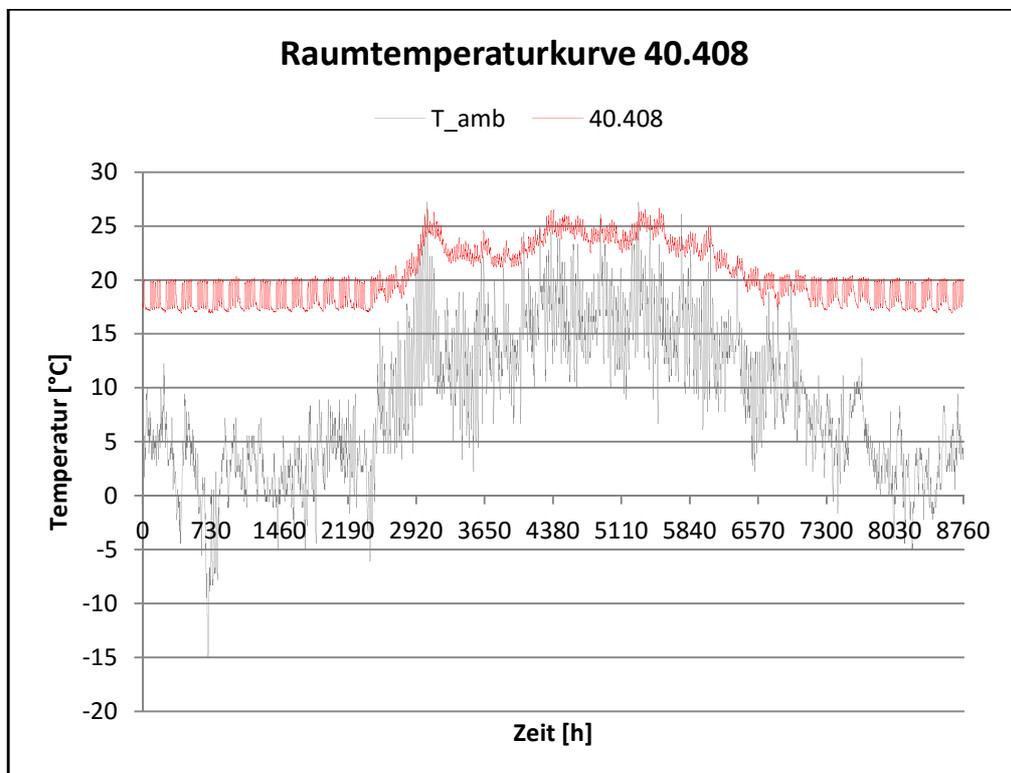


Abbildung 7: Raumtemperaturkurve 40.408

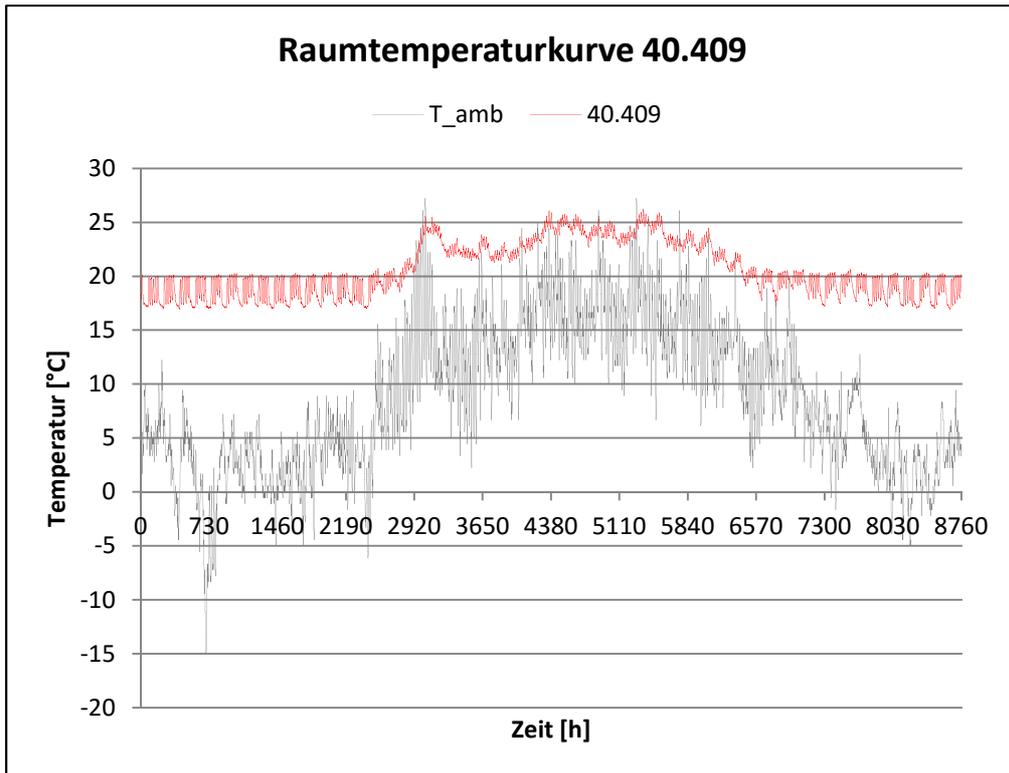


Abbildung 8: Raumtemperaturkurve 40.409

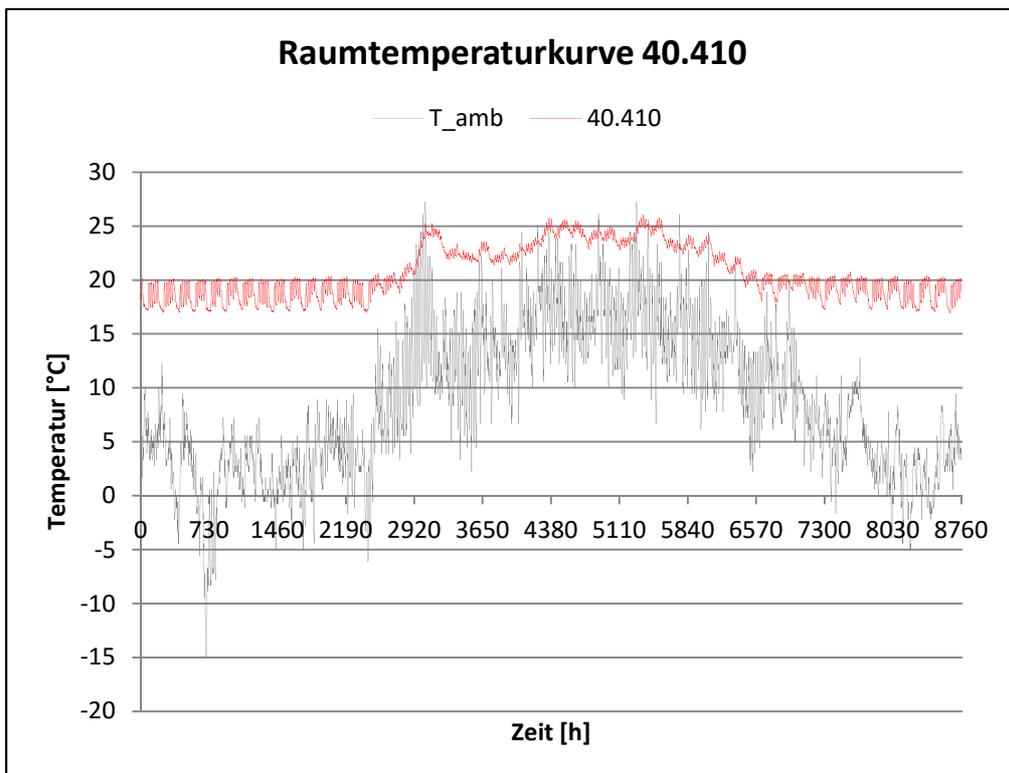


Abbildung 9: Raumtemperaturkurve 40.410

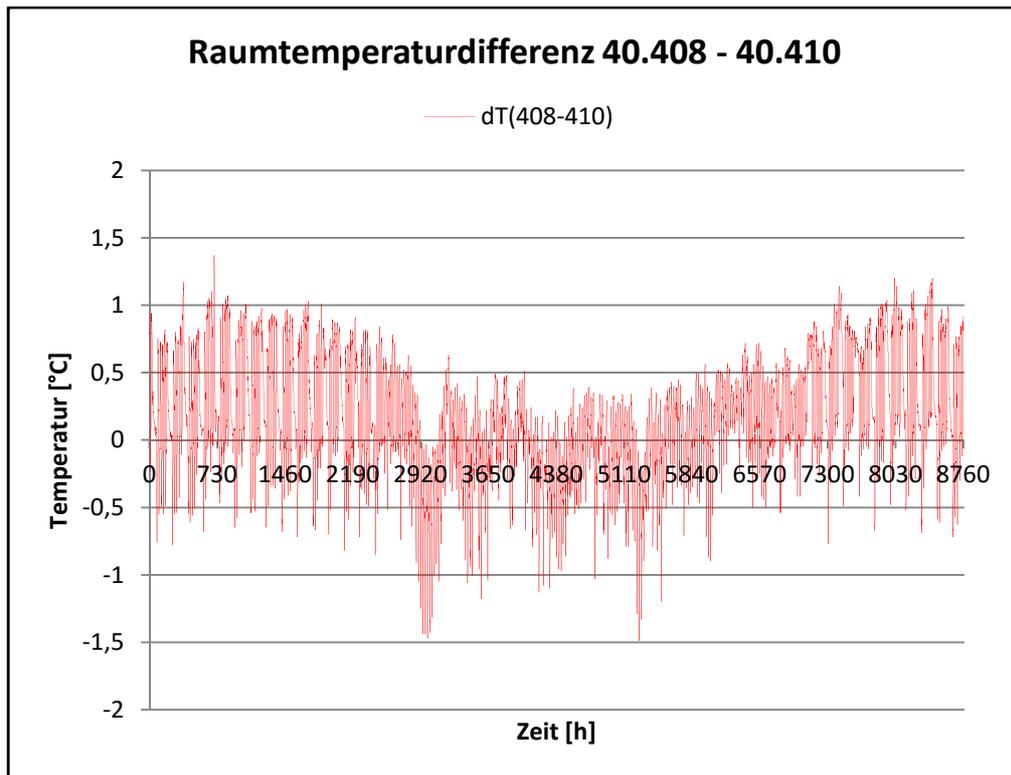


Abbildung 10: Raumtemperaturvergleich der Räume 40.408 und 40.410

## 5.2. Innenliegender Besprechungsraum

Die Raumtemperaturkurve des innenliegenden Besprechungsraumes zeigt ebenfalls die Einhaltung des Temperaturbandes zwischen 20 und 26 °C. Auch hier ist von behaglichen thermischen Bedingungen auszugehen.

Abbildung 11 zeigt einen Auszug der Kurven für eine Woche im Januar. Im Vergleich zu Abbildung 6, in der der gleiche Zeitabschnitt für die Modellräume dargestellt ist, fällt die Raumtemperatur in der Nacht langsamer und die Nachtabenkung fällt betragsmäßig geringer aus. Dies ist auf die Lage des Raumes im Inneren des Geschosses zurückzuführen, durch die der Raum nicht so stark abkühlt wie beispielsweise ein außenliegender Raum.

Die höheren inneren Lasten, die durch die deutlich höhere Belegungsdichte eines Besprechungsraumes gegenüber einem Einzel- oder Doppelarbeitsraum gegeben sind, können mithilfe der Kühldecken und der mechanischen Be- und Entlüftung kompensiert werden.

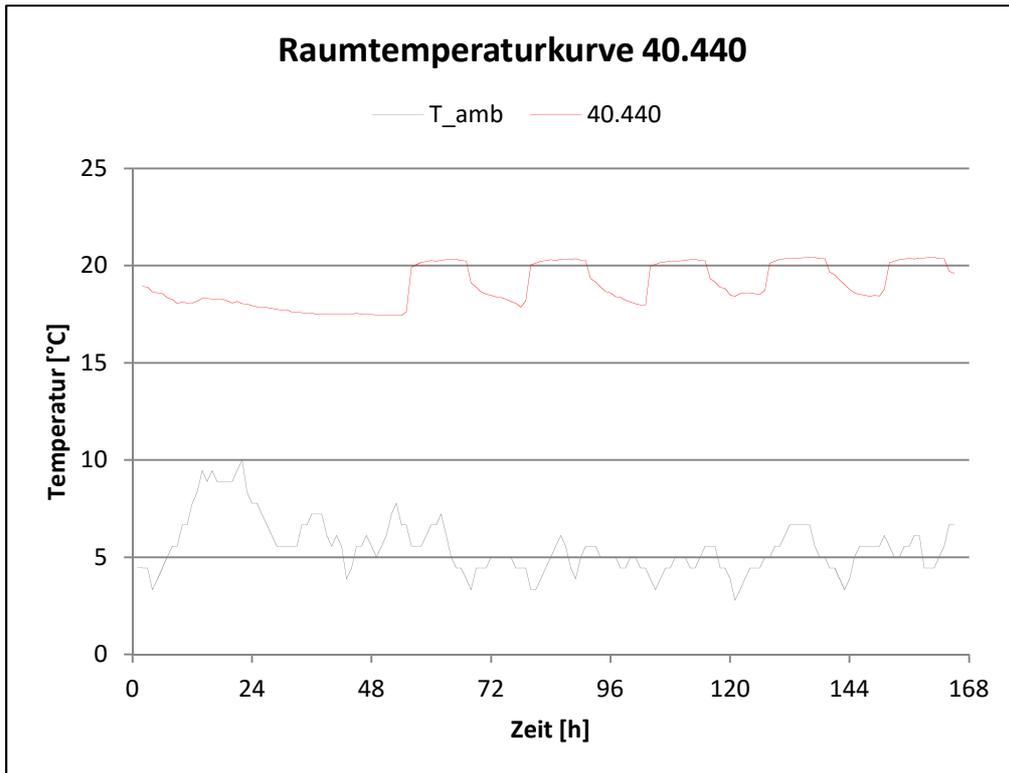


Abbildung 11: Detail Nacht- und Wochenendauslenkung Raum 40.440

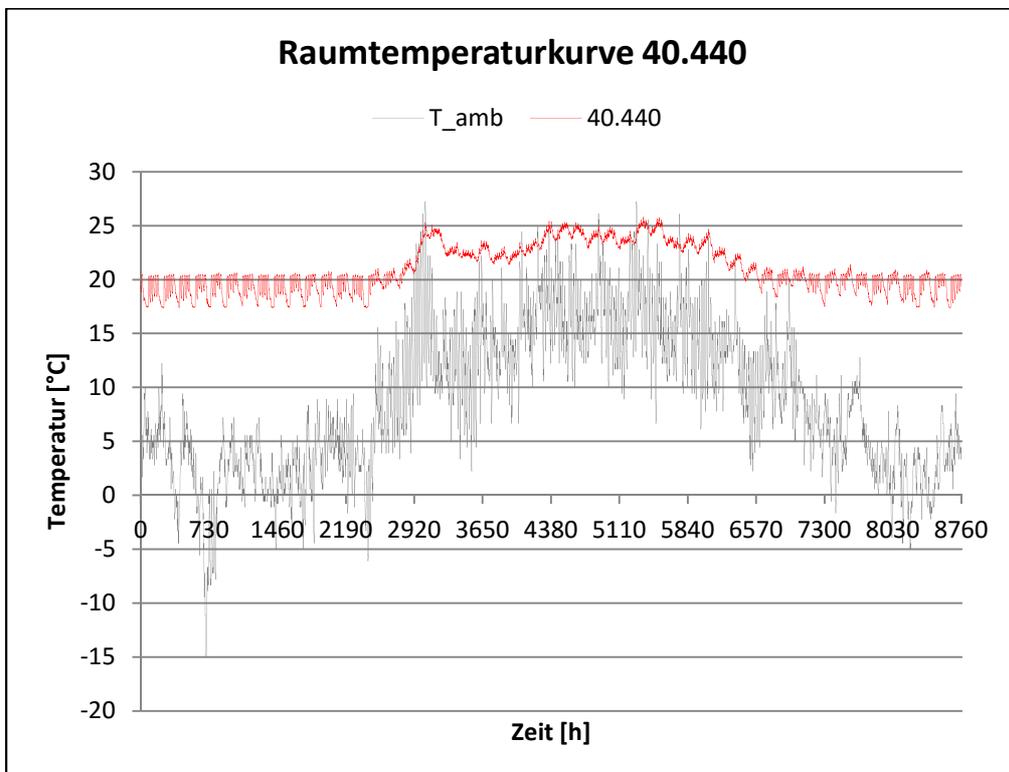


Abbildung 12: Raumtemperaturkurve 40.440

### 5.3. Seminarraum

Auch der Seminarraum zeigt eine vergleichbare Raumtemperaturkurve mit behaglichen Bedingungen zur Betriebszeit zwischen 20 und (kurzzeitig bis zu) 27 °C. Die Volatilität der Temperatur ist aufgrund der Lastschwankungen höher als bei den anderen Räumen, Kühldecke und mechanische Be- und Entlüftung verhindern jedoch auch hier ein nennenswertes Aufheizen des Raumes. Hinweise auf ein kritisches Aufheizen durch Insolation sind nicht zu erkennen.

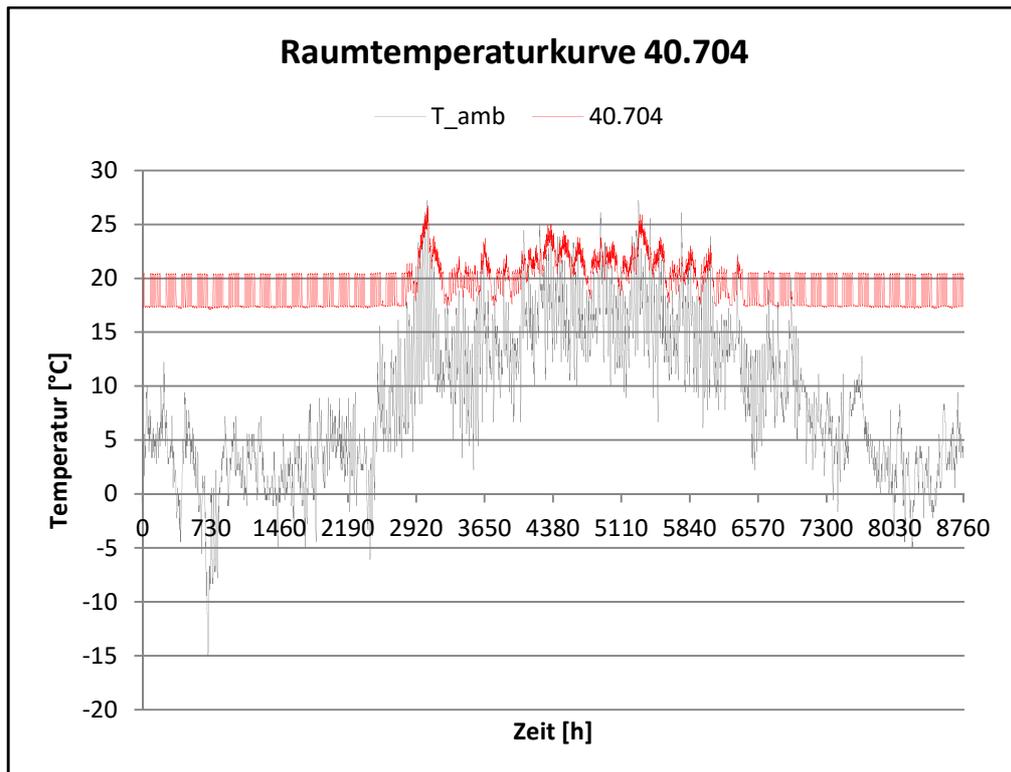


Abbildung 13: Raumtemperaturkurve 40.704

## 6. Fazit

Die thermische Behaglichkeit ist nach eingehender Diskussion der Raumtemperaturkurven zu erwarten, sofern die Raumheiz- und Raumkühleinrichtungen ein homogenes Raumklima ohne lokale Extrema erzeugen. Dazu werden insbesondere in den Eckräumen besondere technische Vorkehrungen zu treffen sein (durch Luftführung und Wärmequellen).

Klimaneutraler Campus Leuphana Universität Lüneburg:  
Abschätzung des saisonalen Wärmespeicherpotenzials und  
Einbindung eines Aquiferspeichers in die Wärmeversorgung  
der Leuphana Universität Lüneburg



**Bericht**

Autor: Stefan Kranz  
Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum  
Sektion 6.2 Geothermische Energiesysteme  
Telegrafenberg, 14473 Potsdam

Forschungs- und Entwicklungsvertrag vom 12.07.2011 mit der  
Leuphana Universität Lüneburg  
Scharnhorststraße 1, 21335 Lüneburg  
Prof. Dr. Wolfgang Ruck

Potsdam, den 30.01.2018

# Inhalt

1	Ausgangssituation Campus Leuphana Universität Lüneburg.....	3
2	Gegenstand der Studie.....	3
3	Charakteristik des Strom- und Wärmebedarfs.....	4
3.1	Charakteristik des Elektrizitätsbedarfs.....	4
3.2	Charakteristik des Wärmebedarfs.....	5
4	Abschätzung des Speicherpotenzials auf der Basis der Bedarfszahlen.....	7
4.1	Stromgeführter Betrieb der BHKW .....	7
4.2	Betrieb der BHKW mit konstanter Leistung .....	8
4.3	Vergleich der BHKW-Betriebsweisen .....	9
5	Einbindung des Aquiferwärmespeichers in das Versorgungssystem.....	12
5.1	Abbildung der Verbraucher.....	12
5.2	Speichermodell TRNAST .....	12
5.3	Speicher- und Anlagenmodell .....	14
5.4	Modellparameter und -annahmen für die Simulationsrechnungen.....	15
6	Ergebnisse der Parameterstudie .....	17
6.1	Einfluss der BHKW-Größe.....	17
6.2	Einfluss der Pufferspeichergröße .....	17
6.2.1	Einfluss des HT-Pufferspeichers .....	18
6.2.2	Einfluss des NT-Pufferspeichers .....	18
6.3	Einfluss maximaler Volumenströme im Speicherkreislauf.....	19
6.3.1	Volumenstrom beim Entladen .....	19
6.3.2	Volumenstrom beim Beladen.....	20
6.4	Einfluss der Temperaturen im NT-Pufferspeicher auf die Ausspeicherung.....	22
6.5	Einfluss der Rücklauf Temperaturabsenkung .....	23
7	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....	23

## **1 Ausgangssituation Campus Leuphana Universität Lüneburg**

Die Leuphana Universität Lüneburg hat sich zum Ziel gesetzt, die Energieversorgung des Campus klimaneutral zu gestalten. Ein wichtiger Baustein kann die saisonale Speicherung thermischer Energie im Untergrund sein. Hierbei wird die überschüssige thermische Energie aus dem stromgeführten Betrieb einer Kraft-Wärme-Kopplung und/oder einer thermischen Solaranlage im Sommer im Untergrund gespeichert und im Winter zur Beheizung der Campusgebäude wieder ausgespeichert.

Im Rahmen einer Potenzial- und Machbarkeitsstudie wird der mögliche Beitrag eines Aquiferwärmespeichers in Verbindung mit bestehenden und evtl. zu erweiternden biogas- bzw. erdgasbetriebenen BHKW-Anlagen ermittelt.

Die Studie erfolgt in Zusammenarbeit mit der Geothermie Neubrandenburg GmbH (GTN). GTN ist hierbei für die geologische Bewertung des Speichers als auch für die energiewirtschaftliche Betrachtung verantwortlich. Die hier vorliegende Studie umfasst die Integration des Aquiferwärmespeichers in das bestehende Versorgungssystem und gibt Empfehlungen für die Planung und die Betriebsweise des Speichers. Geplante Energieeinsparmaßnahmen werden hierbei berücksichtigt.

Die Studie wurde im Rahmen der Vereinbarung „Klimaneutraler Campus Leuphana Universität Lüneburg – Scharnhorststraße/Bockelsberg“ zwischen dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) und der Leuphana Universität Lüneburg erstellt.

## **2 Gegenstand der Studie**

Auf der Grundlage der Bedarfszahlen für Wärme und Strom und deren zeitlicher Charakteristik wird für verschiedene Fahrweisen der bestehenden BHKW-Anlage, das Aquiferspeicherpotenzial abgeschätzt. Hierbei wird im Wesentlichen das saisonale Speicherpotenzial betrachtet. Potenziale, die sich aus dem Tagesverlauf ergeben, werden im Rahmen dieser Studie nicht als Aquiferspeicherpotenzial betrachtet. Anschließend erfolgt die Entwicklung eines Konzepts für die Einbindung eines Aquiferwärmespeichers in das bestehende Versorgungssystem. Sowohl die strukturelle Einbindung als auch die Fahrweise des Speichers werden anhand eines Speicher-Anlagenmodells untersucht und wichtige Parameter und Einflussgrößen werden identifiziert. Aus den Ergebnissen werden Empfehlungen für die Umsetzung eines Speichers abgeleitet. Da auf dem Universitätsgelände (Campus) und im Wohngebiet Bockelsberg mit Sanierungsmaßnahmen im Gebäudebestand zu rechnen ist, werden die Auswirkungen auf ein Energiesystem mit Aquiferspeicher untersucht. Das betrifft eine Reduzierung des Wärmebedarfs und eine Absenkung der Rücklauftemperaturen in den Verteilnetzen.

Der Vergleich der verschiedenen Versorgungskonzepte sowie der Betriebsweisen erfolgt auf der Basis des Primärenergiebedarfs der notwendig ist um den gesamten Wärme- und Elektroenergiebedarf zu decken. Die Bewertung der Energieströme über die Energiesystemgrenzen erfolgt entsprechend den Primärenergiefaktoren der ENEV 2014. Das betrifft den Bezug und die Einspeisung von Elektroenergie sowie den Bezug von Erd- bzw. Biogas. Ins öffentliche Stromnetz eingespeiste Elektroenergie wird somit als Gutschrift für den Primärenergiebedarf gewertet.

### 3 Charakteristik des Strom- und Wärmebedarfs

Die zur Verfügung stehenden Bedarfszahlen umfassen zum einen den Wärmebedarf für das Campus- und das Bockelsbergnetz und den Neubau sowie zum anderen den Elektrizitätsbedarf für den gesamten Campus. Der Wärmebedarf des Neubaus basiert auf Berechnungen von Energie- und Prozesstechnik Aachen (EPA), die anderen Daten sind Messwerte. Die Werte für den Wärmebedarf sind für die Modellrechnung auf ein Typjahr umgerechnet wurden (GTN-Bericht). Hierbei wird unterschieden zwischen Status quo (aktuelle gemessene Bedarfszahlen für ein Typjahr) und einer Zukunftsversion, die pauschal einen reduzierten Wärmebedarf im Campusnetz von 25%, keine Warmwasserbereitung in den Monaten Juni bis August und eine Rücklauf Temperaturabsenkung um 10 K berücksichtigt. Der Status quo wird im Folgenden als „Variante 1“ und die Zukunftsversion als „Variante 2“ bezeichnet. Für den Neubau wurde zusätzlich ein Bedarf für Warmwasser von ca. 150 MWh/a berücksichtigt. Genauere Erläuterungen hierzu befinden sich im GTN-Bericht Kapitel 3.

#### 3.1 Charakteristik des Elektrizitätsbedarfs

In Abbildung 1 ist der Jahresverlauf des Strombedarfs des Campus dargestellt.

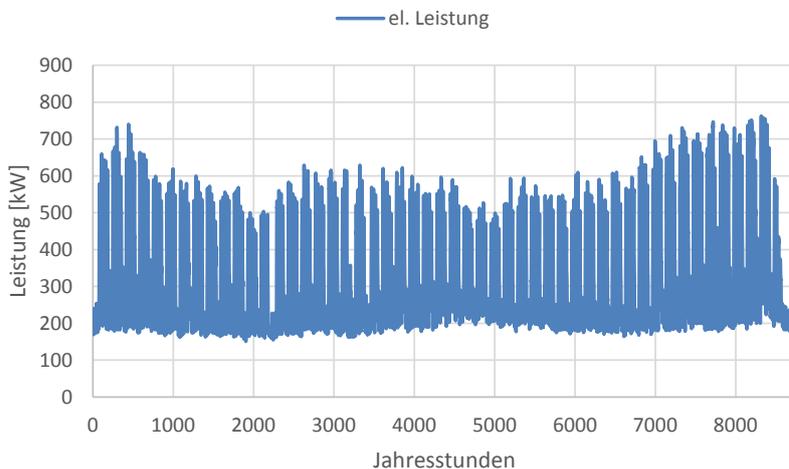


Abbildung 1: Jahresverlauf des elektrischen Leistungsbedarfs des Campus im Jahr 2012

Der Jahresverlauf des Bedarfs an elektrischer Energie zeigt einen ausgeprägten Arbeitswochen-/Wochenendrhythmus. Während am Wochenende ein Leistungsbedarf zwischen 200 und 300 kW besteht, kann an den Wochentagen je nach Jahreszeit und Universitätsbetrieb der Bedarf über 600 kW liegen. Die niedrigste Nachfrage besteht jeweils in den Semesterferien im März/April sowie August/September. Die Grundlast über das gesamte Jahr liegt bei ca. 200 kW. Generell ist die Leistungsnachfrage in den Wintermonaten etwas höher als in den Sommermonaten. Dies wird durch Abbildung 2 verdeutlicht, in der die Bedarfszahlen für den Januar und den Juli 2012 dargestellt sind.

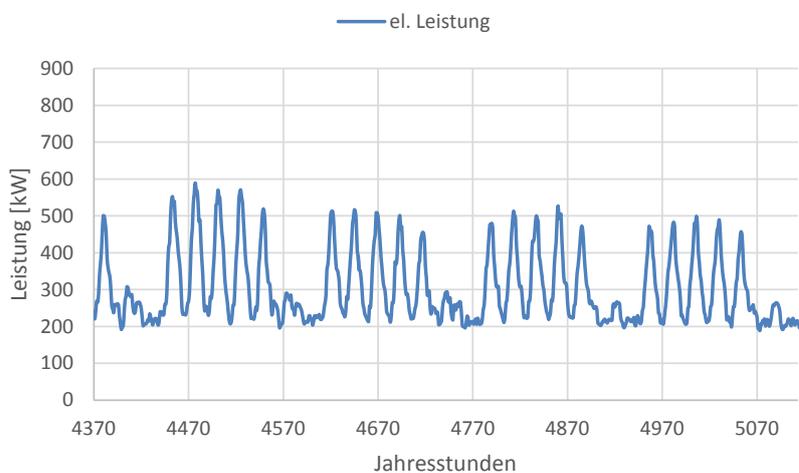
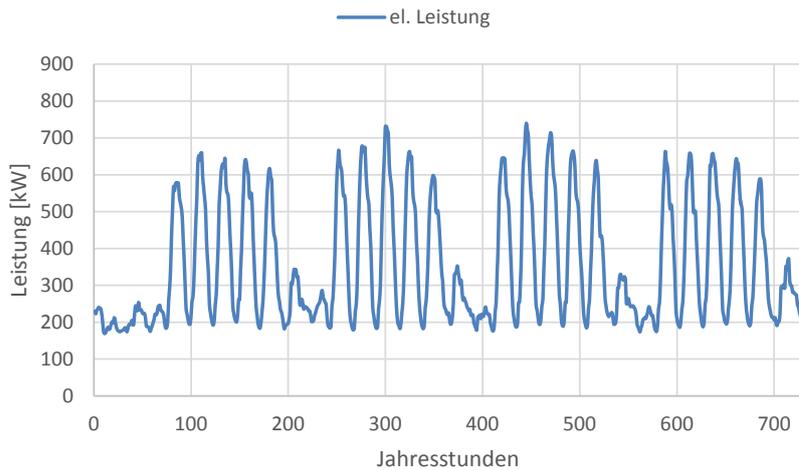
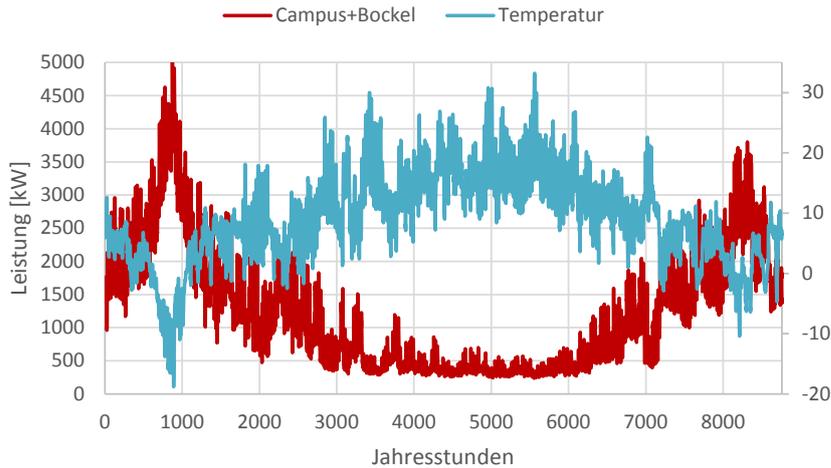


Abbildung 2: Verlauf der elektrischen Leistung des Campus für einen Monat im Winter (Januar2012, oben) und einen Monat im Sommer (Juli2012, unten)

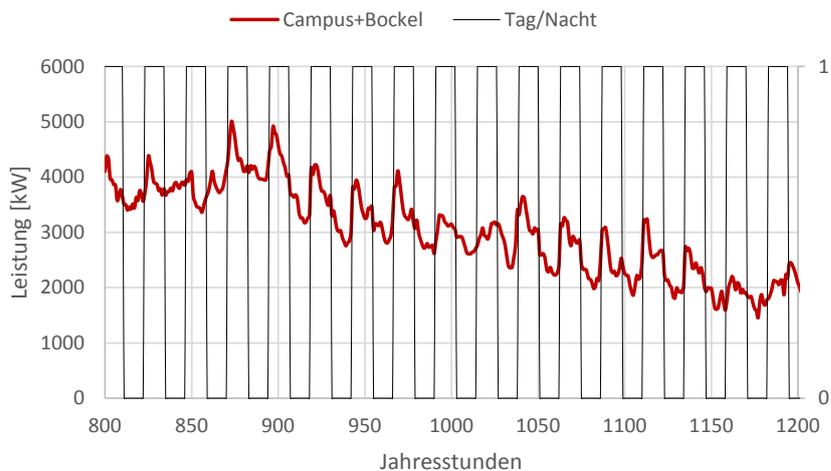
### 3.2 Charakteristik des Wärmebedarfs

In Abbildung 3 ist der Verlauf des gesamten Wärmebedarfs für Campus, das Wohngebiet Bockelsberg und den Neubau dargestellt. Der jährliche Gesamtwärmebedarf beträgt 12,5 GWh/a. Dabei entfallen auf das Gebiet Bockelsberg und den Unicampus jeweils ca. 5,8 GWh/a und auf den Neubau ca. 0,8GWh/a. Bei den Bedarfszahlen für den Campus und das Wohngebiet Bockelsberg zeigt sich ein deutlich von der Jahreszeit abhängiger Wärmebedarf, der bis auf eine Grundlast von ca. 300-400 kW<sub>th</sub> direkt von den Außentemperaturen abhängig ist.



**Abbildung 3: Jahresverlauf der gesamten Wärmeleistung (Tagesmittelwerte) für den Campus und das Wohngebiet Bockelsberg sowie der Verlauf der Außentemperatur**

In den beiden nachfolgenden Diagrammen sind die thermischen Leistungen des Wärmebedarfs für einen Zeitraum von 2 Wochen jeweils für die Winterzeit und die Sommerzeit dargestellt. Beide Leistungskurven zeigen einen ausgeprägten Tag/Nacht Rhythmus. Im Winter liegen die Unterschiede zwischen Tag und Nacht bei ca.  $1000\text{kW}_{\text{th}}$ .



**Abbildung 4: Verlauf der thermischen Leistung für die Netze Campus und Bockelsberg für ca. 2 Wochen im Winter, Tag: 1 und Nacht: 0**

Im Sommer liegt, wie in Abbildung 5 dargestellt, der Grundwärmebedarf bei ca.  $200\text{--}300\text{ kW}_{\text{th}}$  und kann tagsüber Werte über  $700\text{ kW}_{\text{th}}$  annehmen, was vermutlich auf den Brauchwasserbedarf zurückzuführen ist. Eine direkte Identifikation als Brauchwasserbedarf ist allerdings aufgrund fehlender Messwerte nicht möglich. Der mittlere Leistungsbedarf liegt bei ca.  $350\text{--}450\text{ kW}_{\text{th}}$ .

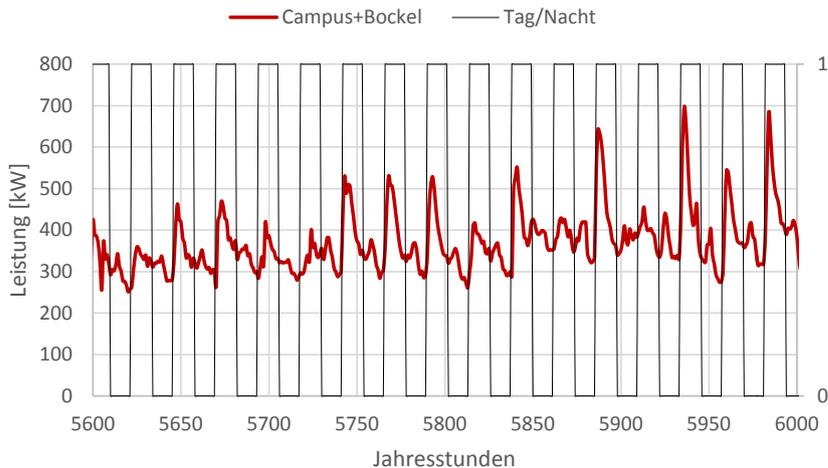


Abbildung 5: Verlauf der thermischen Leistung für die Netze Campus und Bockelsberg für ca. 2 Wochen im Sommer, Tag: 1 und Nacht: 0)

## 4 Abschätzung des Speicherpotenzials auf der Basis der Bedarfszahlen

Die Abschätzung der verfügbaren Einspeicherenergiemenge basiert auf den Bedarfszahlen von 2012 und erfolgt sowohl für die aktuelle Bedarfssituation (Variante 1) als auch für eine 25%ige Energieeinsparung im Campuswärmenetz (Variante2). Hierbei wird mit Tagesmittelwerten gerechnet. Kurzzeitige Schwankungen im Tagesverlauf werden nicht berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass diese Schwankungen durch Tagesspeicher ausgeglichen werden. Für die Abschätzung der potentiellen Speicherkapazität werden zwei verschiedene Anlagenbetriebsszenarien angenommen:

1. Stromgeführter BHKW-Betrieb, wobei die Führungsgröße der Elektroenergiebedarf des Campus ist
2. BHKW-Betrieb mit konstanter Leistung das ganze Jahr (Konstantbetrieb)

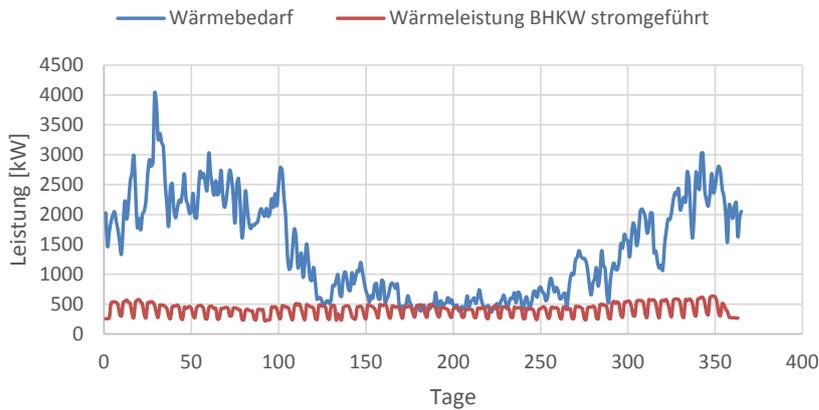
Beim Vergleich möglicher Betriebsweisen wird auch eine wärmegeführte BHKW-Betriebsweise berücksichtigt. Diese Betriebsweise entspricht dem aktuellen Istzustand.

Die Abbildung der BHKW erfolgt über einen elektrischen Wirkungsgrad von 0,4 und eine Stromkennzahl von 0,785. Diese Werte sind konstant über den gesamten Leistungsbereich. Wenn die BHKWs und der Aquiferspeicher den Wärmebedarf nicht decken können, muss zu geheizt werden. Hierfür sind Kessel mit einem Wirkungsgrad von 0,9 berücksichtigt.

### 4.1 Stromgeführter Betrieb der BHKW

In Abbildung 6 ist die thermische Leistung der BHKWs bei stromgeführtem BHKW-Betrieb dargestellt. Bei stromgeführtem Betrieb der BHKWs besteht kaum Überschusswärme, die im Aquiferspeicher gespeichert werden kann. Bei der Bedarfsvariante 1 besteht eine Überschusswärme von 12 MWh/a und im Falle der Variante 2 180 MWh/a. Beide Überschussmengen sind für eine saisonale Speicherung im Aquifer zu gering. Der geringe Überschuss ist im relativ geringen Elektroenergiebedarf des Campus im Vergleich zum gesamten Wärmebedarf begründet.

### Speicherpotential ATES Var1



### Speicherpotential ATES Var2

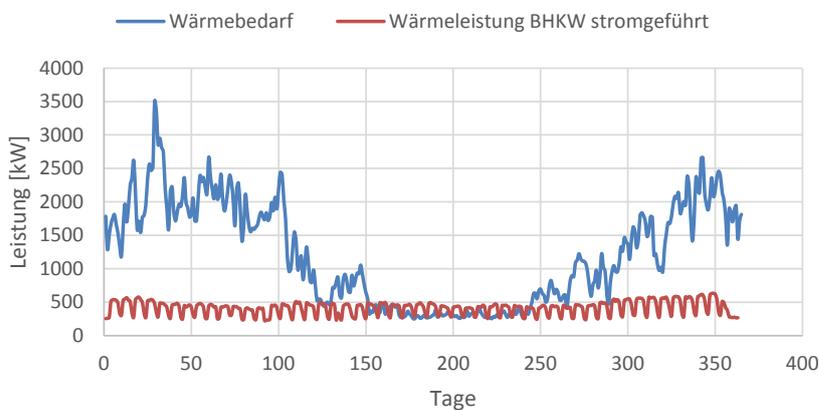
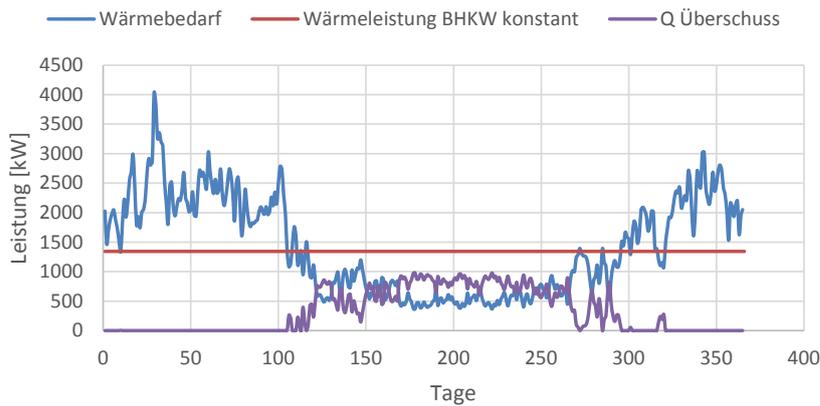


Abbildung 6: Thermische Leistung der stromgeführten BHKW und gesamter Wärmebedarf (Campus, Bockelsberg, Neubau) für Variante1 (oben) und Variante2 (unten)

## 4.2 Betrieb der BHKW mit konstanter Leistung

Wenn die vorhandenen BHKW mit einer konstanten elektrischen Leistung von  $2 \times 527 \text{ kW}_{el}$  betrieben werden, dann besteht in den Sommermonaten ein Überschuss von ca. 2830 MWh/a für Variante 1 und ca. 3570 MWh/a für Variante 2. Die Verläufe der Wärmeleistung der BHKW und der Überschussleistung sind in Abbildung 7 dargestellt. Der größere Überschuss für Variante 2 resultiert aus dem um 25 % geringeren Wärmebedarf durch Sanierung, der sich in der Übergangszeit und in der Sommerzeit bemerkbar macht.

## Speicherpotential ATES Var1



## Speicherpotential ATES Var2

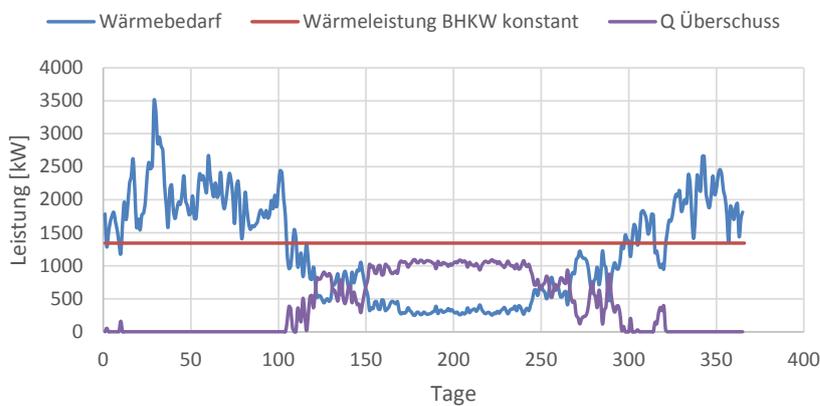


Abbildung 7: Wärmebedarf (Campus, Bockelsberg, Neubau), BHKW Wärmebereitstellung bei konstanter Betriebsweise mit 1054kWel und daraus resultierende Überschusswärme für Variante1 (oben) und Variante2 (unten)

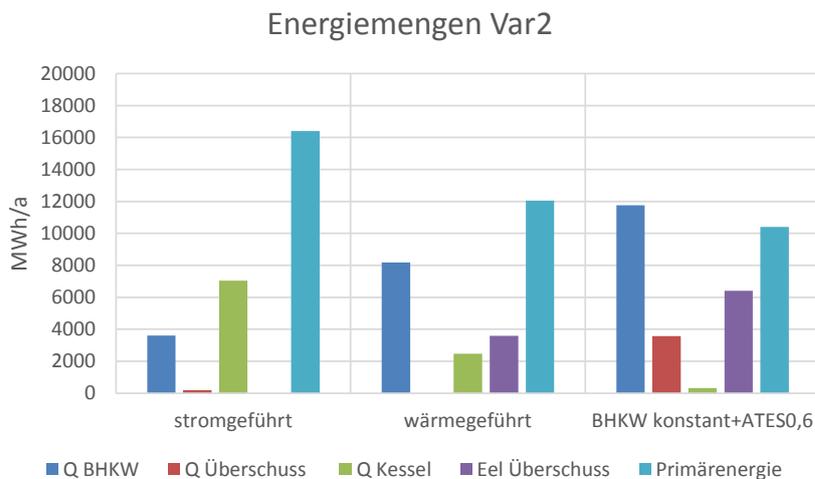
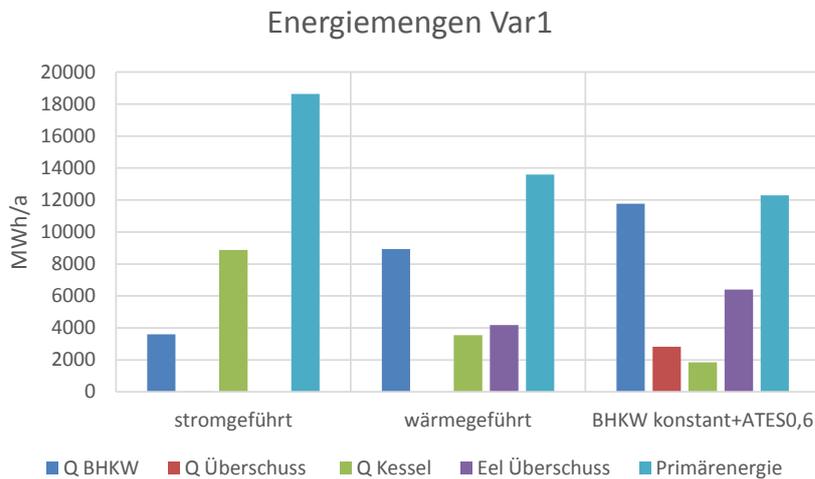
In den Wintermonaten können die BHKW nicht den gesamten Wärmebedarf decken, wodurch ein theoretisches Ausspeicherpotenzial entsteht. In der Variante 1 ergibt sich ein Ausspeicherpotenzial von ca. 3500 MWh/a und in Variante 2 von ca. 2500 MWh/a.

### 4.3 Vergleich der BHKW-Betriebsweisen

In Abbildung 8 sind die anteiligen Energiemengen für die drei verschiedenen BHKW-Betriebsweisen sowie der Primärenergieaufwand gemäß den Primärenergiefaktoren nach ENEV 2014 dargestellt. Den höchsten Primärenergiebedarf weist der stromgeführte BHKW-Betrieb auf. Aufgrund des hohen Wärmebedarfs im Vergleich zum Elektrizitätsbedarf ist hier eine hohe Zuheizung mit den Kesseln notwendig, was einen hohen Primärenergiebedarf zur Folge hat. Die notwendige Zuheizung über die Kessel kann durch eine wärmegeführte BHKW-Betriebsweise deutlich reduziert werden. Da bei dieser Betriebsweise auch ein Überschuss an Elektroenergie besteht und ins öffentliche Netz eingespeist wird ist, im Vergleich zur stromgeführten Betriebsweise eine deutliche Reduzierung des Primärenergiebedarfs möglich.

Für den Konstantbetrieb der BHKW kommt der Aquiferspeicher(ATES) zum Einsatz, wobei hier ein Rückgewinnungsfaktor von 0,6 zugrunde gelegt wird. Bei bestehender BHKW-Kapazität im

Konstantbetrieb in Kombination mit dem ATES zeigt sich für beide Bedarfsvarianten der geringste Primärenergieaufwand. Zum einen wird dies durch eine reduzierte Nachheizung durch die Kessel erreicht als auch durch die Einspeisung der überschüssigen elektrischen Energie in das öffentliche Netz. Wenn Energiesparmaßnahmen (Variante2) berücksichtigt werden, dann kann mit der bestehenden BHKW-Kapazität annähernd eine vollständige Wärmeversorgung erreicht werden. In diesem Falle müssen lediglich 320 MWh/a durch Kessel bereitgestellt werden.



**Abbildung 8: Vergleich verschiedener BHKW-Betriebsweisen und unter Berücksichtigung des ATES im BHKW-Konstantbetrieb mit einem Rückgewinnungsfaktor von 0,6 für die Bedarfsvariante 1 (oben) und 2 (unten)**

Für eine vollständige Versorgung der Wärmenachfrage durch BHKW mit Nutzung des ATES ist die installierte Leistung der BHKW in Variante1 nicht ausreichend. Unter der Annahme, dass der Speicherwirkungsgrad 0,6 beträgt, müsste die BHKW-Kapazität auf ca. 1270 kW<sub>el</sub> angehoben werden (Abbildung 9).

Eine Reduzierung des Kesselanteils kann auch durch eine Verbesserung des Speicher-rückgewinnungsgrades erreicht werden. Je höher der Rückgewinnungsfaktor des ATES ist, desto kleiner kann die BHKW-Kapazität sein, um den Wärmebedarf vollständig zu decken (Abbildung 9).

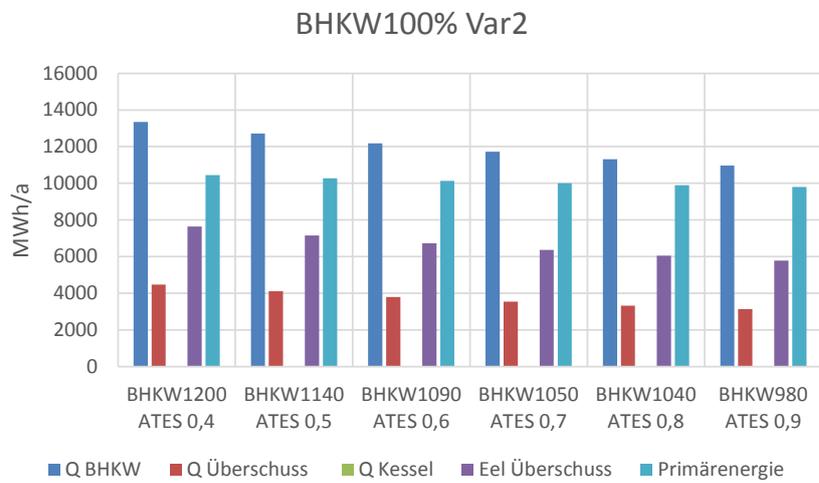
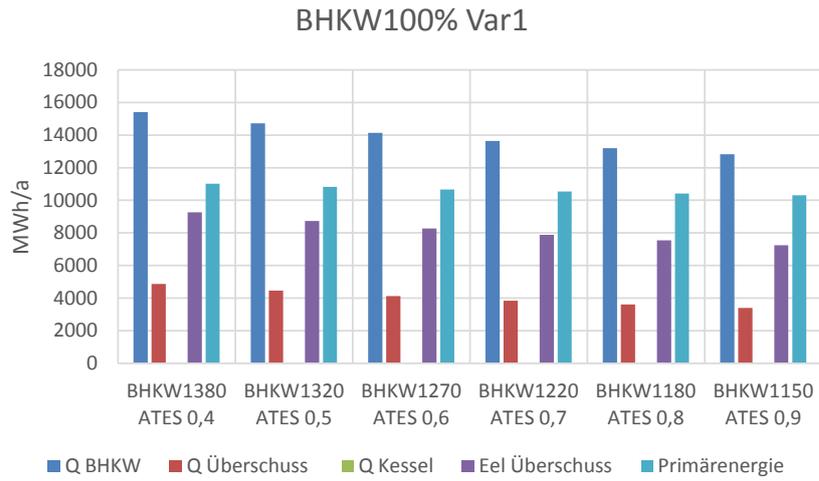


Abbildung 9: BHKW-Kapazität und Energiemengen unter der Annahme einer vollständigen Deckung des Wärmebedarfs durch die BHKW + ATES in Abhängigkeit vom Rückgewinnungsfaktor des ATES für Bedarfsvariante 1 (oben) und 2 (unten)

## 5 Einbindung des Aquiferwärmespeichers in das Versorgungssystem

Bei der technischen Einbindung eines Aquiferspeichers in ein bestehendes Versorgungssystem existieren aufgrund der schon bestehenden Strukturen weniger Freiheitsgrade. So können z.B. die Temperaturen der Wärmeverteilnetze nur begrenzt an ein für den Speicher optimales Niveau angepasst werden. So besteht die Herausforderung darin, die bestehende Technik so anzupassen und gegebenenfalls zu ergänzen, dass auch ein effektiver Speicherbetrieb möglich wird. Das nachfolgend vorgestellte Konzept ist eine Möglichkeit, wie der Speicher integriert werden kann, wobei folgende Hauptkriterien bedeutend sind:

- Möglichst gute Auskühlung im Speicherkreislauf während des Entladens → führt zu einem höheren Wärmerückgewinnungsgrad des ATES
- Wärmeeinspeisung auf möglichst allen Temperaturniveaus, die von den Netzen vorgegeben sind → führt zu einem höheren Wärmerückgewinnungsgrad des ATES
- Möglichst kleine Volumenströme im Speicherkreislauf, da dies niedrigere Kosten beim Bohrungsausbau zur Folge hat
- Anpassung der Volumenströme im Wärmeübertrager des Speicherkreislaufs → führt zu kleinen Temperaturdifferenzen zwischen Primär- und Sekundärseite und erhöht somit das nutzbare Temperaturniveau der ausgespeicherten Wärme

### 5.1 Abbildung der Verbraucher

Die Abbildung des Nahwärmenetzes erfolgt durch das Einlesen der Wärmebedarfswerte sowie der Netzvor- und Rücklauftemperaturen. Die verwendeten Bedarfswerte und Temperaturen basieren auf den Berechnungen von GTN, wobei hier nur die Wärmebedarfswerte der Variante 2, d.h. 25 % Bedarfsreduktion, berücksichtigt wurden. Der Elektroenergiebedarf wird ebenfalls durch Einlesen der stündlich gemessenen Bedarfswerte für den Campus abgebildet. Für das Wärmenetz des Neubaus werden eine Vorlauftemperatur von 58 °C und eine Rücklauftemperatur von 25 °C angenommen.

### 5.2 Speichermodell TRNAST

Für die Modellierung des Speichers wird im Vergleich zur „stand alone“-Speichermodellierung ein reduziertes und schnelleres Speichermodell verwendet. Bei diesem Speichermodell erfolgt nur die thermodynamische Berechnung. Die strömungsmechanischen Vorgänge werden hingegen vereinfacht abgebildet. Das Speichermodell wurde mithilfe von Vergleichsrechnungen mit dem Feflow-Modell von GTN evaluiert. Die Evaluierung erfolgte mit Eingabedaten für den Volumenstrom und die Injektionstemperaturen, welche sich aus der Energiesystemmodellierung ergeben. Da sich die beiden Systembereiche, Energietechnik und Aquiferspeicher gegenseitig beeinflussen war bei der Speichermodellierung mit Feflow ein iteratives Vorgehen notwendig. Hierbei wurden die beiden Systembereiche jeweils separat für ein Betriebsjahr berechnet und die Ergebnisse an der Schnittstelle beider Bereiche jeweils als Eingabedaten für den jeweils anderen Systembereich verwendet. Nach fünf Iterationsschritten, was in diesem Fall der 5. Speicherperiode entspricht konnte die Iteration mit ausreichender Genauigkeit beendet werden. Für einen Vergleich der beiden Modelle ist somit die 5. Speicherperiode in Abbildung 10 maßgebend. Das TRNAST-Modell liefert eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Feflow-Modell. Lediglich am Ende der Ausspeicherphase besteht eine Differenz in der Ausspeichertemperatur für das Betriebsszenario 1, wobei hier das TRNAST-Modell eine etwas geringere Temperatur liefert und somit der resultierende Speicherrückgewinnungsgrad etwas geringer ausfällt.

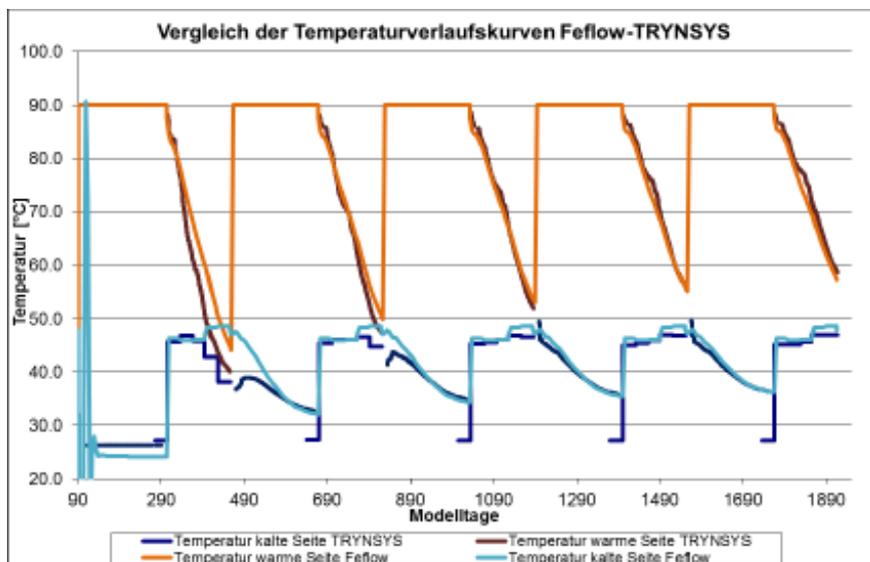
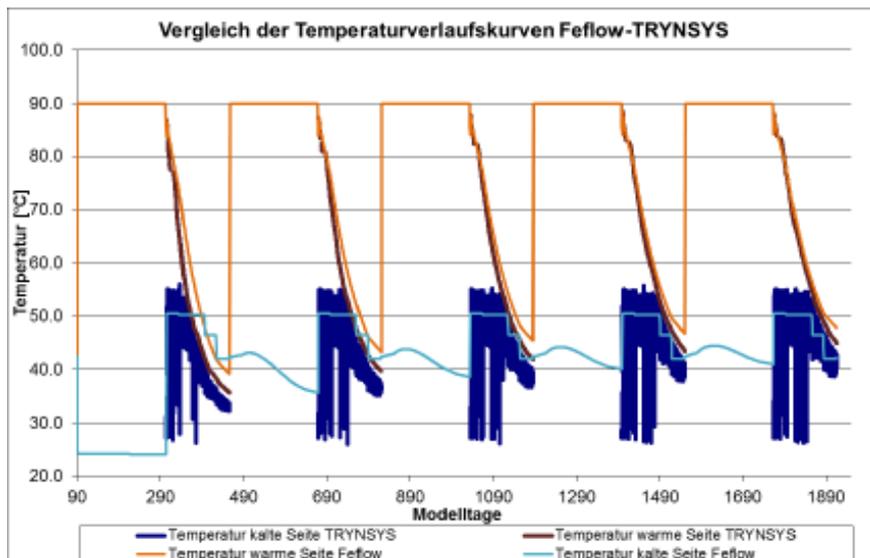


Abbildung 10: Vergleich der Temperaturen an den Bohrungen für die Modellierung mit Feflow und TRYNYSYS für zwei verschiedene Betriebszenarien mit links:  $Q_{\max}=30\text{m}^3/\text{h}$  und rechts:  $Q_{\max}=50\text{m}^3/\text{h}$ , (Quelle: GTN)

Die Temperaturen an der kalten Bohrung, dargestellt für das Betriebszenario 2, stimmen ebenfalls sehr gut überein. Das reduzierte Speichermodell TRYNYSYS eignet sich somit sehr gut zur Berechnung des Speicherverhaltens. Für die Berechnung des Speicherverhaltens der Variante „Sammelbohrplatz“ (Bericht GTN), was eine thermische und hydraulische Beeinflussung der Aquiferbereiche an beiden Bohrungen zulässt, kann TRYNYSYS nicht verwendet werden, da hier beide Bohrungen separat gerechnet werden.

Die Parameter des reduzierten Speichermodells entsprechen im Wesentlichen denen des Feflow-Modells, wie dargestellt in den Tabellen 4-1 und 4-2 des GTN Berichts. Die Modellschichten 2-9 wurden im TRYNYSYS Modell berücksichtigt und die Modellschichten 1, 10 und 11 wurden nicht berücksichtigt, da kein Einfluss dieser Schichten auf das thermische Verhalten des ATES festgestellt werden konnte. Die Rechenzeit konnte somit reduziert werden.

### 5.3 Speicher- und Anlagenmodell

Für die Untersuchung der bestmöglichen Integration des Aquiferspeichers in das Versorgungssystem des Campus sowie der Einbindung des Bockelsbergnetzes wurden verschiedene hydraulische Verschaltungen untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass eine Verbindung des Speicherkreislaufs und der 3 verschiedenen Heiznetze (Bockelsberg, Campus, Neubau) direkt über Wärmeübertrager, wie üblich, keine optimale Einbindung des Speichers ermöglicht. Der Grund hierfür ist, dass alle Netze auf verschiedenen Temperaturniveaus betrieben werden, sehr unterschiedliche Leistungen aufweisen und auch das zeitliche Verhalten unterschiedlich ist. Für eine optimale Speichernutzung ist es notwendig, dass bei der Entladung sowohl Hochtemperatur- als auch Niedertemperaturwärme genutzt wird bzw. entladen werden kann. Hierdurch wird eine bestmögliche Auskühlung des Speicherwassers erreicht. Durch den Einsatz von Schichtenpufferspeichern an der Schnittstelle zwischen Aquiferspeicher und Energieanlagen kann dies erreicht werden. Das Ersatzschaltbild für die Integration des Aquiferspeichers ist in Abbildung 11 dargestellt.

Über die Pufferspeicher wird die Wärmeeinkopplung von den BHKW, die Be- und Entladung des ATES und die Versorgung der drei Bedarfsgruppen: Bockelsberg, Campus und Neubau geschaltet, wobei ein Pufferspeicher für den Hochtemperaturbereich (60 – 90 °C) und einer für den Niedertemperaturbereich (25 – 60 °C) zum Einsatz kommen. Der Hochtemperaturspeicher (HT-Speicher) wird von den BHKW beladen und wird entladen durch die Wärmebereitstellung für das Gebiet Bockelsberg, den Campus, die ATES-Beladung und wenn nötig durch den Wärmebedarf des Neubaus. Der Niedertemperaturspeicher (NT-Speicher) ist ausschließlich für die Wärmebereitstellung des Neubaus zuständig.

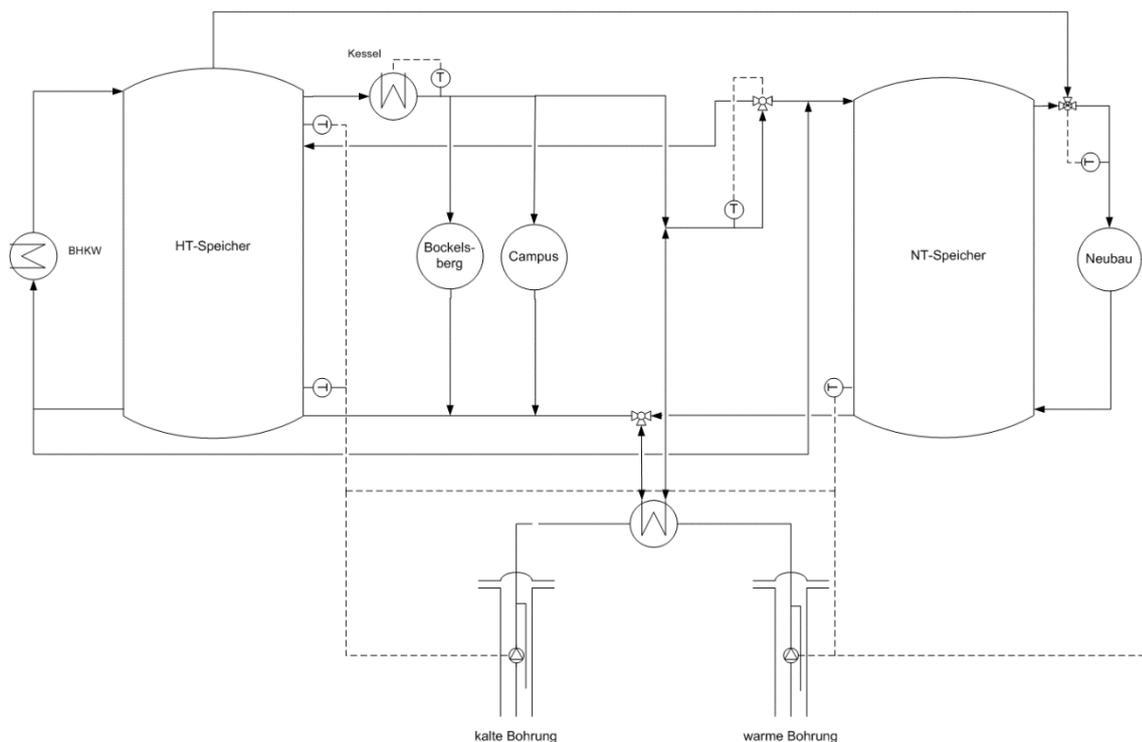


Abbildung 11: Ersatzschaltbild für die Modellierung der ATES-Einbindung

Die Entladung des ATES erfolgt je nach Rückfördertemperatur in den Hochtemperaturspeicher oder Niedertemperaturspeicher. Beim Hochtemperaturspeicher ist eine Schichtladung vorgesehen. Der zusätzliche Wärmebedarf, welcher durch Heizkessel bereitgestellt wird, ist im Model als Zusatzheizung

zur Vorlauftemperaturerhöhung vorgesehen. Der HT-Pufferspeicher hat im Wesentlichen die Aufgabe, Tag- und Nachtschwankungen zwischen Bereitstellung und Bedarf auszugleichen sowie die Ladephasen für den ATES zu verlängern bzw. Leistungsspitzen zu reduzieren. Der NT-Speicher soll zum einen die Entladephasen für den ATES verlängern und zum anderen einen ATES Betrieb mit geringen Schwankungen im Volumenstrom ermöglichen. Weiterhin kann über die Vorgabe eines bestimmten Temperaturniveaus am Boden des NT-Speichers die Anforderung des ATES zur Ausspeicherung erfolgen. Dies ermöglicht eine Anpassung des Speicherbetriebs an die Bedarfssituation sowie eine gute Auskühlung im Aquiferspeicherkreislauf während der Ausspeicherung. Die beste Auskühlung wird erreicht, wenn eine Ausspeicherung nur dann erfolgt wenn auch Bedarf im Neubau besteht, da hier die Netztemperaturen sehr gering sind. Allerdings hat der Neubau einen geringen Wärmebedarf was zu geringen Betriebszeiten bei geringen Volumenströmen führen würde. Dies führt wiederum dazu, dass nur ein geringer Anteil der im Sommer eingespeicherten thermischen Energie genutzt wird. Um die mögliche Ausspeicherenergie zu erhöhen muss auch eine gleichzeitige Ausspeicherung über den HT-Pufferspeicher in das Campusnetz erfolgen. Eine reine Ausspeicherung in das Campusnetz reduziert ebenfalls das Ausspeicherpotential, da hier aufgrund der hohen Rücklauftemperaturen keine ausreichende Auskühlung des Aquiferspeicherkreislaufs erfolgt. Ein optimaler ATES-Betrieb besteht somit in einer Kombination aus HT- und NT – Wärme-bereitstellung.

#### **5.4 Modellparameter und -annahmen für die Simulationsrechnungen**

Nachfolgend sind Modellparameter wie Größenangaben und Temperaturen sowie weitere für den Betrieb getroffene Annahmen für das Basisszenario aufgeführt. Ausgehend davon wurden Simulationsstudien zur Identifizierung bedeutender Betriebs- und Anlagenparameter durchgeführt.

##### **Aquiferspeicher und Speicherkreislauf**

Das Verhalten des Aquiferwärmespeichers ist thermisch abgebildet. Der Speicherbetrieb ist in eine Lade- und eine Entladeperiode unterteilt. Hierbei erfolgt von April bis Oktober die Beladung des Speichers. In den Monaten November bis März kann der Speicher entladen werden. Der maximal mögliche Volumenstrom im Speicherkreislauf ist für das Basisszenario auf 50 m<sup>3</sup>/h bei der Ausspeicherung und 30 m<sup>3</sup>/h bei der Einspeicherung begrenzt. Der Mindestvolumenstrom beim Ein- und Ausspeichern ist mit 40 % vom maximalen Volumenstrom angenommen. Dieser basiert auf der Betriebsgrenze der Bohrlochpumpen. Die Einspeicherung erfolgt mit 90 °C.

Das Be- und Entladen des Aquiferspeichers muss anhand bestimmter Kriterien gesteuert werden. Nachfolgend sind die in der Simulationsrechnung wirksamen Kriterien aufgeführt.

Beladen: Die Bedingungen für das Beladen des ATES sind:

- Zeit: April bis Oktober
- Start Beladen: Temperatur am Boden des HT-Speichers  $\geq 85$  °C
- Stopp Beladen: Temperatur am Kopf des HT-Speichers  $< 85$  °C

Entladen: Für das Entladen des ATES müssen mehrere Bedingungen erfüllt sein:

- Wärmebedarf Campus + Neubau > 0
- Zeit: November bis März
- Temperatur im oberen Teil des HT-Pufferspeichers < 70 °C
- Temperatur am Boden des NT-Pufferspeichers < 50 °C

Die Betriebsweise bzw. die Regelung des Wärmeübertragers im Speicherkreislauf ist so gewählt, dass eine möglichst geringe Temperaturdifferenz zwischen Primär- und Sekundärseite besteht.

#### **Pufferspeicher**

- Größe des NT-Pufferspeicher: 30 m<sup>3</sup>
- Größe des HT-Pufferspeichers: 50 m<sup>3</sup>

#### **BHKW und Kessel**

Die Abbildung der BHKW erfolgte entsprechend den Annahmen von GTN mit einer Stromkennzahl von 0,785 und einem elektrischen Wirkungsgrad von 0,4. Beide Kennzahlen werden über den gesamten Lastbereich als konstant angenommen. Die BHKW werden permanent mit 100 % Last betrieben. Dabei wird im Basisszenario von einer elektrischen Nennleistung von 1050 kW ausgegangen. Der Wirkungsgrad für die Spitzenlastkessel ist 0,9. Die Vorlauftemperatur beider Komponenten beträgt 90 °C.

## 6 Ergebnisse der Parameterstudie

Mithilfe des unter 5.3 beschriebenen Modells wurden Parameterstudien zur Identifizierung des Einflusses von Anlagen- und Systemparametern durchgeführt.

Die untersuchten Parameter sind die BHKW-Nennleistung, die Größe der Pufferspeicher, der maximale Volumenstrom im Aquiferspeicherkreislauf sowie die Auskühlung des Speicherwassers beim Ausspeichern unter Berücksichtigung der Bedarfssituation.

Es wird der Einfluss dieser Parameter auf

- die Wärmebereitstellung der BHKW ( $Q_{\text{CHP}}$ ) und des Spitzenlastkessels ( $Q_{\text{Boiler}}$ ),
- die ein- und ausgespeicherte thermische Energie ( $\text{ATES}_{\text{load}}$ ,  $\text{ATES}_{\text{supply}}$ ) des Aquiferwärmespeichers und
- den gesamten Primärenergiebedarf ( $E_{\text{prim}}$ )

dargestellt.

### 6.1 Einfluss der BHKW-Größe

Der Einfluss der BHKW-Größe wurde schon bei der Speicherpotenzialabschätzung (Kapitel 4) aufgezeigt. Allerdings wurden dort statische Speicherbedingungen angenommen und der Einfluss von Temperaturen wurde vernachlässigt. Die Ergebnisse der Variation der BHKW-Nennleistung unter Berücksichtigung des Speicherverhaltens sind in Abbildung 12 dargestellt. Hierbei erfolgte eine Variation der BHKW-Leistung zwischen 950 und 1500 kW<sub>el</sub>. Der niedrigste Primärenergiebedarf zeigt sich bei einer BHKW-Leistung von ca. 1050 kW<sub>el</sub>. Dieser Wert entspricht der vorhandenen BHKW-Kapazität von 1054 kW<sub>el</sub>. Der höchste Speicherwirkungsgrad wird bei einer BHKW-Größe von 1000 kW erreicht. Bei größeren BHKW-Leistungen wird zwar im Sommer mehr Wärmeenergie eingespeichert, diese kann aber im Winter, aufgrund des geringeren verbleibenden Wärmebedarfs, nicht mehr genutzt werden.

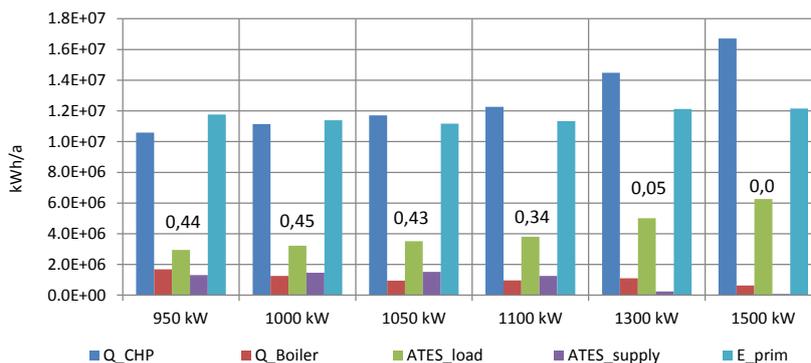


Abbildung 12: Einfluss der BHKW-Größe auf den Speicherbetrieb ( $\text{ATES}_{\text{load}}$ ,  $\text{ATES}_{\text{supply}}$ ), den Primärenergiebedarf ( $E_{\text{prim}}$ ) des Systems und die Wärmebereitstellung durch BHKW ( $Q_{\text{CHP}}$ ) und Spitzenlastkessel ( $Q_{\text{Boiler}}$ )

### 6.2 Einfluss der Pufferspeichergröße

Der HT-Pufferspeicher hat die Aufgabe, den Ausgleich der Tag- und Nachtschwankungen zwischen Bereitstellung und Bedarf herzustellen und Schwankungen im Wärmeüberschuss sowie -bedarf auszugleichen. Hierdurch wird auch ein gleichmäßiger Ein- und Ausspeicherbetrieb des Aquiferspeichers mit kleinen Volumenströmen möglich. Der NT-Pufferspeicher hat die Aufgabe, das

Ausspeichern und den Wärmebedarf des Neubaus zeitlich zu entkoppeln sowie eine optimale Auskühlung im Speicherkreislauf beim Ausspeichern zu erreichen.

Somit hat die Größe der Pufferspeicher an der Schnittstelle zwischen Speicherkreislauf und dem übertage installierten Energieversorgungssystem zum einen Einfluss auf die Investitionen und zum anderen die energetische Qualität des Speicherbetriebs. Als Entscheidungsgrundlage ist es somit notwendig, den Einfluss der Pufferspeichergröße zu kennen. Hierfür wird der Einfluss der HT- und NT-Pufferspeichergröße auf die Effizienz des ATES-Betriebs und den Primärenergiebedarf für die gesamte Energieversorgung untersucht. Die Speichergröße des HT-Pufferspeichers wird zwischen 20 und 100 m<sup>3</sup> Speichervolumen und die des NT-Pufferspeichers zwischen 10 und 100 m<sup>3</sup> variiert.

### 6.2.1 Einfluss des HT-Pufferspeichers

Der Einfluss des Speichervolumens des HT-Pufferspeichers ist verhältnismäßig gering bei den untersuchten Größen. Bei einer Speichergröße kleiner 30 m<sup>3</sup> sind die Rückgewinnungsgrade geringfügig kleiner und der Primärenergiebedarf geringfügig größer als bei Speichervolumina > 30 m<sup>3</sup>. Es ist zu vermuten, dass bei Speichervolumina kleiner 20 m<sup>3</sup> ein deutlicher Einfluss zu sehen ist, allerdings wurde dies aus modelltechnischen Gründen nicht näher untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass eine HT-Pufferspeichergröße von ca. 50-70 m<sup>3</sup> aus primärenergetischer Sicht empfehlenswert ist.

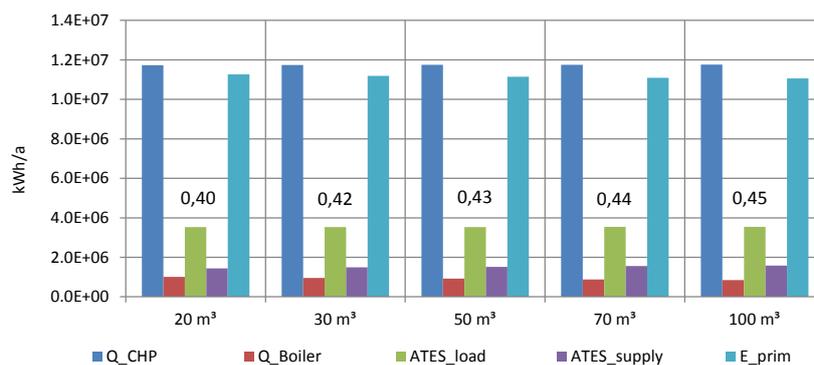


Abbildung 13: Einfluss der Größe des Hochtemperaturpufferspeichers auf den Speicherbetrieb (ATES\_load, ATES\_supply), den Primärenergiebedarf (E\_prim) des Systems und die Wärmebereitstellung durch BHKW (Q\_CHP) und Spitzenlastkessel (Q\_Boiler)

### 6.2.2 Einfluss des NT-Pufferspeichers

Der Einfluss des Niedertemperaturpufferspeichers ist in Abbildung 14 dargestellt. Auch hier zeigt sich ein nur geringer Einfluss, wobei mit zunehmender Speichergröße der Wärmerückgewinnungsfaktor des ATES abnimmt und demzufolge auch eine geringfügige Zunahme des Heizkesselbedarfs und somit auch des Primärenergiebedarfs zu erkennen ist. Anhand der Ergebnisse erscheint eine NT-Pufferspeichergröße zwischen 10 und 30 m<sup>3</sup> angemessen.

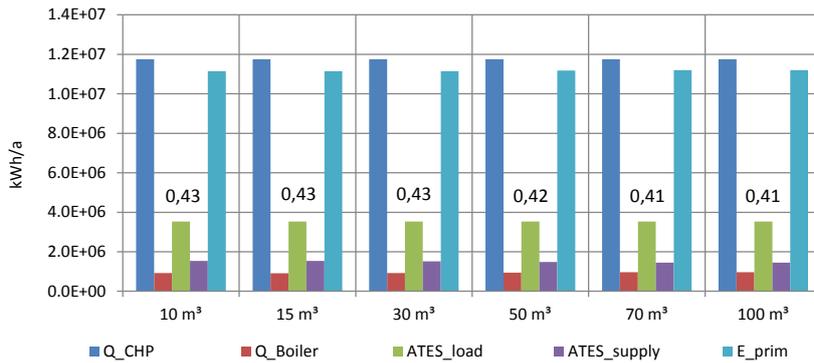


Abbildung 14: Einfluss der Größe des Niedertemperaturpufferspeichers auf den Speicherbetrieb (ATES\_load, ATES\_supply), den Primärenergiebedarf (E\_prim) des Systems und die Wärmebereitstellung durch BHKW (Q\_CHP) und Spitzenlastkessel (Q\_Boiler)

### 6.3 Einfluss maximaler Volumenströme im Speicherkreislauf

Der maximale Volumenstrom im Speicherkreislauf bestimmt einerseits die maximale Ein- und Ausspeicherleistung und zum anderen bestimmt er den Durchmesser sowie den Ausbau der Bohrungen. Ein kleiner Volumenstrom verkleinert die möglichen Ein- und Ausspeicherleistungen, verringert aber deutlich die Kosten für die Bohrung bzw. für die technische Komplettierung der Bohrung. Im Folgenden wird dargestellt, inwiefern die maximalen Volumenströme im Speicherkreislauf Einfluss auf den Speicherbetrieb und die Gesamtsystemperformance haben. Des Weiteren wird gezeigt, ob ein Zusammenhang von Pufferspeichergröße und Designvolumenstrom besteht, der beim Anlagendesign berücksichtigt werden muss.

#### 6.3.1 Volumenstrom beim Entladen

Beim Entladen des Speichers ist der Auslegungsvolumenstrom der Pumpe in der warmen Bohrung des Speichers maßgebend. Nach Abbildung 15 steigt mit steigendem maximalen Entladevolumenstrom die ausgespeicherte thermische Energie und damit verbunden auch der Speicherwirkungsgrad. Als Folge sinkt auch der Primärenergieaufwand. Ab einem Volumenstrom von 50 m³/h ist keine Verbesserung der Energieeffizienz mehr zu verzeichnen.

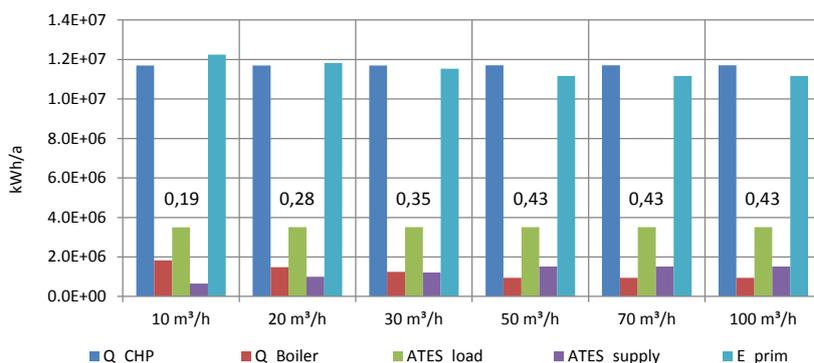


Abbildung 15: Einfluss des maximalen Volumenstroms beim Entladen des Aquiferspeichers (NT-Pufferspeicher: 30 m³, HT-Pufferspeicher 50 m³)

In Abbildung 16 ist der Einfluss des Volumenstroms beim Entladen des Speichers für einen NT-Pufferspeicher mit 15 m³ bzw. 50 m³ Puffervolumen dargestellt. Der Vergleich beider Abbildungen zeigt, dass der Einfluss des Volumenstroms nicht von der NT-Pufferspeichergröße abhängt. Dies bedeutet, dass bei der Anlagenplanung keine Wechselwirkung beider Designgrößen zu berücksichtigen

ist. Bei allen untersuchten NT-Speichergrößen ist ein Auslegungsvolumenstrom von ca. 50 m<sup>3</sup>/h optimal.

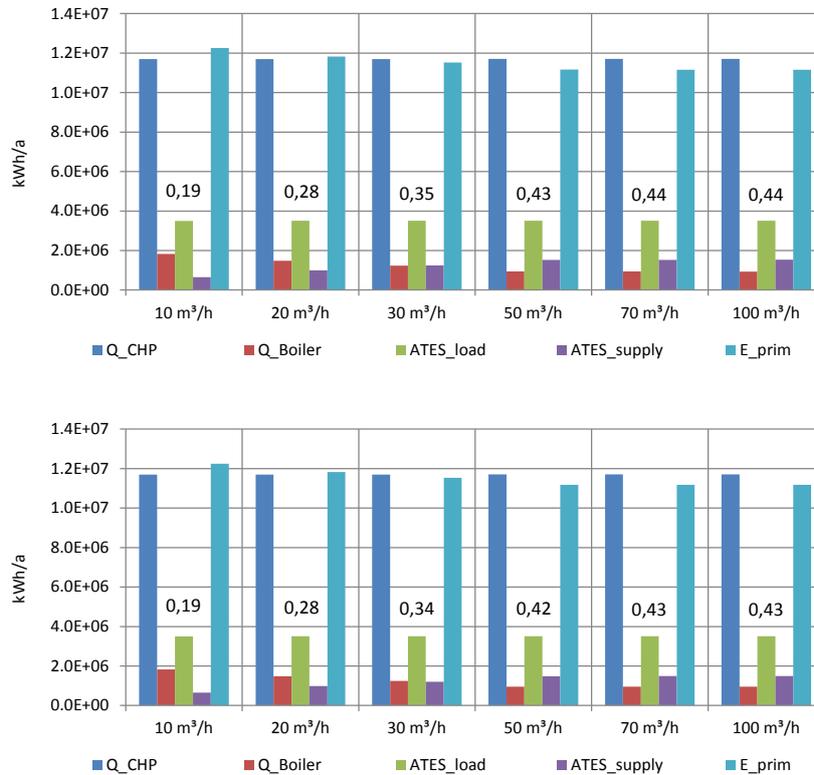


Abbildung 16: Einfluss des maximalen Volumenstroms beim Entladen des Aquiferspeichers (NT-Pufferspeicher: oben: 15 m<sup>3</sup>, unten: 50 m<sup>3</sup>, HT- Pufferspeicher 50 m<sup>3</sup>)

### 6.3.2 Volumenstrom beim Beladen

Beim Beladen des Speichers ist der maximale Volumenstrom bzw. Designvolumenstrom in der kalten Bohrung maßgebend. Bei der Parameterstudie wird der Designvolumenstrom in den Schritten 10, 20, 30, 50, 70 und 100 m<sup>3</sup>/h variiert. Die Ergebnisse in Abbildung 17 zeigen, dass auch hier mit steigendem Designvolumenstrom die Effizienz des gesamten Versorgungssystems steigt. Die Effizienz des Speicherbetriebs wird vom Designvolumenstrom kaum beeinflusst, allerdings kann bei einem Volumenstrom unterhalb 20 m<sup>3</sup>/h das Speicherpotenzial nicht genutzt werden, da dann der Volumenstrom nicht mehr ausreicht um die Überschussenergiemenge in den Speicher zu transportieren. Es können so nur ca. 2,2 GWh von möglichen 3,5 GWh eingespeichert werden. Ein Designvolumenstrom von 20-30 m<sup>3</sup>/h für die Pumpe in der kalten Bohrung ist somit ausreichend.

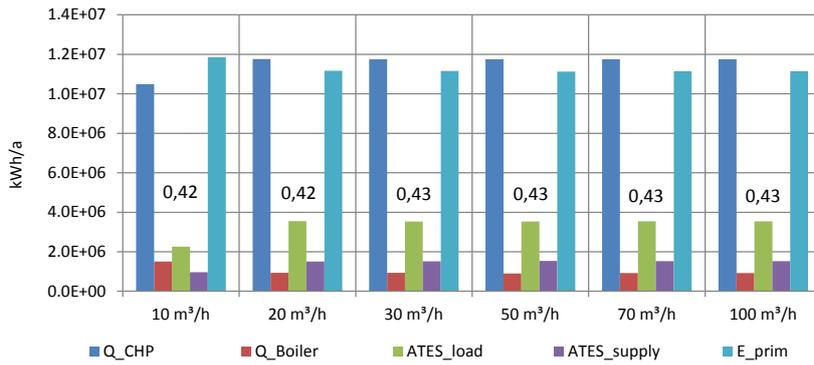


Abbildung 17: Einfluss des maximalen Volumenstroms beim Beladen des Aquiferspeichers (NT-Pufferspeicher: 30 m<sup>3</sup>, HT-Pufferspeicher 50 m<sup>3</sup>)

Abbildung 18 zeigt die Ergebnisse der Variation des Designvolumenstroms beim Beladen des Speichers für eine HT-Pufferspeichergröße von 30 m<sup>3</sup> und 100 m<sup>3</sup>. Hierbei zeigt sich, wie auch beim NT-Pufferspeicher, kein signifikanter Einfluss sodass beide Größen als unabhängig betrachtet werden können. Beim HT-Pufferspeicher mit 100 m<sup>3</sup> Volumen sind im Vergleich zu den beiden kleineren untersuchten Speichergrößen (30, 50 m<sup>3</sup>) für alle Designvolumenströme höhere Speicherrückgewinnungsgrade sowie geringere Primärenergieaufwände zu verzeichnen, was auf den generellen Einfluss der HT-Speichergröße zurückzuführen ist (Abbildung 13). Für alle untersuchten Pufferspeichergrößen ist ein Designvolumenstrom beim Beladen des ATES zwischen 20 und 30 m<sup>3</sup>/h zu empfehlen.

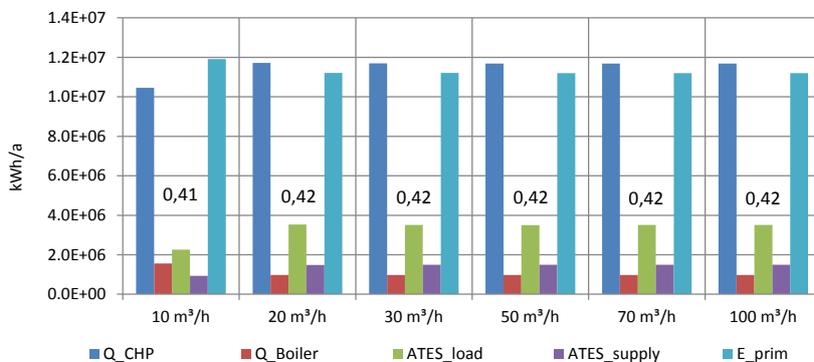
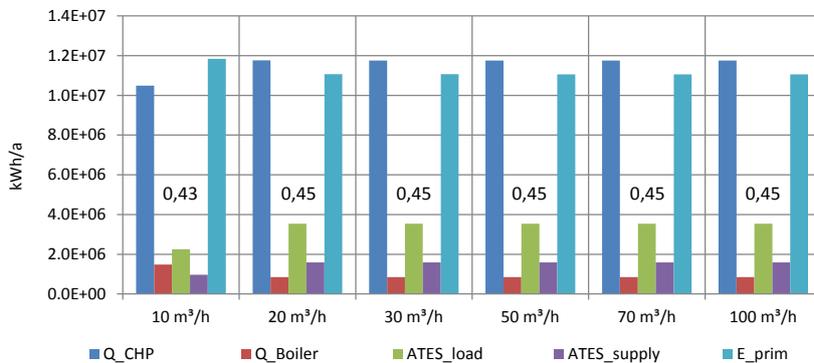


Abbildung 18: Einfluss des maximalen Volumenstroms beim Beladen des Aquiferspeichers (NT-Pufferspeicher: 30 m<sup>3</sup>, oben: HT- Pufferspeicher 100 m<sup>3</sup>; unten: HT- Pufferspeicher 30 m<sup>3</sup>)

## 6.4 Einfluss der Temperaturen im NT-Pufferspeicher auf die Ausspeicherung

Die Ausspeicherung aus dem ATES erfolgt je nach Ausspeichertemperatur, in den HT- und NT-Pufferspeicher oder nur in den NT-Pufferspeicher. Wann ausgespeichert werden kann, hängt von den Temperaturen in den Pufferspeichern ab, welche wiederum durch den Wärmebedarf beeinflusst werden. Hierbei sind zwei Temperaturen von Bedeutung, die Temperatur am Kopf des HT-Pufferspeichers sowie die Temperatur am Boden des NT-Pufferspeichers. Die Temperatur am Boden des NT-Speichers bestimmt, wie gut der Speicherkreislauf beim Ausspeichern ausgekühlt werden kann. Andererseits bestimmt die Temperatur im NT-Pufferspeicher, in welches Netz die Wärme aus dem Aquiferspeicher eingespeist werden kann. Bei niedrigen Temperaturen kann nur in das Neubau-Netz gespeist werden. Sind die Temperaturen höher, kann auch das Campusnetz versorgt werden. Somit ist ein Kompromiss zwischen guter Auskühlung beim Ausspeichern und der Ausspeicherung in beide Netze (NT und HT) zu finden. Die Ergebnisse der Parametervariation sind in Abbildung 19 dargestellt. Es zeigt sich, dass eine Auskühlung des Speicherwassers auf 45-50 °C den geringsten Primärenergiebedarf des Gesamtsystems und den höchsten Rückgewinnungsgrad des Aquiferspeichers zur Folge hat. Bei höheren Sollwerten für die Temperatur am Boden des NT-Speichers ist kein Einfluss mehr zu sehen, da die Rücklauftemperatur des Campusnetzes im Bereich 50-55°C liegt. Wenn der Speicher beim Entladen weiter ausgekühlt wird, d.h.  $T < 45\text{ °C}$ , findet aufgrund der Bedarfsstruktur und der Rücklauftemperaturen in den Netzen seltener ein Ausspeicherbetrieb statt und somit kann weniger thermische Energie aus dem Speicher in die Netze gegeben werden. Dies bewirkt einen kleineren Rückgewinnungsgrad des Aquiferspeichers.

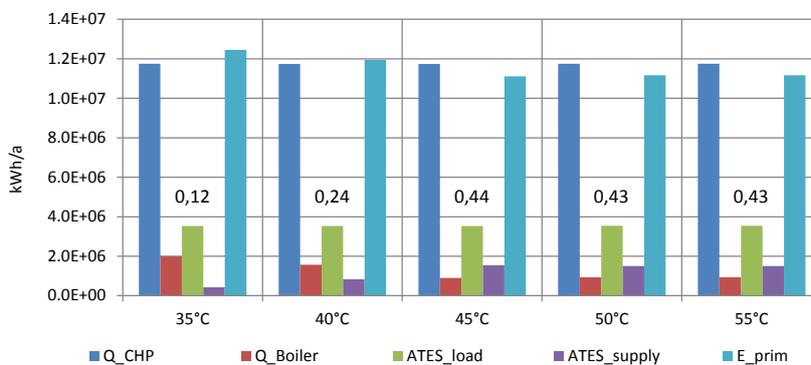


Abbildung 19: Einfluss der zulässigen Auskühlung des Speicherwassers beim Ausspeichern auf den Speicherbetrieb (ATES\_load, ATES\_supply), den Primärenergiebedarf (E\_prim) des Systems und die Wärmebereitstellung durch BHKW (Q\_CHP) und Spitzenlastkessel (Q\_Boiler)

Sobald eine weitere Absenkung der Rücklauftemperatur durch Optimierungsmaßnahmen im Campusnetz erfolgen würde, verschiebt sich auch die optimale Temperatur am Boden des NT-Pufferspeichers hin zu niedrigeren Temperaturen. D.h. die Speichertemperatur für die Anforderung des ATES muss an die Rücklauftemperaturen der Netze (Campus und Bockelsberg) angepasst werden. Da der Aquiferspeicher mit zunehmenden Speicherperioden eine Verbesserung der Speichereffizienz erreicht, kann eine schrittweise Anhebung der maximal möglichen Temperatur am Boden des NT-Speichers, d.h. geringere Auskühlung, zu einem höheren Speicherwirkungsgrad und auch geringerem Primärenergiebedarf führen. Der Grund hierfür besteht darin, dass der Speicher dann vermehrt HT-Wärme bereitstellen kann.

## 6.5 Einfluss der Rücklauf­temperaturabsenkung

Im Rahmen des Projekts wurde von der EPA Aachen die Möglichkeit der Rücklauf­temperaturabsenkung im Netz für das Gebiet Bockelsberg untersucht. Inwiefern eine solche Absenkung Auswirkungen auf den Aquiferspeicher und den damit verbundenen Primärenergiebedarf hat, zeigen die Ergebnisse der Parameterstudie in Abbildung 20. Hierbei wurde eine Rücklauf­temperaturabsenkung von 5, 10, und 15 K untersucht. Zusätzlich wurde bei einer Absenkung im Bockelsbergnetz um 15 K noch eine weitere Absenkung im Campusnetz von 5 K berücksichtigt.

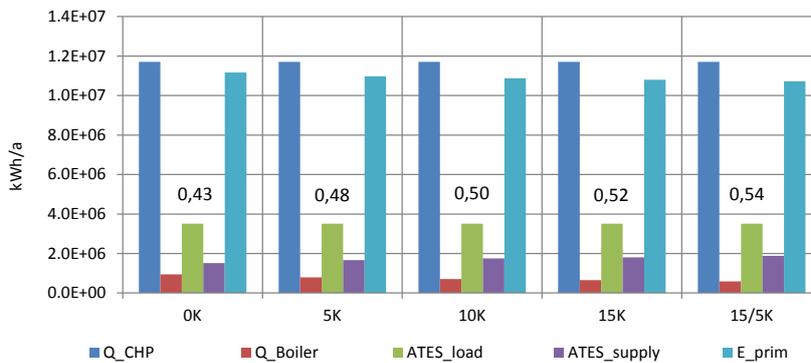


Abbildung 20: Einfluss einer Rücklauf­temperaturabsenkung im Versorgungsnetz des Bockelsberg (Absenkung: 5, 10, 15 K) und zusätzlich im Campusnetz (Absenkung um 5 K)

Die Rücklauf­temperaturabsenkung führt zu einer deutlichen Verbesserung der Speichereffizienz und reduziert somit auch den Primärenergiebedarf. So erhöht sich die Speichereffizienz um 9 Prozentpunkte, wenn eine Absenkung um 15 K erreicht wird. Dies bewirkt eine Reduzierung des Primärenergiebedarfs um ca. 3 %. Verbesserungen bei den Energieanlagen aufgrund der Rücklauf­temperaturabsenkung (Brennwertnutzung) sind hier noch nicht mitberücksichtigt. Gelingt auch eine weitere Absenkung im Campusnetz, dann verbessert sich die Speichereffizienz um 11 Prozentpunkte und der Primärenergiebedarf wird um 4 % reduziert im Vergleich zum Referenzfall. Die Ergebnisse zeigen, dass die technischen Möglichkeiten einer Rücklauf­temperaturabsenkung genauer untersucht und gegebenenfalls auch umgesetzt werden sollten.

## 7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im Rahmen des Projekts "Klimaneutraler Campus Leuphana Universität Lüneburg" wurde auf der Grundlage des bestehenden Energiebedarfs- und Anlagensituation des Campus und des angrenzenden Wohngebietes Bockelsberg das Potenzial für einen saisonalen Aquiferwärmespeicher ermittelt und untersucht, wie eine Einbindung in die bestehenden Strukturen erfolgen kann. Hierbei wurden auch die Auswirkungen geplanter Energieeinsparmaßnahmen beim Wärmebedarf berücksichtigt.

Unter der Annahme der bestehenden BHKW-Anlage und einem stromgeführten Betrieb ergibt sich aufgrund des geringen Elektroenergiebedarfs im Verhältnis zum Wärmebedarf kein saisonales Speicherpotential. Werden die BHKW bei konstanter Nennleistung betrieben und die überschüssige Elektroenergie in das öffentliche Stromnetz eingespeist, ergeben sich potentielle Speicherkapazitäten von 2830 MWh/a (Bestandsbedarf) bzw. 3570 MWh/a (mit reduziertem Wärmebedarf).

Für die Einbindung des Aquiferwärmespeichers in das bestehende System wurden verschiedene Konzepte untersucht. Hierbei hat sich herausgestellt, dass sich eine Einbindung mit zwei

Pufferspeichern an der Schnittstelle zwischen Aquiferspeicher und dem bestehenden Versorgungssystem am besten eignet, da

- eine bestmögliche Auskühlung beim Ausspeichern möglich ist und somit höhere Rückgewinnungsgrade erreicht werden
- eine Reduzierung der maximalen Volumenströme im Speicherkreislauf vom anfänglichen Konzept mit 100 m<sup>3</sup>/h auf 50 m<sup>3</sup>/h beim Ausspeichern und 30 m<sup>3</sup>/h beim Einspeichern möglich ist und somit geringere Investitionen für die Bohrlochkomplettierung nötig sind
- eine einfache Anpassung an geänderte Wärmebedarfssituationen in den einzelnen Netzen durch Anpassung von Regelparametern erreicht wird.
- durch die Pufferspeicher eine zeitliche Entkopplung der stark schwankenden Wärmenachfrage in den Netzen und dem Speicherbetrieb erfolgt und somit ein kontinuierlicher Speicherbetrieb mit geringeren Lastwechseln realisiert werden kann.

Das entwickelte Anlagen- und Speicherkonzept wurde unter der Simulationsumgebung TRNSYS abgebildet und zur Durchführung von Simulationsrechnungen und Parameterstudien genutzt. Somit konnte der Einfluss wichtiger Design- und Betriebsparameter auf den Speicher- und Anlagenbetrieb untersucht und quantifiziert werden, wobei die Zielgröße der Primärenergiebedarf des Versorgungssystems war.

Untersuchte Parameter waren:

- BHKW Nennleistung
- Größe der Pufferspeicher an der Schnittstelle Speicherkreislauf-Wärmenetze
- Volumenströme im Speicherkreislauf
- Reduzierte Rücklauftemperaturen in den Wärmenetzen
- Regelung der notwendigen Auskühlung beim Ausspeichern, was die Aufteilung der ausgespeicherten Wärme in das Hochtemperatur- (HT-) und Niedertemperatur- (NT-) Wärmenetz bestimmt.

Für alle untersuchten Design- und Betriebsparameter konnten Empfehlungen gegeben werden, die für eine spätere Anlagenplanung Richtwerte darstellen. Zusammenfassend lässt sich formulieren, dass die Bedarfsstruktur einen erheblichen Einfluss auf die Effizienz des Gesamtsystems hat und neben einer generellen Bedarfsreduzierung eine Reduzierung der Temperaturen, insbesondere im Campus- und Bockelsbergnetz, den größten Benefit versprechen.



E.ON Energy Research Center

**RWTH**

Klimaneutraler Campus LEUPHANA Universität Lüneburg

## **Abschlussbericht**

Januar 2013



<maps.google.de>

**Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller**  
**Dr.-Ing. Rita Streblow**  
**Dipl.-Ing. Thomas Schild, MBA**

RWTH Aachen University  
E.ON Energieforschungszentrum  
Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik  
Mathieustraße 10  
D-52074 Aachen



## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung .....	1
2	Ansätze .....	1
3	Dynamische Netzsimulation (Modelica) .....	2
4	Schlussfolgerungen.....	3

## 1 Einleitung und Zielsetzung

Die Energieversorgung des Campus der LEUPHANA Universität Lüneburg soll im Rahmen des Forschungsvorhabens „Klimaneutraler Campus“ energetisch und ökologisch optimiert werden. Durch simulationsgestützte Analysen des Gebäudebestandes und des geplanten Neubaus sollen die Anlagen der Energiewandlung, -verteilung und –übergabe dahingehend optimiert werden, dass diese in Ergänzung zu weiteren Projekten der LEUHPANA Universität zu einer klimaneutralen Bilanz für den Standort Lüneburg führen. Neben der rein anlagentechnischen Optimierung soll untersucht werden, inwiefern ein unterirdischer Salzstock als Aquiferspeicher genutzt werden und zu diesem Ziel beitragen kann.

## 2 Ansätze

Zur gesamtenergetischen Optimierung werden verschiedene Instrumente herangezogen:

1. Mittels Energieeinsparcontracting und durch Sensibilisierung der Nutzer für Energie-senken soll der Energiebedarf des Gebäudebestands reduziert werden. Die Abbildung des Verbrauchernetzes dient der Bedarfsermittlung unter Berücksichtigung der im Gebäudebestand geplanten Maßnahmen und des Nutzerverhaltens. Die Gebäudesimulation wird mit dem Simulations-Tool DOE2.E durch die EPA durchgeführt.
2. Das im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entstandene Energiekonzept wird Vertragsgrundlage für einen Energieliefervertrag. Damit sollen die Effizienz der Energiewandlung und deren Emissionswerte und damit die Klimaneutralität sichergestellt werden.

Die Anlagensimulation der zentralen Energietechnik wird mit dem Simulations-Tool DOE2.E durch die EPA durchgeführt. Der Aquiferspeicher wird durch GTZ und GFN simuliert und betrachtet. Die Kopplung der beiden dynamischen Simulationen erfolgt im hydraulischen Netz, welches dazu mit Modelica simuliert werden soll. Bei der Umsetzung dieser Kopplung ist das E.ON EBC unterstützend tätig.

3. Durch konsequente Energieeffizienzmaßnahmen wird der Neubau so optimiert, dass dessen Anlagentechnik exergetisch sinnvoll in die bestehende Technik eingebunden werden kann. Ziel ist die vollständige Kaskadierung der Versorgung mit thermischer Energie, so dass die verfügbaren Systemtemperaturen maximal ausgenutzt werden. Auf diese Weise sollen die Rahmenbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz des Aquiferspeichers geschaffen werden.

### 3 Dynamische Netzsimulation (Modelica)

Die Simulation des hydraulischen Netzes mit Modelica wird bei der Simulation von Quartieren bereits mehrfach untersucht. Das E.ON EBC verfügt daher über eigene Bibliotheken im Bereich der gekoppelten Gebäude- und Anlagensimulation.

Grundsätzlich ist die dynamische Simulation hydraulischer Netze mit Modelica möglich und je nach Einsatzfall sinnvoll. Netze einfacher Struktur wurden bereits erfolgreich dynamisch simuliert und analysiert. Diese Modelle sind jedoch bereits aufgrund der Komplexität, der Anfangswertsuche und der Nicht-Linearität schwer händelbar.

Die dynamische Simulation von komplexeren Netzen mit Maschen, in denen die Fließrichtung nicht fest vorgegeben werden kann, ist derzeit in Verbindung mit anderen Projekten erst noch in der Entwicklung.

Aus diesem Grund sollte eine vereinfachte Bibliothek für das Projekt LEUPHANA entwickelt werden, die auf die Aufgabenstellung im Rahmen eines Energiekonzeptes und der Beurteilung des bestehenden Netzes zugeschnitten ist.

Für die Modellierung wurden seitens EPA folgende Objekte in vereinfachter Form entwickelt:

- Rohrstrecken mit Vorgabe von Einzelwiderständen zur Analyse der Druckverhältnisse im Netz
- T-Stücke zur Analyse der Exergieverluste durch Mischung mehrerer Wärmeströme
- Ideale Wärmetauscher zur Kopplung der Verbrauchernetze mit dem hydraulischen Netz und zur Analyse der minimal erreichbaren Systemtemperaturen (Kopplung Vorgabewert → Massen- und Enthalpiestrom im hydraulischen Kreis)
- Regelventile zur korrekten Abbildung des Gesamtdruckverlustes im Netz
- Pumpen als Energiewandlungseinheit (Strom → mechanische Energie)
- Kessel als Energiewandlungseinheit (Brennstoff → Wärme)

Wesentliche Ergebnisse für das Energiekonzept sind Druckverluste und Strömungsgeschwindigkeiten, sowie der Temperaturverlauf in den Teilstrecken durch Verlust und Verbrauch, sowie durch Mischung an den T-Stücken des Rücklaufs. Insbesondere die Rücklauf-

temperatur am Netzaustrittspunkt des Rücklaufs sollte als Eingangsgröße für die Simulation des Aquiferspeichers durch GFZ/GTN dienen.

Die Erprobung dieser Bibliothek wurde gemeinsam mit EPA vorgenommen. Zunächst wurde ein einzelner Strang im Wärmeverteilnetz nachgebildet. Die Simulation lief stabil, die Ergebnisse waren plausibel.

Bei Zusammenführung zweier Stränge zu einer Masche (Ringleitung) sind jedoch auch bei Verwendung der vereinfachten Bibliothek Instabilitäten und Inkonsistenzen aufgetreten. Aus diesem Grund wurde im Sinne des Projektfortschritts entschieden die dynamische Simulation nicht fortzuführen und die erforderlichen Zwischenergebnisse auf anderem Wege zu erzeugen (statische Betrachtungen, DOE).

## 4 Schlussfolgerungen

Die dynamische Simulation von hydraulischen Netzen mit Modelica bietet zwar die Möglichkeit zur detaillierten Analyse und ermöglicht die Auflösung von instationären Effekten im Wärmeverteilnetz, jedoch ist diese Fragestellung für die vorliegende Aufgabe nicht relevant. Darüber hinaus befindet sich die Entwicklung entsprechender Modelle für vermaschte Netze - wie das der LEUPHANA Universität - noch im Entwicklungsstadium.

Zur energetischen Analyse von Wärmeverteilnetzen genügt eine zeitlich gröbere Auflösung ohne Berücksichtigung von instationären Effekten. Derartige Betrachtungen können mit einfacheren, bereits existierenden und erprobten Simulationsverfahren in ausreichender Genauigkeit mit deutlich geringerem Aufwand und höherer Sicherheit durchgeführt werden.

Von der dynamischen Abbildung des hydraulischen Netzes der LEUPHANA in Modelica wird im Rahmen dieses Projektes Abstand genommen, da sich die hierfür erforderlichen Objekte noch in der Entwicklungsphase befinden und im Rahmen dieses Vorhabens nicht entwickelt werden können.



**LEUPHANA**  
UNIVERSITÄT LÜNEBURG

# UMWELTERKLÄRUNG 2018



## Inhaltsverzeichnis

<b>Im Profil</b>	<b>3</b>
<b>Nachhaltigkeitsleitlinien</b>	<b>5</b>
Wirkungsfelder der nachhaltigen Universität	6
<b>Umweltmanagementsystem</b>	<b>7</b>
Aufbauorganisation	7
Organisatorischer Kontext	8
Interne und externe Stakeholder	8
Chancen und Risiken	12
Betrachtung des Lebenswegs (LCA)	12
Umweltaspekte	13
Umweltvorschriften	13
<b>Umweltleistung</b>	<b>14</b>
Forschung und Lehre	16
Strom	18
Wärme	19
Regenerative Energie	20
Emissionen Strom und Wärme	21
Verkehr	22
Wasser	23
Nachhaltige Beschaffung	24
Abfall	24
<b>Umweltprogramm</b>	<b>26</b>
<b>Kontakt</b>	<b>28</b>
<b>Erklärung der Umweltgutachter</b>	<b>29</b>

## IM PROFIL

Das Leitbild der Leuphana ist das einer humanistischen, nachhaltigen und handlungsorientierten Universität. In den vier Schwerpunkten Kultur, Nachhaltigkeit, Entrepreneurship und Bildung thematisiert die Leuphana Universität Lüneburg in Studium und Forschung die Zukunft gesellschaftlichen Engagements in der Zivilgesellschaft des 21. Jahrhunderts.

### DATEN

- Studierende: 9.900 (Wintersemester 2017/18)
- Beschäftigte: 1.081 (2017)
- Finanzmittel: Landeszuweisung: 57,7 Millionen Euro (2017)  
Dritt- und Sondermittel: 43,2 Millionen Euro (2016)

### FAKULTÄTEN

- Bildung
- Kulturwissenschaften
- Nachhaltigkeit
- Wirtschaftswissenschaften

### STUDIENANGEBOT

- College (Bachelor-Studium)
  - Leuphana Bachelor: 13 Major (Hauptfächer) und 17 Minor (Nebenfächer)
  - Leuphana Lehrerbildung: 3 Bachelor-Studiengänge
- Graduate School (Master- und Promotionsstudium)
  - Sustainability: 2 Major (Hauptfächer): “Global Sustainability Science (M.Sc.)” und “Nachhaltigkeitswissenschaft – Sustainability Science (M.Sc.)”
  - Education: 4 Major (Hauptfächer)
  - Governance & Law: 2 Major (Hauptfächer)
  - Humanities & Social Sciences: 2 Major (Hauptfächer)
  - Management & Entrepreneurship: 6 Major (Hauptfächer)
- Professional School (Berufsbegleitendes Studium und Weiterbildung)
  - 14 Masterprogramme
  - 3 Bachelorstudiengänge
  - 1 Zertifikatsprogramm

## STANDORTE

### Zentralgebäude

Im März 2017 wurde das neue Zentralgebäude am Campus der Leuphana eröffnet. Das Zentralgebäude entspricht dem Anspruch der Leuphana, einen beispielgebend nachhaltigen Campus zu gestalten. Teilweise gehen die am Gebäude realisierten Ideen auf studentische Ideen zurück, die in den Seminaren mit Daniel Libeskind und weiteren Professor\_innen der Leuphana entstanden.

### Nachhaltigkeitsaspekte:

- Durch die gegen die Sonneneinstrahlungsrichtung geneigte, hinterlüftete Fassade wird im Sommer eine Eigenverschattung der Fensterflächen und damit eine passive Kühlung erreicht.
  - Die Fenster der besonders sonnenexponierten Südost- und Südwestfassaden sind zusätzlich mit schaltbarer Verglasung (econtrol) ausgestattet, alle anderen Fenster haben eine Dreischeibenwärmeschutzverglasung erhalten.
  - Die Gebäudeteile sind so ausgerichtet, dass keine der Außenwände direkt nach Süden weist. In Kombination mit der schaltbaren Verglasung konnte daher fast gänzlich auf mechanische Kühlung verzichtet werden.
  - Um den Einsatz von mechanischer Lüftung zu minimieren, lassen sich die Fenster von Hand öffnen. Unterstützt beim effizienten Lüften wird der Nutzer durch CO<sub>2</sub>-Ampeln.
  - Das Gebäude verfügt über ein präsenz- und tageslichtabhängig gesteuertes LED-Beleuchtungssystem.
  - Wärmerückgewinnung und Versorgung aus Niedertemperatur-Abwärme kommen bei der technischen Ausrüstung des Gebäudes zum Einsatz.
  - Die für den Betrieb benötigte Energie wird – wie auf dem gesamten Campus – aus erneuerbaren Quellen bereitgestellt.
  - Die Deckenkonstruktion ist außerordentlich leicht. Statt massiver Stahlbetondecken wurde ein Cobax-Deckensystem verbaut. Strukturierte Luftblasen verringern die Masse von Beton. Dadurch konnten viele Tonnen Beton und Stahl eingespart werden,
  - Regenwasser wird für die Toilettenspülungen eingesetzt, das auf den begrünten Dächern und an der Fassade aufgefangen wird.
- [leuphana.de/zentralgebäude](http://leuphana.de/zentralgebäude)

### Daten zu den Standorten

- Zentraler Campus: 26 Gebäude, 50.525 m<sup>2</sup> Hauptnutzfläche (HNF);  
davon 9.985 m<sup>2</sup> Hauptnutzfläche (HNF) Zentralgebäude
- Rotes Feld: 3 Gebäude, 9.274 m<sup>2</sup> Hauptnutzfläche (HNF)
- Volgershall: 2 Gebäude, 3.729 m<sup>2</sup> Hauptnutzfläche (HNF)

Von den 1.081 Beschäftigten haben am Standort Rotes Feld 57 Beschäftigte und am Standort Volgershall 36 Beschäftigte ihren Arbeitsplatz. In Volgershall werden durch Umzug des Instituts für Produkt- und Prozessinnovation (PPI) in 2018 nur noch 2 Beschäftigte der Leuphana ihren Arbeitsplatz haben. Die Standorte haben zusammen eine Gesamtfläche von 224.885 m<sup>2</sup>, wovon 115.228 m<sup>2</sup> (51 Prozent) bebaut und versiegelt sind.

→ Lagepläne: [leuphana.de/service](http://leuphana.de/service)

# NACHHALTIGKEITSLEITLINIEN

## **Präambel**

Angesichts der Gefahren für die natürlichen Grundlagen des Lebens und wachsender Ungleichheit unter Menschen und Gesellschaften sowie in der Verantwortung, auch zukünftigen Generationen ein selbstbestimmtes Leben zu ermöglichen, weiß sich die Leuphana Universität Lüneburg in Verbindung mit dem Artikel 20a des Grundgesetzes über den Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen dem Grundsatz einer nachhaltigen Entwicklung verpflichtet. Gegenüber ihren Studierenden, künftigen Entscheidungsträgerinnen und -trägern, und ihren Beschäftigten hat die Leuphana Universität Lüneburg die Verantwortung, bei der Erfüllung ihrer Aufgaben wie auch in ihrem täglichen Energie- und Stoffverbrauch eine Vorbildfunktion auszuüben. Die Universität gestaltet ihren Lern- und Lebensraum in diesem Sinne nachhaltig. Die Leuphana Universität Lüneburg bekennt sich zu ihrer Verantwortung gegenüber Region und Gesellschaft und treibt einen regionalen wie auch globalen Nachhaltigkeitsprozess voran. In diesem Sinne sollen Lehre, Forschung und Studium an der Universität friedlichen Zwecken dienen.

## **§ 1 Partizipation, Austausch mit externen Gruppen**

Die Leuphana Universität Lüneburg initiiert und unterstützt Diskurse zur Nachhaltigkeit und fördert eine breite Beteiligung aller ihrer Gruppen und Gliederungen an einem universitären Nachhaltigkeitsprozess. Sie stärkt Eigeninitiativen und Engagement in diesem Prozess und trägt zum regionalen, nationalen und internationalen Austausch mit Gruppen und Institutionen bei.

## **§ 2 Forschung**

Die Leuphana Universität Lüneburg unterstützt mit ihrer wissenschaftlichen Kompetenz den öffentlichen Diskurs über Nachhaltigkeitsfragen und greift regionale, nationale und internationale Themen der Nachhaltigkeit in ihren Forschungsaktivitäten auf. Dabei strebt sie an, weiterhin eine Vorreiterrolle innerhalb des jungen Feldes der Nachhaltigkeits-wissenschaft(en) (Sustainability Science) einzunehmen und dieses Feld aktiv, im Sinne einer problem- und lösungsorientierten Forschung, mitzugestalten.

## **§ 3 Bildung**

Die Leuphana Universität sensibilisiert ihre Studierenden und Beschäftigten für die Herausforderungen einer nachhaltigen Entwicklung, regt formale und informelle Lernprozesse an und ermöglicht ihnen den Erwerb von Gestaltungskompetenzen. Die Universität fördert den internen und externen Wissenstransfer, der den Prozess einer nachhaltigen Entwicklung und den transdisziplinären Austausch vorantreibt.

## **§ 4 Ressourcen, Energie und Emissionen**

Die Leuphana Universität Lüneburg sieht es als ihre Aufgabe an, ihren Stoff- und Energieverbrauch ressourcenschonend, risiko- und umweltbewusst zu gestalten sowie umwelt- und gesundheitsbelastende Auswirkungen zu vermeiden. Die Universität stellt sich insbesondere den Herausforderungen der Klimaneutralität, der nachhaltigen Mobilität sowie einer nachhaltigen Campuserwicklung. Dafür schafft sie entsprechende Rahmenbedingungen, um Handeln über die Mindestanforderungen aller umweltrechtlichen Vorschriften hinaus zu ermöglichen.

### § 5 Kooperationen

Die Leuphana Universität Lüneburg begrüßt und fördert besonders Kooperationen mit Unternehmen und anderen Organisationen, die sich dem Leitbild der Nachhaltigkeit verpflichtet haben. Die Entscheidung für beziehungsweise gegen eine gemeinsame Aktivität mit externen Institutionen erfolgt stets nach bestem Wissen und Gewissen der jeweils verantwortlichen Universitätsmitglieder und orientiert sich an dem Leitbild der Universität.

### § 6 Gesundheitsschutz

Die Leuphana Universität Lüneburg fördert die Gesundheit und das Wohlbefinden ihrer Mitglieder und führt Maßnahmen für gesunde Arbeits- und Studienbedingungen durch. Dies wird insbesondere unterstützt durch den Aufbau und Erhalt einer familienfreundlichen Arbeitskultur sowie durch ausreichende Bewegungs- und Sportangebote im Studien- und Berufsalltag.

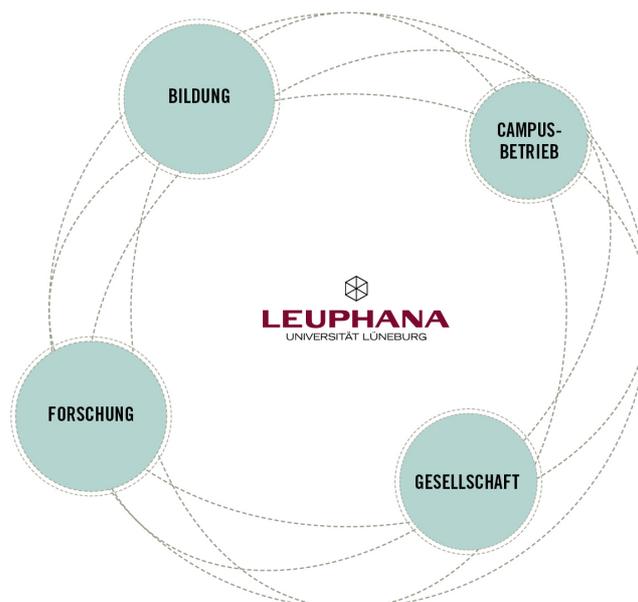
### § 7 Gremien und Einrichtungen

Die Gremien und Einrichtungen der Leuphana Universität Lüneburg unterstützen disziplinäre, interdisziplinäre und transdisziplinäre Initiativen in Forschung, Lehre, Weiterbildung, Verwaltung sowie im studentischen Bereich, Fragen der Nachhaltigkeit aufzugreifen.

### § 8 Programm

Zur kontinuierlichen Verbesserung der Nachhaltigkeits- und Umwelleistung werden im Nachhaltigkeits- und Umweltprogramm der Leuphana Universität Lüneburg sowohl Ziele als auch Maßnahmen festbeziehungsweise fortgeschrieben.

## WIRKUNGSFELDER DER NACHHALTIGEN LEUPHANA



# UMWELTMANAGEMENTSYSTEM

Das Umweltmanagementsystem nach der EG-Öko-Audit-Verordnung ist für die gesamte Universität eingerichtet.

## AUFBAUORGANISATION

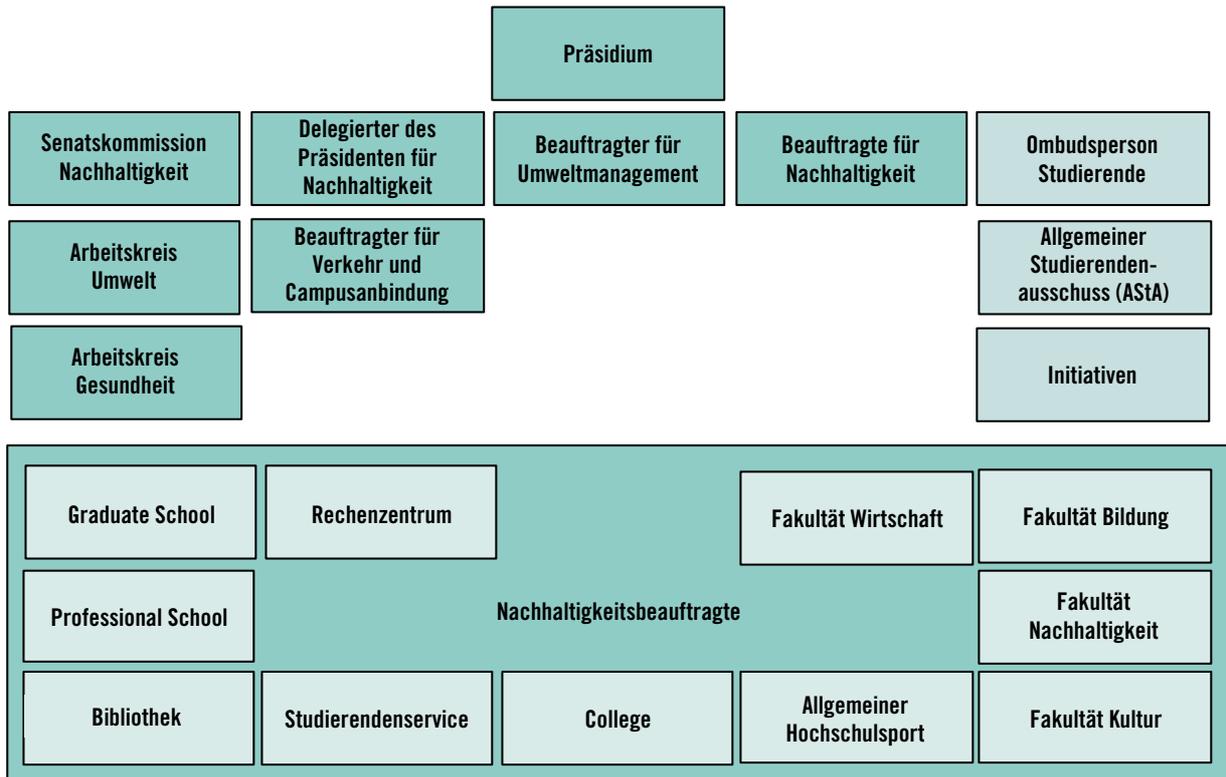


Abb. 1: Organisationsaufbau

- Der **Leiter der Universitätsverwaltung und strategischen Universitätsentwicklung** ist verantwortlich für das Umweltmanagement.
- Der **Delegierte des Präsidenten für Nachhaltigkeit** entwickelt die Wissenschaftsinitiative Nachhaltigkeit weiter und begleitet die integrale Umsetzung des Leitbildes Nachhaltigkeit an der Leuphana.
- Die **Senatskommission Nachhaltigkeit** erarbeitet Entwürfe für die nachhaltige Weiterentwicklung der Leuphana.
- Die **Beauftragte für Nachhaltigkeit** ist als Stabsstelle dem Präsidenten zugeordnet. Sie ist zuständig für die Koordination der operativen Aufgaben im Umweltmanagementsystem, die Beratung der operativ Handelnden sowie die Erarbeitung von Vorschlägen für Umwelthandbuch und Umweltprogramm.
- Der **Beauftragte für Verkehr und Campusanbindung** ist für den Verkehr an der Universität und insbesondere für die Abstimmung mit der Stadt Lüneburg eingesetzt worden.
- Der **Arbeitskreis Umwelt** berät den Verantwortlichen für das Umweltmanagement und diskutiert die Umweltorganisation, das Umwelthandbuch und das Umweltprogramm.
- Die **Nachhaltigkeitsbeauftragten** in den Fakultäten und Einrichtungen stellen den Informationsfluss sowohl aus als auch in die Fakultäten/Einrichtungen sicher und koordinieren die operativen Aufgaben.

## DER ORGANISATORISCHE KONTEXT

Mit der Bestimmung des organisatorischen Kontext wurde ein Verständnis für das Umfeld, der Abhängigkeiten und Spielräume der Leuphana entwickelt und die Relevanz der Themen bestimmt.

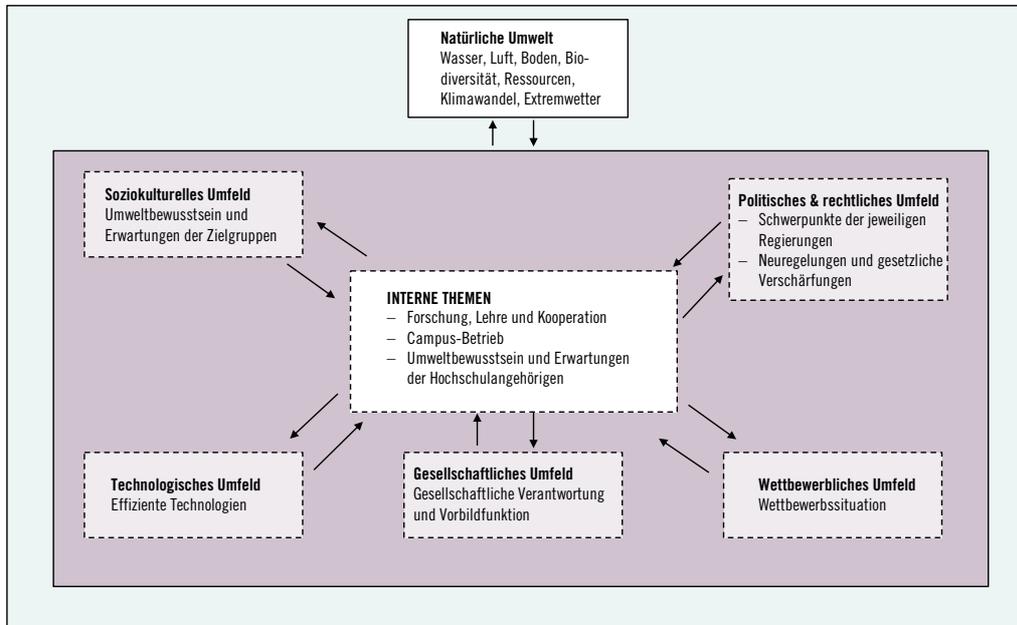


Abb. 2: Bestimmung des organisatorischen Kontext

## STAKEHOLDER

In dem organisatorischen Kontext wurden die internen und externen Stakeholder bestimmt sowie deren Erwartungen und Erfordernisse im Kontext von Umweltbelangen dargelegt. Zudem wurden die Chancen und Risiken mit diesen interessierten Parteien festgestellt.

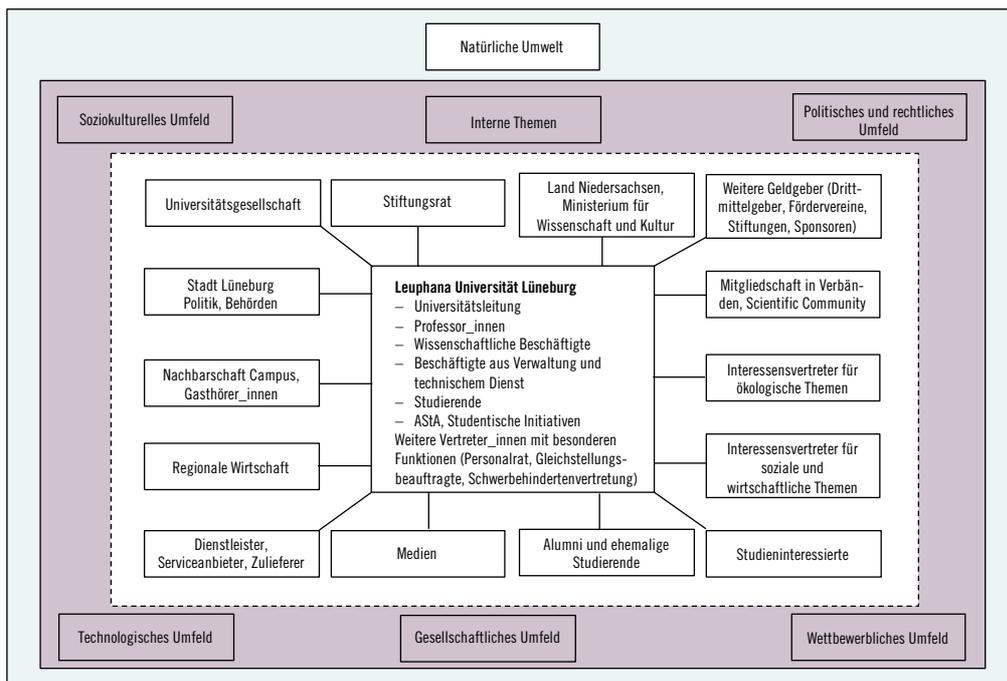


Abb. 3: Interne und externe Stakeholder

Stakeholder	Erwartungen und Erfordernisse	Berücksichtigung (Einrichtungen, Kommunikation, Beispiele)	
Universitätsleitung	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Gelebtes Leitbild</li> <li>— Rechtskonformität (Haftung bei Umweltunfällen)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Beauftragter für Umweltmanagement</li> <li>— Delegierter des Präsidenten für Nachhaltigkeit</li> <li>— Senatskommission Nachhaltigkeit</li> <li>— Beauftragte für Nachhaltigkeit</li> <li>— Beauftragter für Verkehr und Campusanbindung</li> </ul>	
Professor_innen	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Forschung und Lehre zu nachhaltigen Themen</li> <li>— Inter- und transdisziplinäre Forschung</li> <li>— Faire Arbeitsbedingungen</li> <li>— Glaubwürdigkeit</li> <li>— Lebenswelt Universität</li> </ul>	<p>Für alle Statusgruppen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— Personalrat</li> <li>— Senat</li> <li>— Gleichstellungsbeauftragte</li> <li>— Beauftragter für Arbeitssicherheit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Wissenschaftsinitiative Nachhaltigkeit</li> <li>— Fakultät Nachhaltigkeit</li> <li>— Ombudsperson Professor_innen</li> <li>— Akademische Personalentwicklung</li> </ul>
Wissenschaftlich Beschäftigte	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Forschung und Lehre zu nachhaltigen Themen</li> <li>— Inter- und transdisziplinäre Forschung</li> <li>— Faire Arbeitsbedingungen</li> <li>— Glaubwürdigkeit</li> <li>— Lebenswelt Universität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Schwerbehindertenvertreterin</li> <li>— Dienstvereinbarungen (z.B. Telearbeit, Rauchverbot, Gleitzeitvereinbarung)</li> </ul> <p>Partizipation über:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— Senatskommission Nachhaltigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Wissenschaftsinitiative Nachhaltigkeit</li> <li>— Fakultät Nachhaltigkeit</li> <li>— Rat der wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter</li> <li>— Ombudsperson Lehrende</li> <li>— Akademische Personalentwicklung</li> </ul>
Beschäftigte aus Verwaltung und technischem Dienst	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Faire Arbeitsbedingungen</li> <li>— Glaubwürdigkeit</li> <li>— Lebenswelt Universität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Arbeitskreis Gesundheit</li> <li>— Arbeitskreis Umwelt</li> <li>— Nachhaltigkeitsbeauftragte</li> </ul> <p>— Interne Kommunikation zu nachhaltigen Themen (Rundmails, Intranet, Besprechungen)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Personalentwicklung</li> </ul>
Studierende	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Studieninhalte zu nachhaltigen Themen</li> <li>— Forschung und Lehre zu nachhaltigen Themen</li> <li>— Inter- und transdisziplinäre Forschung</li> <li>— Lebenswelt Universität</li> <li>— Gelebtes Leitbild</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Studienprogramme im Bachelor, Master und Promotion</li> <li>— Komplementärstudium</li> <li>— Leuphana Semester</li> </ul> <p>— Interne Kommunikation zu nachhaltigen Themen (Rundmails, myStudy news, Intranet)</p>	<p>Partizipation über:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— Ombudsperson Studierende</li> <li>— Studierendenparlament</li> <li>— Allgemeiner Studierendenausschuss (AstA) und seine Referate</li> <li>— Initiativen</li> <li>— Fachschaften</li> <li>— Beteiligung an Gremien</li> <li>— Projektseminare</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Entrepreneure</li> <li>— Start-Ups</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Gründungsservice</li> <li>— Social Change Hub (SCHUBhub) – Förderung des studentischen Engagements im Sinne des Social Entrepreneurship</li> </ul>	<p>Beispiele Ausgründungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— Melawear (Fairtrade produzierte Textilien)</li> <li>— amomenti (Achtsamkeitskurse)</li> <li>— Onlineshop für Cradle to Cradle zertifizierte Produkte</li> <li>— Apfelsaft leev</li> </ul>

Stakeholder	Erwartungen und Erfordernisse	Berücksichtigung (Einrichtungen, Kommunikation, Beispiele)	
Alumni und ehemalige Studierende	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Gelebtes Leitbild</li> <li>— Informationen zur Weiterentwicklung der Leuphana</li> <li>— Vernetzung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Alumni- und Fördervereine</li> </ul>	Beispiele: <ul style="list-style-type: none"> <li>— Alumni-Netzwerk des Studiengangs MBA Sustainability Management</li> <li>— 23grad – Netzwerk, Umwelt- und Nachhaltigkeitswissenschaften e.V.</li> </ul>
Studieninteressierte	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Studieninhalte zu nachhaltigen Themen</li> <li>— Inter- und transdisziplinäre Lehre</li> <li>— Lebenswelt Universität</li> <li>— Gelebtes Leitbild</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Studienprogramme im Bachelor, Master und Promotion</li> <li>— Komplementärstudium</li> <li>— Leuphana Semester</li> </ul>	
Stiftungsrat	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Gelebtes Leitbild</li> <li>— Rechtskonformität</li> <li>— Transparenz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Berichte im Stiftungsrat</li> </ul>	
Land Niedersachsen/ Ministerium für Wissenschaft und Kultur	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Forschung, Ausbildung von Studierenden im Themenfeld Nachhaltigkeit</li> <li>— Gesellschaftliche Vorbildfunktion</li> <li>— Rechtskonformität</li> <li>— Geldgeber</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Studienprogramme</li> <li>— Wissenschaftsinitiative Nachhaltigkeit</li> <li>— Fakultät Nachhaltigkeit</li> <li>— Zielvereinbarungen, Gesetze</li> <li>— Runderlasse</li> </ul>	
Weitere Geldgeber, (Drittmittelgeber, Fördervereine, Sponsoren u.a.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Forschung im Themenfeld Nachhaltigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Wissenschaftsinitiative Nachhaltigkeit</li> <li>— Fakultät Nachhaltigkeit</li> </ul>	
Mitgliedschaften in Verbänden und nationalen oder internationalen Interessenverbänden (Scientific Communities)	Austausch zu Nachhaltigkeitsforschung und zum Leitbild Nachhaltigkeit.	Die Leuphana ist u.a. Mitglied in folgenden nachhaltigkeitsrelevanten Verbänden: <ul style="list-style-type: none"> <li>— Copernicus Campus „University Network Sustainability“</li> <li>— ISCN - International Sustainable Campus Network</li> <li>— DGNB – Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen</li> <li>— NEPS - Network of Programs in Transformational Sustainability</li> <li>— NaWis - Verbund für Nachhaltige Wissenschaft</li> </ul>	
Stadt Lüneburg Politik, Behörden, Nachhaltigkeitsrat	Ideen und Unterstützung für die nachhaltige Entwicklung der Stadt Lüneburg.	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Fallstudienbüro</li> <li>— Forschungsprojekte</li> <li>— Transdisziplinäre Projektseminare</li> <li>— Projektseminare</li> <li>— Tagungen</li> <li>— Konferenzen</li> <li>— Externe Kommunikation</li> </ul>	Beispiele: <ul style="list-style-type: none"> <li>— Zukunftsstadt 2030+</li> <li>— Klimaneutraler Campus</li> <li>— Energieforum</li> <li>— Konferenzwoche</li> <li>— Flüchtlingsprogramme</li> <li>— KinderUni</li> <li>— Girlsday</li> </ul>

Stakeholder	Erwartungen und Erfordernisse	Berücksichtigung (Einrichtungen, Kommunikation, Beispiele)	
Nachbarschaft des Campus, Gasthörer_innen	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Nutzung der Angebote der Universität</li> <li>— Reduzierung von Lärm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Fallstudienbüro</li> <li>— Forschungsprojekte</li> <li>— Transdisziplinäre Projektseminare</li> <li>— Projektseminare</li> <li>— Stud. Initiativen</li> <li>— Tagungen, Konferenzen</li> <li>— Externe Kommunikation</li> </ul>	Beispiele: <ul style="list-style-type: none"> <li>— Nachhaltiger Wochenmarkt</li> <li>— Arbeitskreis Soziales und Stricken</li> <li>— Konferenzwoche</li> <li>— Angebote zu nachhaltigen Themen im Gasthörer_innenprogramm</li> </ul>
Regionale Wirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Interesse an Absolvent_innen</li> <li>— Kooperation in Forschung und Lehre zu nachhaltigen Themen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Kooperations-Service</li> <li>— Career Service</li> <li>— Fallstudienbüro</li> <li>— Transdisziplinäre Projektseminare</li> </ul>	Beispiele: <ul style="list-style-type: none"> <li>— Nachhaltigkeitsinnovationen im regionalen Mittelstand (NIREM)</li> <li>— Ausbau des regionalen Personaltransfers aus Hochschulen (ARPAH)</li> <li>— Career Messe</li> <li>— Recruiting Dinner</li> </ul>
Dienstleister, Zulieferer, Serviceanbieter z.B. für Büroartikel, IT, Catering, Reinigung, Infrastruktur, Studentenwerk	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Aufträge und Ausschreibungen mit nachhaltigen Kriterien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Nachhaltige Beschaffung</li> <li>— Fallstudienbüro</li> <li>— Transdisziplinäre Projektseminare</li> </ul>	Beispiele: <ul style="list-style-type: none"> <li>— Nachhaltige Büromaterialien</li> <li>— Nachhaltige Energieversorgung</li> </ul>
Interessensvertreter für ökologische Themen (BUND, NABU, Greenpeace u.a.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Transparenz</li> <li>— Einbindung nachhaltiger Themen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Fallstudienbüro</li> <li>— Transdisziplinäre Projektseminare</li> <li>— Einbindung in Veranstaltungen</li> <li>— Studentische Initiativen</li> <li>— Externe Kommunikation</li> </ul>	Beispiele: <ul style="list-style-type: none"> <li>— Konferenzwoche</li> <li>— Cradle to Cradle - Regionalgruppe Lüneburg</li> <li>— Greenpeace Lokalgruppe</li> </ul>
Interessensvertreter für soziale und ökonomische (IHK)	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Transparenz</li> <li>— Einbindung nachhaltiger Themen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Fallstudienbüro</li> <li>— Transdisziplinäre Projektseminare</li> <li>— Einbindung in Veranstaltungen</li> <li>— Studentische Initiativen</li> <li>— Externe Kommunikation</li> </ul>	Beispiele: <ul style="list-style-type: none"> <li>— UNICEF Hochschulgruppe Lüneburg</li> <li>— Amnesty International Hochschulinitiative Lüneburg</li> </ul>
Medien (Zeitungen, Radio, Fernsehen und digitale Medien)	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Transparenz</li> <li>— Öffentlichkeitsarbeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Pressestelle</li> <li>— Universitätskommunikation</li> </ul>	Beispiele: <ul style="list-style-type: none"> <li>— Internet: <a href="http://leuphana.de/nachhaltig">leuphana.de/nachhaltig</a></li> <li>— Umwelterklärung</li> <li>— Nachhaltigkeitsbericht</li> <li>— Pressemitteilungen</li> <li>— Twitter, Facebook</li> </ul>

## CHANCEN UND RISIKEN

Die Chancen und Risiken wurden auf die relevanten Erfordernisse und Erwartungen der Stakeholder bestimmt und wie folgt zusammengefasst:

Chancen	Risiken
Reputation	Rufschädigung
Wettbewerbsvorteil	Umweltschäden
Glaubwürdigkeit	Kostensteigerung
Umweltmanagement als Forschungsgegenstand	Gefährdungen
Lehrimpact	Rechtsverfahren
Gesellschaftliche Wirkung	
Ehrenamtliches Engagement	
Kosteneinsparung	

## BETRACHTUNG DES LEBENSWEGS

Im Rahmen von EMAS sind die Akteure und Lebenswegabschnitte zu betrachten, auf die die Organisation direkt und indirekt Einfluss nehmen kann.

An der Universität sind die Kernaktivitäten Forschung, Lehre und Kooperation. Die Arbeitsplätze der Forscher\_innen, wissenschaftlich Beschäftigten und Beschäftigten aus der Verwaltung, die an diesen Themen arbeiten sind im Sinne der Nachhaltigkeit gestaltet. Dazu wird der Campus-Betrieb kontinuierlich verbessert. Zudem wird an der Leuphana die Lebenswelt Universität unter dem Gesichtspunkt der informellen Umweltbildung gestaltet.

Es erfolgt eine Gesamtsystembetrachtung:

	Umweltaspekte	Beispiel
<b>In</b>	Energie	Regenerative Energien
	Ressourcen	Vermeidung, nachhaltige Beschaffung
	Verkehr	Nachhaltiges Mobilitätskonzept
	Öffentliche Ausschreibungen	Einbindung von Umweltaspekten in die Ausschreibungen
	Dienstleistungen und Lieferanten	Einbindung von Umweltaspekten in die Ausschreibungen
	Wasser	Wasserverbrauch
<b>Betrieb</b>	Ressourcen	Umweltschonende Nutzung, Reparatur, Weiterverwendung und Recycling
	Energie	Effizienz und energiesparendes Verhalten
	Naturschutz	Biotopgarten
<b>Out</b>	Abfall	Verwertung, Beseitigung
	Emissionen	Energie, Verkehr
	Abwasser	Regenwasserspülung
	Lärm	Gärtnerarbeiten

Abb. 4: Gesamtsystembetrachtung

## **UMWELTASPEKTE**

Die Umweltaspekte der Tätigkeiten einer Organisation führen zu Umweltauswirkungen. Führt ein Umweltaspekt zu einer erheblichen Umweltauswirkung, dann ist dieser Aspekt wesentlich und muss in das Umweltmanagementsystem einbezogen werden. Die wesentlichen Umweltauswirkungen wurden bestimmt und bewertet.

Die Kernaktivitäten der Universität Forschung, Lehre sowie Kooperationen sind besonders bedeutsam und von hoher Handlungsrelevanz. Eine Bewertung der Aspekte nach Kriterien des Umweltmanagements ist nicht möglich.

Der Umweltaspekt Verkehr ist derzeit der Umweltaspekt mit dem höchsten Handlungsbedarf. Die Umweltaspekte Abfall, Naturschutz, Wärme und Beschaffung sind von durchschnittlicher Bedeutung.

## **UMWELTVORSCHRIFTEN**

Die Einhaltung aller rechtlichen Vorschriften zum Umweltschutz wurde in § 4 der Nachhaltigkeitsleitlinien als Mindeststandard festgelegt. Verstöße gegen Umweltvorschriften liegen nicht vor.

Die Umweltorganisation, die Umwelterklärungen, die Bewertung der Umweltaspekte sowie Projekte zu den Umweltaspekten können hier eingesehen werden:

→ [leuphana.de/umwelt](https://leuphana.de/umwelt)

## UMWELTLEISTUNG

Insgesamt hat das Umweltaudit 2018 eine Verbesserung der Umweltleistung gemessen an den Nachhaltigkeitsleitlinien der Leuphana Universität Lüneburg gezeigt. Die Wirksamkeit des Umweltmanagementsystems der Universität und die Übereinstimmung mit den Zielen des Umweltprogramms sind als sehr positiv zu bewerten. Die Leuphana möchte ihre Umweltleistung weiterhin kontinuierlich verbessern.

### UMWELTPROGRAMM 2017/18

Die Maßnahmen aus dem Umweltprogramm 2017/18 konnten umgesetzt werden, befinden sich in der Umsetzung beziehungsweise werden umgesetzt.

### FAIRTRADE UNIVERSITY

Die Leuphana wurde am 23.02.2018 erneut als „Fairtrade-University“ ausgezeichnet. Das Gütesiegel wird von TransFair Deutschland e.V. verliehen. Damit übernimmt die Universität ihre soziale Verantwortung und fördert das Bewusstsein für nachhaltigen Konsum. Um das Gütesiegel zu erhalten, muss eine Universität das Thema in die Lehre integrieren, den Hochschulmitgliedern Angebote für fair gehandelte Produkte machen und öffentliche Veranstaltungen anbieten, die für den nachhaltigen Konsum sensibilisieren.



Die Leuphana wurde im Februar 2016 als eine der ersten Universitäten in Deutschland mit dem Titel ausgezeichnet. Die Studierendenschaft, die Verwaltung sowie die Gastronomie auf dem Leuphana Campus setzen sich dabei für ein gemeinsames Ziel ein. Die Mensa und die Cafés bieten schon lange nur noch Fairtrade-Kaffee an. Zudem kann man in den Cafés Schokolade, Tee oder Limonade fair erwerben.

### LEBENSWELT UNIVERSITÄT

Die Universität ist ein Ort, an dem die Studierenden und Beschäftigten viel Zeit verbringen. Alle gemeinsam gestalten und prägen diesen Ort als „Lebenswelt Universität“. So wurde die Leuphana erneut als Fairtrade University ausgezeichnet, es gibt einen nachhaltigen Wochenmarkt, Urban Gardening und Apfelbäume auf dem Campus.

In den letzten zwei Jahren stand die Weiterentwicklung der Lebenswelt Universität mit Beteiligung der internen Stakeholder im Mittelpunkt. Der Prozess wurde von der Senatskommission Nachhaltigkeit initiiert und die Mitglieder der Kommission haben sich maßgeblich an den Seminaren und Workshops in verantwortlicher Position beteiligt.

Dazu wurden mit den Studierenden über zwei Semester in den transdisziplinären Projektseminaren „Nachhaltiger Konsum auf dem Campus“ und „Nachhaltiges Abfallmanagement“ sowie über einen Workshop mit Studierenden des Leuphanasemesters neue Ideen für den Campus-Betrieb entwickelt. Anfang 2018 fand daraufhin mit diesen Ideen das Fachforum „Lebenswelt Universität“ statt. In vier Workshops zu den Themen „Räume der Begegnung“, „Konsum“, „Ideen- und Gedankenförderung“ sowie „Gesundheit“ brachten sich die Beschäftigten und Studierenden ein und gestalteten die Weiterentwicklung der Lebenswelt Universität mit.

## Zwischenraum

Ein erstes Ergebnis dieses Prozesses ist die Etablierung des „Zwischenraums“ an der Leuphana. Der Campus kann ein „Zwischenraum“ für verschiedene Dinge sein: Er ist ein Ort, ein Regal, ein Raum oder die Zeit zwischen verschiedenem Nutzen:

### — Büroartikel

Im Studierendenservice werden viele Hausarbeiten und Unterlagen in Plastikhüllen abgegeben und bei Umzügen bzw. Weggang von Beschäftigten fallen alte Ordner und vieles weitere an. Diese gebrauchten Büromaterialien bekommen über den Zwischenraum ein zweites Leben. Sie können von Studierenden und Beschäftigten mitgenommen werden.

### — Möbel

Gebrauchte Möbel werden an der Universität zunächst so lange wie möglich genutzt und repariert. Nach und nach werden insbesondere die Möbel aus der Erstausrüstung ausgesondert. Diese ausgesonderten Möbel erhalten ein zweites Leben und können von Studierenden und Beschäftigten der Universität umsonst genutzt werden.

### — Bücher

Vor der Bibliothek befindet sich die öffentliche Büchervitrine: Hier kann Literatur weitergereicht oder herausgenommen werden.

### — Honig

Im Biotopgarten der Leuphana hat eine wissenschaftliche Mitarbeiterin ein Bienenvolk stehen, das den Honig für die Leuphana sammelt.



## **FORSCHUNG UND LEHRE**

### **Wissenschaftsinitiative Nachhaltigkeit**

Die Nachhaltigkeitsforschung zählt zu den wichtigsten Handlungsfeldern auf dem Weg zur Entwicklung einer nachhaltigen Zivilgesellschaft im 21. Jahrhundert. Aufgrund der komplexen Wirkungszusammenhänge müssen Lösungen für Nachhaltigkeitsprobleme gemeinsam erarbeitet und umgesetzt werden. Die Nachhaltigkeitsforschung der Wissenschaftsinitiative Nachhaltigkeit, die unter anderem die Erforschung der Ressourcen, der Biosphäre sowie gesellschaftliche Aspekte mit einschließt, setzt dabei auf inter- und transdisziplinäre Forschungsansätze.

### **Lehre**

Alle Studierenden des Leuphana Bachelors beschäftigen sich in ihrem ersten Semester mit Themen der Nachhaltigkeit. Darüber hinaus bietet die Leuphana mit dem Lehrangebot der Wissenschaftsinitiative Nachhaltigkeit alle Phasen innovativer, fortgeschrittener Bildung und führende Weiterbildungsmöglichkeiten. Den Studierenden im Bachelor und Master werden die wissenschaftlichen Fähigkeiten und Grundlagen vermittelt, die notwendig sind, um gestaltungs- und handlungsorientiert bei der Lösung komplexer Probleme mit Umwelt- und Nachhaltigkeitsbezug mitwirken zu können.

### **College (Bachelor-Studium)**

- Major (Hauptfach) Umweltwissenschaften
- Major (Hauptfach) Global Environmental and Sustainability Studies (englischsprachig)
- Minor (Nebenfach) Nachhaltigkeitswissenschaften und Minor (Nebenfach) Raumwissenschaften, die mit jedem Major kombiniert werden können
- Angebote in dem Komplementärstudium

### **Graduate School (Master- und Promotionsstudium)**

- Global Sustainability Science (M.Sc.)
- Nachhaltigkeitswissenschaft – Sustainability Science (M.Sc.)

### **Professional School (Berufsbegleitendes Studium)**

- Masterprogramm Sustainability Management (MBA)
- Masterprogramm Nachhaltigkeitsrecht - Energie, Ressourcen, Umwelt (LL.M.)

Zur Wirkung der Lehre wird an der Leuphana geforscht:

### **The glocal curriculum: A model for transnational collaboration in higher education for sustainable development - Publikation**

Im 21. Jahrhundert steht die Hochschulbildung vor einer Reihe von Herausforderungen: Die Studierenden müssen auf die Komplexität einer hochvernetzten Welt vorbereitet werden, damit sie als verantwortliche Bürger\_innen in einer globalen Gesellschaft als Veränderungsbeauftragte agieren können. Dazu wurde am Institut für Ethik und Transdisziplinäre Nachhaltigkeitsforschung geforscht und ein Handbuch herausgebracht.

Die Mischung aus global und lokal – glocal - charakterisiert den Ansatz für die transnationale Zusammenarbeit und das in dem Buch präsentierte Lehr- und Lernmodell. Das Handbuch stellt ein globales Curriculum vor, das die Bildung in Bereichen, die so vielfältig sind wie die Hochschulbildung für eine nachhaltige Entwicklung, z. B. Globale Gesundheit, Geisteswissenschaften, Philosophie. Im Handbuch

werden Ressourcen und Reflexionen vorgestellt, die das Forschungsteam entwickelt hat, um die Bildung von Veränderungsagenten zu unterstützen, die bereit sind, kritisch und kreativ zu Nachhaltigkeits-transformationen beizutragen.

→ John, B., Caniglia, G., Bellina, L., Lang, D. J. & Laubichler, M. (2017). *The glocal curriculum: a practical guide to teaching and learning in an Interconnected world*. Baden Baden: [sic!] Critical Aesthetics Publishing.

### **Wie Studierende schon während des Studiums wichtige Kompetenzen für Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) erwerben können.**

Am Institut für integrative Studien wurde ein Seminar konzipiert, in dem zukünftige Lehrkräfte bereits in der ersten Phase ihrer Ausbildung die nötigen Kompetenzen entwickeln können, um Bildung für nachhaltige Entwicklung später aktiv in die eigene Unterrichtspraxis einbinden zu können. Grundlage des Seminars bildet das Konzept einer offenen Lernumgebung, der inhaltliche Kontext dafür wird in enger Zusammenarbeit mit erfahrenen schulischen Praktiker\_innen erarbeitet. Im Rahmen dieses Seminars haben die Studierenden die Möglichkeit, sich praxisnah und lösungsorientiert mit nachhaltigkeitsrelevanten Fragestellungen auseinanderzusetzen und so neben der Weiterentwicklung der eigenen Schlüsselkompetenzen auch konkrete nachhaltigkeitsrelevante Projekte umzusetzen und einen Beitrag zu gesellschaftlicher Transformation zu leisten.

→ Bürgener, L., Barth, M. (2018). Sustainability competencies in teacher education: Making teacher education count in everyday school practice. In *Journal of Cleaner Production*, Volume 174, p 821-826.

### **Wie werden Studierende zu Change Agents? Forschungsprojekt zu Nachhaltigkeitslehre an Hochschulen**

In Kooperation mit der Arizona State University in den USA setzen sich Forschende der Leuphana mit der Frage auseinander, wie Hochschulbildung als Motor der Nachhaltigkeitstransformation funktionieren kann. In dem Projekt „Educating Future Change Agents“ wird untersucht, wie die Entwicklung spezifischer Schlüsselkompetenzen auf Seiten der Studierenden am besten unterstützt werden kann. Beide Universitäten haben voll entwickelte Studienprogramme der Nachhaltigkeitswissenschaften (Bachelor, Master, Promotion) und sind bekannt für ihre innovativen Lehr- und Lernmethoden wie transdisziplinäres, problembasiertes, projektbasiertes und lösungsorientiertes Lernen. Daher bietet sich hier die Möglichkeit, künftige Change Agents zu fördern - also Menschen, die gewillt und fähig sind, den gesellschaftlichen Wandel an Schulen, in Unternehmen oder der Politik voranzutreiben.

→ [educatingchangeagents.org](http://educatingchangeagents.org)

### **Studie zum Modul „Wissenschaft trägt Verantwortung“**

An der Leuphana verbringen alle Bachelorstudierenden ihr erstes Semester gemeinsam. Sie besuchen zusammen Veranstaltungen in fünf Modulen, von denen eines das Modul „Wissenschaft trägt Verantwortung“ ist. Studierende setzen sich darin mit den grundlegenden Fragen von Verantwortung, Gerechtigkeit und einer nachhaltigen Entwicklung auseinander.

Am UNESCO-Lehrstuhl der Leuphana wurde untersucht, wie sich das Wissen und das Verständnis von nachhaltiger Entwicklung bei Leuphana-Studierenden im Laufe der Semester ändert und wie sich ihre Werte, Interessen und Einstellungen ändern. Ihre Ergebnisse vergleichen die Forscher\_innen mit Studierenden, die an anderen Hochschulen studieren. Was sich schon als Tendenz erkennen lässt, ist, dass die Lüneburger Studierenden die Komplexität und Unsicherheiten im Bereich der nachhaltigen Entwicklung erkennen. Dies führt auf der einen Seite zu Irritationen über Handlungsmöglichkeiten. Auf der anderen Seite erwerben die Studierenden ein ganzheitliches Bild des Sachgebiets und Skepsis gegenüber dem Begriff wird abgebaut.

→ Veröffentlichung erfolgt Ende 2018: [leuphana.de/unesco-chair.html](http://leuphana.de/unesco-chair.html)

## STROMVERBRAUCH

Der Stromverbrauch ist im Vergleich zu 2016, trotz des zusätzlichen Energiebedarfs durch die Inbetriebnahme des Zentralgebäudes gesunken. Dieses spiegelt die Kennzahl Verbrauch pro Hauptnutzfläche 2017 mit 61,1 kWh/m<sup>2</sup> wider.

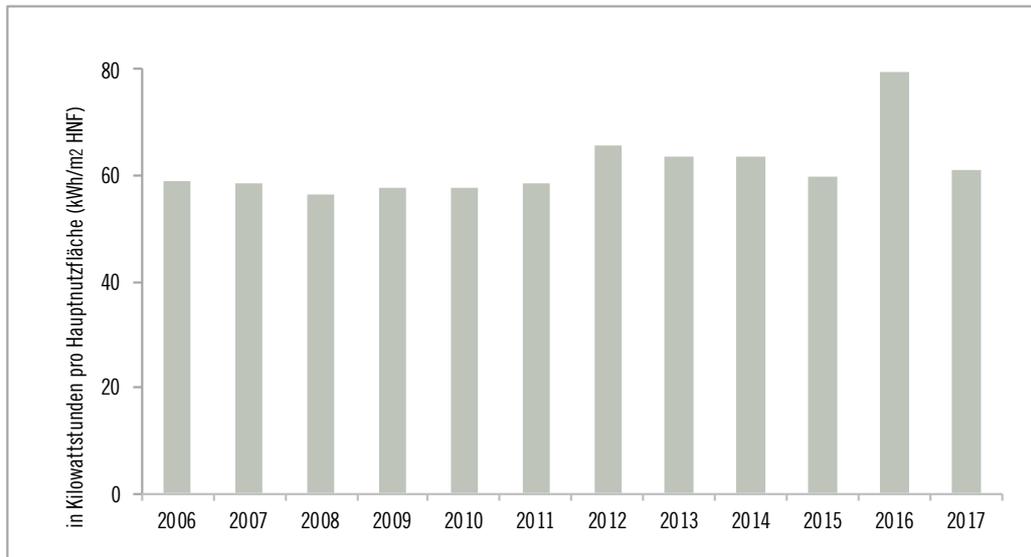


Abb. 5: Stromverbrauch pro Hauptnutzfläche (HNF) in kWh/m<sup>2</sup>

Auf den Dächern am Zentralcampus wurden neun Photovoltaik-Anlagen installiert, deren erzeugter Solarstrom direkt genutzt wird. Damit konnte die Leuphana 2017 insgesamt 13 Prozent ihres Strombedarfs abdecken.

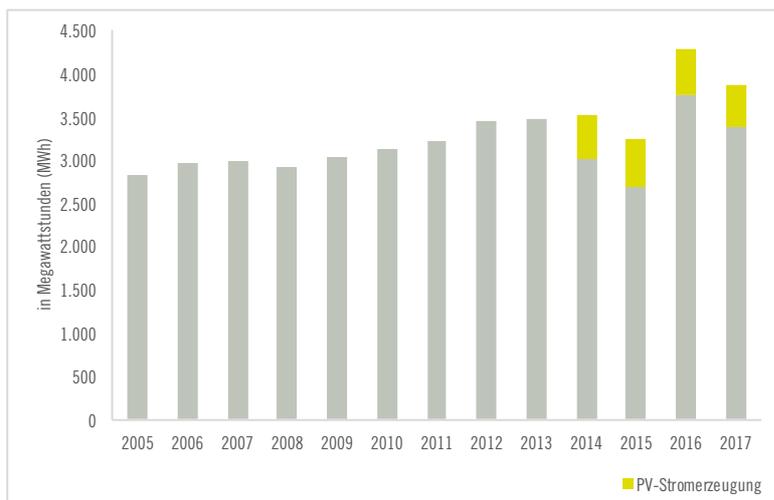


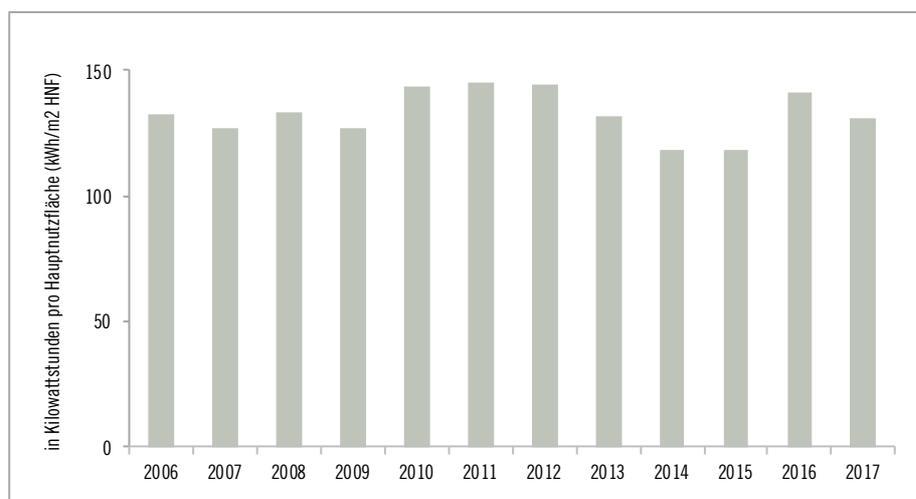
Abb. 6: Stromverbrauch und -erzeugung in Megawattstunden (MWh)

	in MWh	in kWh pro Beschäftigten	in kWh pro m <sup>2</sup> HNF	Anteil reg. Energien in %
2005	2.839	3.476	57,0	
2006	2.978	3.822	58,8	
2007	2.999	3.708	58,7	
2008	2.935	3.370	56,5	
2009	3.028	3.661	57,7	21,0
2010	3.128	3.494	57,5	23,3
2011	3.233	3.160	58,6	22,2
2012	3.464	2.933	65,7	99,8
2013	3.474	2.857	63,7	99,4
2014	3.517	2.909	63,7	99,7
2015	3.256	3.170	60,0	100,0
2016	4.287	4.076	79,5	100,0
2017	3.880	3.590	61,1	100,0

Tab. 1: Stromverbrauch und Kennzahlen

## WÄRMEVERBRAUCH

Der witterungsbereinigte Wärmeverbrauch pro Hauptnutzfläche (HNF) ist im Vergleich zu 2016 - auch mit dem zusätzlichen Energiebedarf durch die Inbetriebnahme des Zentralgebäudes - gesunken. Dieses spiegelt die Kennzahl Verbrauch pro Hauptnutzfläche 2017 mit 132,6 kWh/m<sup>2</sup> wider.

Abb. 7: Wärmeverbrauch (witterungsbereinigt) pro Hauptnutzfläche (HNF) in kWh/m<sup>2</sup>

← Die zur Verfügung gestellte Wärmeenergie ist abhängig von der Außentemperatur. Daher wird der Wärmeverbrauch mit dem Gradtagszahl-Mittelwert von 2008 bis 2017 (GTZ=3626) und der jeweiligen Jahres-GTZ am Standort Lüneburg witterungsbereinigt.

	in MWh	in kWh pro Beschäftigten	in kWh pro m <sup>2</sup> HNF	Anteil reg. Energien in Prozent
2006	6.707	8.610	132,6	
2007	6.464	7.990	126,5	
2008	6.922	7.948	133,2	
2009	6.660	8.053	127,0	
2010	7.803	8.719	143,4	
2011	8.001	7.821	144,9	
2012	7.589	6.426	143,9	
2013	7.162	5.890	131,4	40,8
2014	6.529	5.400	118,3	46,6
2015	6.426	6.257	118,3	57,9
2016	7.620	7.244	141,2	48,9
2017	8.423	7.792	132,6	68,5

Tab. 2: Wärmeverbrauch und Kennzahlen (witterungsbereinigt)

## REGENERATIVE ENERGIE

Die Universität wurde mit 100 Prozent regenerativem Strom versorgt und die Photovoltaikanlagen haben 2017 insgesamt 501.692 Kilowattstunden (kWh) am Campus erzeugt.

Der Zentralcampus wurde 2017 mit 100 Prozent regenerativer Energie für die Wärmeversorgung beliefert. Damit ist der Gesamtanteil an regenerativer Energie für alle drei Standorte auf 69 Prozent gestiegen.

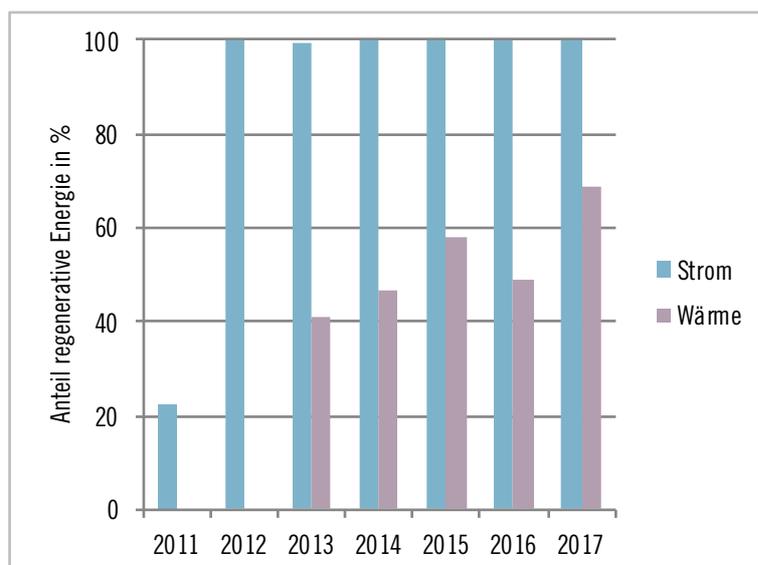


Abb. 8: Anteil regenerativer Energien Strom und Wärme

## EMISSIONEN STROM UND WÄRME

Am Zentralcampus liefert ein Blockheizkraftwerk (BHKW) Wärme mit regenerativer Energie. Die Treibhausgasemissionen als CO<sub>2</sub>-Äquivalent schließen Emissionen der Biomethanproduktion, der zugehörigen Vorketten sowie eine Stromgutschrift durch die Verdrängung von Atom- und Kohlestrom mit ein. Daher entsteht ein negativer CO<sub>2</sub>-Wert für den Wärmeverbrauch am zentralen Campus. Trotzdem hat sich der CO<sub>2</sub>-Wert im Vergleich zu den Vorjahren erhöht (von -165 g/kWh 2016 auf -144 g/kWh 2017), da der Betreiber 2017 für das Blockheizkraftwerk zusätzlich Erdgas eingesetzt hat. Damit ist die negative CO<sub>2</sub>-Emission durch die Wärmeversorgung am Zentralcampus geringer ausgefallen. Dadurch werden die Emissionen der anderen beiden Standorte nicht mehr vollständig kompensiert.

Werden jedoch die externen Effekte durch die im Projekt „Klimaneutraler Campus“ erzielte Umstellung des BHKW auf Biomethan mit berücksichtigt, ergibt sich weiterhin eine deutlich negative Treibhausgasbilanz.

→ Opel, O., Strodel, N., Werner, K.F., Geffken, J., Tribel, A., Ruck, W.K.L (2017). Climate-neutral and sustainable campus Leuphana University of Lueneburg. In Energy - The International Journal, Volume 141, p 2628-2639.

→ [leuphana.de/klimaneutral](http://leuphana.de/klimaneutral)

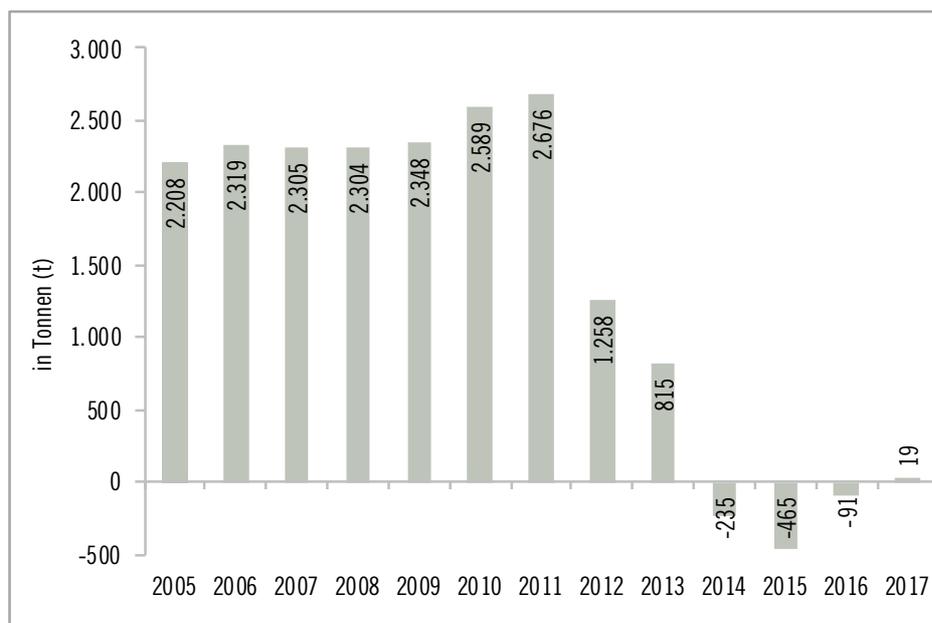


Abb. 9: CO<sub>2</sub>-Ausstoß in Tonnen (t) durch Strom- und Wärmeverbrauch

### Spezifische CO<sub>2</sub>-Emission pro erzeugter Kilowattstunde

Standort	Wärme	Strom
Zentraler Campus, Blockheizkraftwerk	- 144 g/kWh inkl. Stromgutschrift für KWK-Strom	0 g/kWh
Volgershall, Erdgas-Heizung	250 g/kWh	0 g/kWh
Rotes Feld, Öl-Heizung	319 g/kWh	0 g/kWh

Tab. 3: CO<sub>2</sub>-Faktoren Strom und Wärme

	CO <sub>2</sub> pro Beschäftigten (t)
2009	2,84
2010	2,89
2011	2,62
2012	1,07
2013	0,67
2014	- 0,19
2015	- 0,45
2016	- 0,09
2017	0,02

Tab. 4: Kennzahl Tonnen CO<sub>2</sub> pro Beschäftigten durch Energieverbrauch

Die Schwefeldioxid-Emission (SO<sub>2</sub>) entsteht durch die Wärmeerzeugung an den Standorten Volgershall und Rotes Feld:

	SO <sub>2</sub> in kg
2014	344
2015	304
2016	357
2017	360

Tab. 5: Emissionen Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), Wärmeerzeugung aus Erdgas und Öl

## VERKEHR

Für die Förderung der nachhaltigen Mobilität bietet die Leuphana ihren Mitgliedern eine Reihe von Angeboten an:

- zwei Elektrotankstellen für Elektro-Autos und eine für Pedelecs
- Job-Ticket und Semesterticket
- eine Buslinie verbindet den Bahnhof und den zentralen Campus

### Fahrradfreundliche Infrastruktur:

- STADTRad-Stationen an allen Standorten der Leuphana
- Diensträder für die Beschäftigten
- Fahrradständer und Fahrradkeller
- Fahrradradselbsthilfewerkstatt
- frei zugängliche Kompressorpumpe
- „Schöne-Radrouten“-Karte für Wege zur Universität als Broschüre und als App
- Aktionen "Mit dem Rad zur Arbeit"

### Lastenrad

Im Oktober 2017 hat der Arbeitskreis Umwelt ein Lastenrad eingeweiht. Dieses kann von Beschäftigten sowie Studierenden der Leuphana ausgeliehen werden und für Konferenzen, Dienstfahrten und auch private Besorgungen eingesetzt werden.

### Emissionen der Dienstfahrzeuge

Die Fahrzeuge der Universität emittierten folgende Emissionen:

	2014	2015	2016	2017
CO <sub>2</sub> in t	13,4	12,3	9,5	10,9
CO in kg	81,9	74,9	44,0	47,6
Flüchtige Kohlenwasserstoffe in kg	15,4	14,1	9,3	10,9
NO <sub>x</sub> in kg	28,9	26,4	20,7	27,3
Feinstaub in kg	0,7	0,6	0,3	0,3
SO <sub>2</sub> in kg	14,1	11,5	9,0	10,3

Tab. 6: Emissionen der Universitäts-Fahrzeuge

### WASSER

	in m <sup>3</sup>	in m <sup>3</sup> pro Beschäftigten	in m <sup>3</sup> pro m <sup>2</sup> HNF
2005	15.500	18,97	0,31
2006	15.219	19,54	0,30
2007	14.249	17,61	0,28
2008	12.819	14,72	0,25
2009	14.832	17,93	0,28
2010	15.871	17,73	0,29
2011	18.657	18,24	0,34
2012	14.889	12,61	0,28
2013	17.868	14,69	0,33
2014	15.519	12,84	0,28
2015	17.754	17,29	0,33
2016	17.108	16,26	0,32
2017	18.031	16,68	0,28

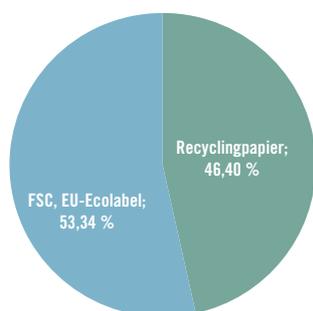
Tab. 7: Wasserverbrauch und Kennzahlen

## NACHHALTIGE BESCHAFFUNG

Anfang 2017 hat die Leuphana ein zentrales Angebot für Büromaterial sowie für Recyclingpapier beziehungsweise FSC-zertifiziertes Papier eingeführt. An der Ausschreibung konnten sich nur Lieferanten beteiligen, die ein Umweltmanagementsystem nach EMAS oder ein vergleichbares System installiert haben.

### Papierverbrauch 2017

Einen großen Anteil an beschafften Büromaterialien an der Universität bildet Papier. Nach Umstellung auf ein zentrales Verfahren gibt es nunmehr eine Papierbilanz.



1.911.750 A4 Blatt:	Recyclingpapier, Blauer Engel
2.208.125 A4 Blatt:	FSC und/oder EU-Ecolabel
10.750 A4 Blatt:	Farbiges Papier, holzfrei, elementarchlorfrei (ECF)

→ 3.811 A4 Blatt pro Beschäftigten 2017

## ABFALL

An der Leuphana werden folgende Fraktionen der Verwertung zugeführt: Altpapier, Elektromüll, „Gelber Sack“, Drucker- und Tonerkartuschen, CDs, DVDs, Handys, gebrauchte Stifte und Briefmarken.

### Qualitative und quantitative Abfallanalyse des Restmülls der Leuphana

Im SoSe 2017 und WiSe 2017/18 fand das inter- und transdisziplinäre Forschungsseminar „Nachhaltige Abfallwirtschaft“ statt, in dem die Studierenden den Restmüll der Leuphana analysierten. Der gesamte Abfall der Leuphana wurde an zwei Tagen auf dem Gelände der Gesellschaft für Abfallwirtschaft (GfA) beprobt, in Fraktionen aufgeteilt und quantitativ erfasst. Im Ergebnis stellte sich eine mögliche Verringerung des Restmülls durch ein besseres Sammeln von Papier, Pappe und „Gelber Sack“ dar. Zu einer Verbesserung der Trennung wurden daher neue Sammelbehälter eingeführt und weitere Maßnahmen in das aktuelle Umweltprogramm aufgenommen.



Neues Trennsystem

### Trennsystem im öffentlichen Raum

Eine sortenreine Trennung des Abfalls im öffentlichen Raum ist sehr schwierig. Daher wurde auf dem C2C-Kongress in 2016 und auf der Konferenzwoche 2017 ein Trennsystem erprobt: Es wurden „Holy Grail“-Inseln aufgestellt, die aus verschiedenen Behältern für die Abfall-Fractionen bestanden und gut beschriftet wurden. Im Ergebnis konnten während der Konferenzen Altpapier und „Gelber Sack“ sehr gut getrennt gesammelt werden. Die meisten Fehlwürfe waren togo-Becher und Taschentücher. Mit diesen Erfahrungen wird ein neues Sammelsystem eingeführt.

### Daten zum Abfall

	Gewerbeabfall [l]	Verpackungen [l]	Bioabfall [l]	Altpapier [t]	Sperrmüll [t]	Chemikalienhaltiger Sonderabfall [kg]	Elektronikschrott [kg]
2005	1.547.760	200.200	58.080	42,9		825	5.940
2006	1.547.760	200.200	64.320	47,0		1.000	0
2007	1.552.760	200.200	64.320	44,2		0	0
2008	1.579.010	200.200	64.320	39,4		820	*
2009	1.591.710	200.200	64.320	45,0		830	*
2010	1.684.660	200.200	43.680	54,2		550	2.695
2011	1.790.260	246.400	43.680	48,8	62,10	818	2.320
2012	1.921.355	400.400	43.680	62,7	36,84	796	0
2013	1.886.580	400.400	43.680	54,5	15,89	554	2.150
2014	1.890.610	444.400	43.680	69,4	13,63	0	5.998
2015	1.888.510	484.000	43.680	66,4	5,52	1.280	3.362
2016	1.879.860	484.000	31.200	37,6	13,61	820	3.378
2017	1.975.830	484.000	36.000	75,1	28,82	1.058	5.014

\* kostenfreie Weitergabe an gemeinnützige Vereinigung, daher keine Mengenangaben.

Gewerbeabfall, Verpackungen und Bioabfall sind bereit gestellte Volumina.

Tab. 8: Abfall

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Gewerbeabfall [l/Beschäftigten]	1.925	1.882	1.750	1.627	1.551	1.564	1.839	1.787	1.828
Verpackungen [l/Beschäftigten]	242	224	241	339	329	368	471	460	448
Bioabfall [l/Beschäftigten]	78	49	43	37	36	36	43	30	33
Altpapier [kg/Beschäftigten]	54	61	48	53	45	57	65	36	69
Sperrmüll [kg/Beschäftigten]			61	31	13	11	5	13	27
Chemikalienhaltiger Sonderabfall [kg/Beschäftigten]	1,00	0,61	0,80	0,67	0,46	0,00	1,25	0,78	0,98
Elektronikschrott [kg/Beschäftigten]	*	3,01	2,27	0	1,77	4,96	3,27	3,21	4,64

\* kostenfreie Weitergabe an gemeinnützige Vereinigung, daher keine Mengenangaben

Tab. 9: Kennzahlen Abfall

## UMWELTPROGRAMM 2018

<b>ÜBERGREIFEND</b>		
Umwelt-Einzelziel: Entwicklung eines nachhaltigen Hochschulsports		
Konzept „Nachhaltiger Hochschulsport“	Allgemeiner Hochschulsport	→ bis 2019
Archivierung und Möglichkeit der Recherche von abgeschlossenen Studienarbeiten zu nachhaltigen Themen.	Fallstudienbüro	→ bis 2020
<b>ENERGIE</b>		
Umwelt-Einzelziel: CO <sub>2</sub> -Einsparung		
Planung: Austausch der Fenster in einem Pilotgebäude (C14) und damit Einsparung von 10% Wärme im Gebäude.	Gebäudemanagement	→ bis 2021
Planung: Dämmung der Geschossdecke in C3.	Gebäudemanagement	→ bis 2021
<b>VERKEHR</b>		
Umwelt-Einzelziel: Autoarmer Campus und Parkraumbewirtschaftung		
Zugang bei Gebäude 10 für PKWs sperren (außer für Lieferverkehr und Rettungswagen).	Gebäudemanagement	→ bis 2019
Entschleunigung der Hauptrouten.	Gebäudemanagement	→ bis 2021
Konzentration auf die drei Einfahrten für PKWs durch Versenkbare Poller.	Gebäudemanagement	→ bis 2021
Entsiegelung von Straßen und Förderung von verkehrsberuhigten Bereichen und Einsatz des Konzeptes „Shared Space“.	Gebäudemanagement	→ bis 2021
Umwelt-Einzelziel: Förderung des Fahrradverkehrs		
Zufahrt zu den Radständern am Zentralgebäude von der Universitätsallee.	Gebäudemanagement	→ bis 2018
Umwelt-Einzelziel: Reduzierung der Emissionen der Dienstfahrzeuge		
Austausch eines Fahrzeuges im Gebäudemanagement durch ein Elektro-Auto.	Gebäudemanagement	→ bis 2019

<b>BESCHAFFUNG</b>		
Umwelt-Einzelziel: Erhöhung des Anteils von Recyclingpapier um 10 Prozent		
Anpassung der zentralen Beschaffung Papier.	Beschaffung	→ bis 2020
Umwelt-Einzelziel: Nachhaltige Reinigung		
Ausschreibung der Reinigung nach nachhaltigen Kriterien.	Gebäudemanagement	→ bis 2019
<b>KONSUM</b>		
Umwelt-Einzelziel: Nachhaltiges Catering		
Konzept für ein „Nachhaltiges Catering“ erstellen.	Beauftragte für Nachhaltigkeit, Dezernat Finanzen, Fakultät Nachhaltigkeit, Veranstaltungsmanagement	→ 2019
<b>ABFALL</b>		
Umwelt-Einzelziel: Reduzierung des Restmülls um 10 Prozent bis 2020		
Evaluierung der Maßnahme „Sammelbehälter für Altpapier und „Gelber Sack“ im Zentralgebäude“ in einem transdisziplinären Projektseminar.	Transdisziplinäres Projektseminar	→ SoSe 2018/19 und WiSe 2019
Sammelbehälter für Altpapier und „Gelber Sack“ in allen Seminarbereichen und im öffentlichen Bereich der Bibliothek bereitstellen.	Gebäudemanagement	→ bis 2019
Kommunikationskampagne zur Vermeidung, Wiederverwertung, Recycling von Abfall.	Beauftragte für Nachhaltigkeit	→ bis 2019
<b>NATUR</b>		
Umwelt-Einzelziel: Erhöhung der Biodiversität		
Umsetzung des Konzeptes „Essbarer Campus“.	Studierendeninitiative, Gebäudemanagement	→ bis 2020
Ökologische Umgestaltung von Pilotflächen zur Erhöhung der Pflanzenvielfalt auf dem Campus.	Institut für Ökologie, Beauftragte für Nachhaltigkeit	→ bis 2021
<b>GESUNDHEIT</b>		
Umwelt-Einzelziel: Förderung der Gesundheit der Beschäftigten und Studierenden		
Weiterentwicklung des Gesundheitsmanagements	AK Gesundheit Personalentwicklung	→ bis 2020

## SPRECHEN SIE MIT UNS

Wir legen großen Wert auf einen Dialog mit der interessierten Öffentlichkeit. Mit unserer Umwelterklärung wollen wir diesen weiter in Gang setzen. Daher freuen wir uns über Ihre Anregungen, Kommentare und Fragen zum Umweltschutz an der Universität und stehen Ihnen gerne zur Verfügung:

Christian Brei

Leiter der Universitätsverwaltung und strategischen Universitätsentwicklung  
christian.brei@leuphana.de

Irmhild Brüggem

Beauftragte für Nachhaltigkeit

Fon 04131.677-1523

Fax 04131.677-1096

irmhild.brueggen@leuphana.de

→ [leuphana.de/nachhaltig](http://leuphana.de/nachhaltig)

### Impressum

Herausgeber: Präsidium, Universitätsallee 1, 21335 Lüneburg, [www.leuphana.de](http://www.leuphana.de)

Redaktion: Dipl.-Umweltwiss. Irmhild Brüggem

## ERKLÄRUNG DER UMWELTGUTACHTER

### Erklärung der Umweltgutachter zu den Begutachtungs- und Validierungstätigkeiten

Das Institut für Umwelttechnik Dr. Kühnemann und Partner GmbH mit der Registrierungsnummer DE-V-0133, vertreten durch Herrn Dr. Burkhard Kühnemann mit der Registrierungsnummer DE-V-0103, zugelassen für die Bereiche 85 „Hochschulen“ sowie 71.2 „Technische, physikalische und chemische Untersuchung“ und Herrn Ulrich Schmidt mit der Registrierungsnummer DE-V-0366, zugelassen für den Bereich 72.2 „Forschung und Entwicklung“, bestätigen begutachtet zu haben, dass die Leuphana Universität Lüneburg, wie in der Umwelterklärung und mit der Registrierungsnummer D-151-0001 angegeben, alle Anforderungen der Verordnung (EG) Nr. 1221/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. November 2009 über die freiwillige Teilnahme von Organisationen an einem Gemeinschaftssystem für Umweltmanagement und Umweltbetriebsprüfung (EMAS), geändert durch Änderungsverordnung (EU) 2017/1505 vom 28.08.2017, erfüllt.

Mit der Unterzeichnung dieser Erklärung wird bestätigt, dass

- die Begutachtung und Validierung in voller Übereinstimmung mit den Anforderungen der Verordnung (EG) Nr. 1221/2009 durchgeführt wurden,
- das Ergebnis der Begutachtung und Validierung bestätigt, dass keine Belege für die Nichteinhaltung der geltenden Umweltvorschriften vorliegen,
- die Daten und Angaben der Umwelterklärung der Organisation ein verlässliches, glaubhaftes und wahrheitsgetreues Bild sämtlicher Tätigkeiten der Organisation innerhalb des in der Umwelterklärung angegebenen Bereichs geben.

Diese Erklärung kann nicht mit einer EMAS-Registrierung gleichgesetzt werden. Die EMAS-Registrierung kann nur durch eine zuständige Stelle gemäß der Verordnung (EG) Nr. 1221/2009 erfolgen. Diese Erklärung darf nicht als eigenständige Grundlage für die Unterrichtung der Öffentlichkeit verwendet werden.

Hannover, den

20.6.2018



Dr. Burkhard Kühnemann  
Umweltgutachter



Ulrich Schmidt  
Umweltgutachter

## Anforderung

## Verbindlichkeit

## Anfordernde Stelle

Der Benutzer hat die Möglichkeit sich per REST-API zu Intellibus verbinden. Dies passiert ausschließlich über HTTPS.

Muss

Die REST-API benutzt das Json Format

Über die REST -API kann sich ein Benutzer von Intellibus authentifizieren. Über OAuth2 wird dies realisiert. Die zugehörige App kann dies als OAuth2 Adapter Nutzen

Ein Benutzer kann abfragen auf welche Sensoren er zugreifen darf

Ein Benutzer kann abfragen auf welche Aktoren er zugreifen darf

Ein Benutzer kann sich zu den unter dem Blatt "Zähler Übersicht" aufgeführten Sensoren und einem Zeitpunkt einen Wert ausgeben lassen

Ein Benutzer kann sich zu den unter dem Blatt "Zähler Übersicht" aufgeführten Sensoren und einem Zeitraum Auflösungen (Min; Max; AVG) ausgeben lassen

Der Benutzer hat die Möglichkeit sich die aktuellen Schaltzustände dervon ihm Schaltbaren Aktoren anzeigen zu lassen

Ein Benutzer kann einen Aktor im definierten Rahmen steuern. Per HTTP-Method POST

Für die App wird ein Nutzer gebraucht der jederzeit die Daten aller Sensoren abfragen kann

Die REST-API muss dafür ausgelegt sein das alle Werte einmal pro Minute abgefragt werden

Eine ausführliche Dokumentation zur Benutzung der REST-API wird zur Verfügung gestellt

Die REST-API wird über einen Jumphost aus dem Leuphana-Intranet erreichbar gemacht

**Anforderung**

Für die App wird ein Nutzer gebraucht der jederzeit die Daten aller Sensoren abfragen kann

Es wird ein Datenspeicher gebraucht um die Daten aller Sensoren/ Zustände aller Aktoren mit dem oben genannten Nutzer zu speichern (empfohlen wird Zur Nutzerauthentifizierung wird das OAuth2 auf intellibus genutzt

Es muss ein Prozess erstellt werden (cronjob) der eventuell einmal pro Minute aber aus Performance Gründen in längeren Zeitabständen alle Sensor- und Das Backend soll die selbe Spezifikation der REST-API vom Intellibus erfüllen. Lesezugriffe werden preferiert aus dem Datenspeicher beantwortet, die

**Verbindlichkeit****Anfordernde Stelle**

Zugriff/ Verbindung	Anforderung	Verbindlichkeit	Anfordernde Stelle
	<p>Die Umsetzung der App erfolgt in HTML5 Methoden neueste Browser (Safari, Chrome) sollen zufriedenstellend laufen  Eine weitere Überführung in Android und IOS App-Systeme ist einzuplanen  Der Benutzer kann sich über die OAuth2 Schnittstelle von Intellibus /bzw. dem Backend authentifizieren</p>		
Optionen/Steuerung	<p>Ein Benutzer kann abfragen auf welche Sensoren er zugreifen darf  Ein Benutzer kann abfragen auf welche Aktoren er zugreifen darf  Ein Benutzer kann sich zu den unter dem Blatt "Zähler Übersicht" aufgeführten Sensoren und einem Zeitpunkt einen Wert ausgeben lassen  Ein Benutzer kann sich zu den unter dem Blatt "Zähler Übersicht" aufgeführten Sensoren und einem Zeitraum Auflösungen (Min; Max; AVG) ausgeben lassen  Der Benutzer hat die Möglichkeit sich die aktuellen Schaltzustände davon ihm Schaltbaren Aktoren anzeigen zu lassen</p> <p>Ein Benutzer kann einen Aktor im definierten Rahmen steuern.  Akkumulierte Daten können in Tabellen, in Graphen oder in Tortendiagrammen abgerufen werden  Es ist dem Benutzer möglich seine Nutzungszeiten über die App (Kalenderfunktion) festzulegen (Raumtemperatur auf aktiviert)</p>		

## Ansicht/ Graphisches Design

Der Benutzer betritt die Oberfläche über ein virtuelles Büro, welches eine Skizzierung der realen Gegebenheit abbildet (bezieht sich auf die Anordnung und die symbolische Darstellung von Aktoren, Sensoren, Tisch, Fenster, Tür)  
Der Benutzer kann eine Übersicht der aktuellen Werte der für ihn sichtbaren Sensoren sehen  
Der Verlauf der econtrolschaltung über den Tag, die zugehörige Raumtemperatur und die Lichtstärke der zugehörigen Fassade können in einer Graphik dargestellt werden

Der aktuelle Abdunkelungsfaktor der econtrol-Fassadensteuerung wird in einer fünfstufigen Skala dargestellt  
Der Energieverbrauch wird in der Startansicht relativ als grün oder rot eingefärbte Säule zu Y angezeigt. Y ist hierbei eine vom Administrator bestimmbare Variable (Eigener Durchschnittswert der Vorherigen Woche, geringster Vergleichbarer Wert- Die Referenzoptionen sind mit dem AG abzustimmen.

Die Energieeinsparungen können anonymisiert verglichen werden.

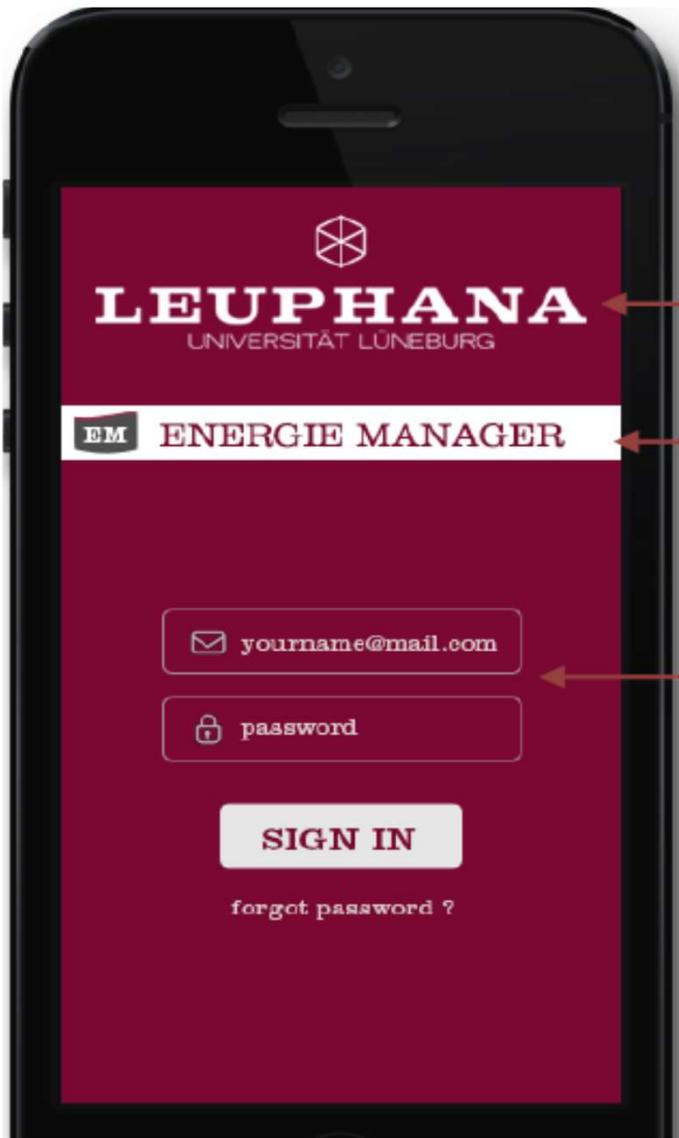
Der historische Energieverbrauch kann mit anderen Büros verglichen werden (Best;AVG)

Die Energieeinsparungen können relativ verglichen werden.  
Das UI wird anhand von Skizzen realisiert und mit ausgewählten Themes dargestellt.

Eine sehr ausführliche Dokumentation zur Benutzung der App wird zur Verfügung gestellt

Details zur detaillierten graphischen Gestaltung, sowie zur Sensorauswertung und Aufbereitung werden in Abstimmung zwischen AG und AN entsprechend der AG Wünsche und technischer Möglichkeiten geplant und sind entsprechend vom AN einzuplanen.

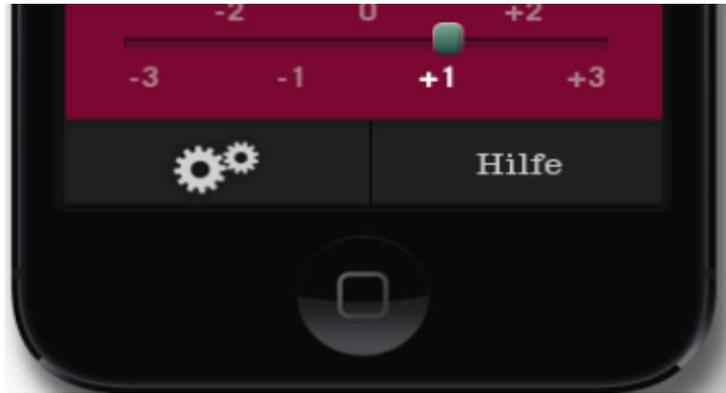
Beispiel Login



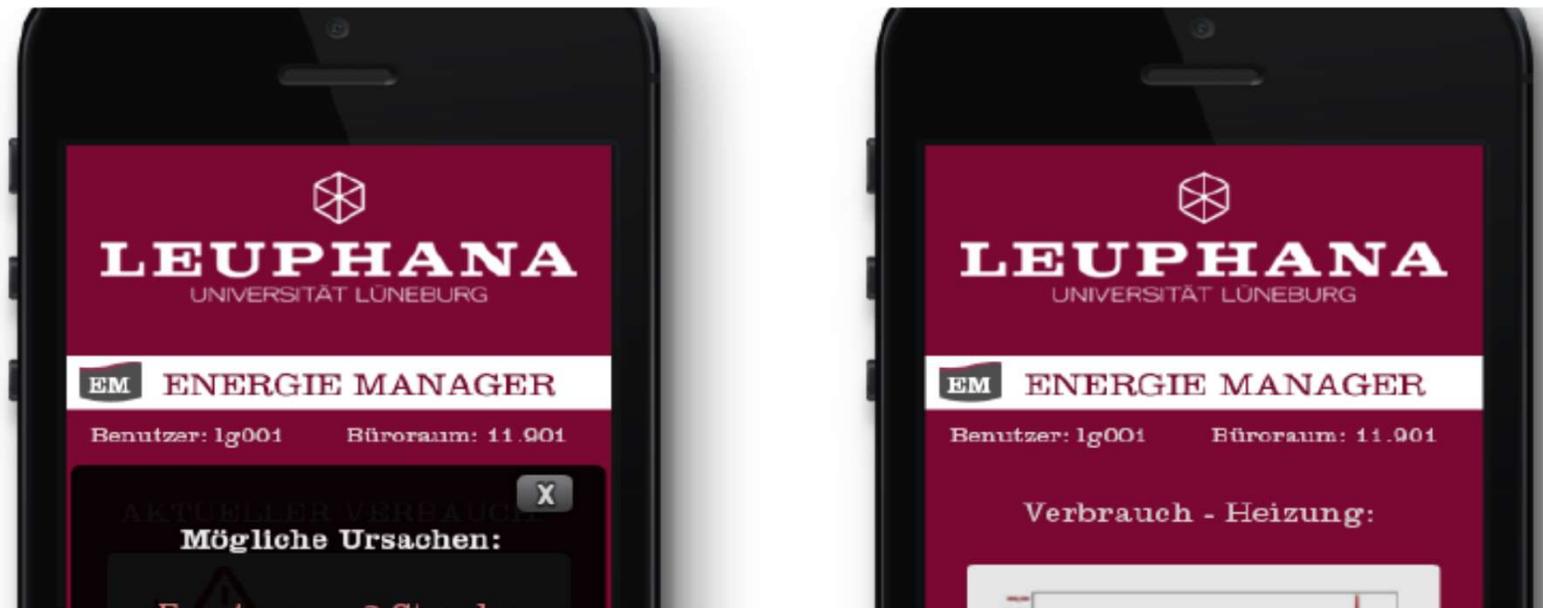


Beispiel Raumtemperatursteuerung:





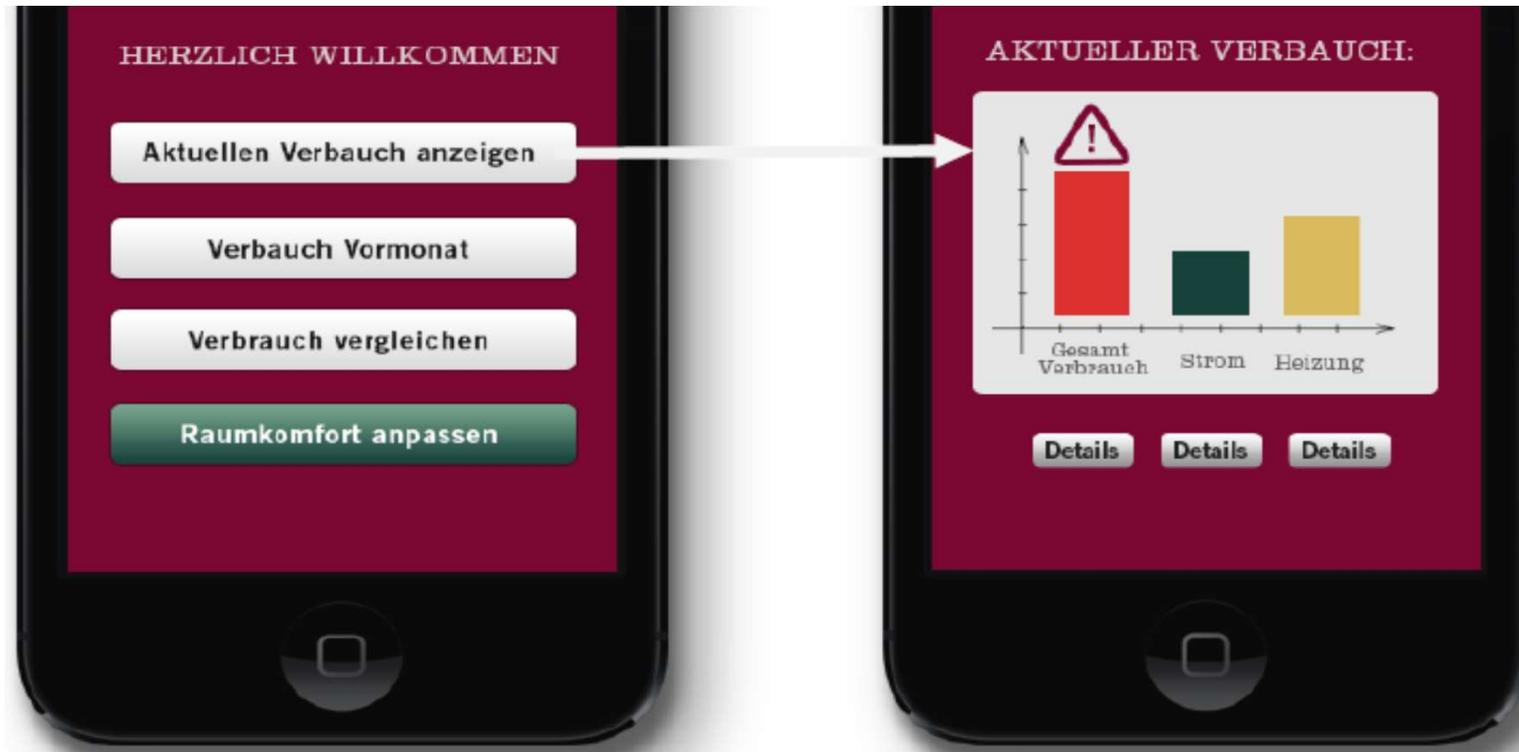
Beispiel Feedback zu gesteigertem Verbrauch





Beispiel aktuelle Verbrauchsanzeige:





## 5.11 R.C40.338 GAUV 62-11

Im folgenden Kapitel werden die Bediendialoge der Seite R.C40.338 GAUV 62-11 aufgeführt.

### 5.11.1 12.1 R.C40.338 GAUV 62-11 Steuerung



5.11.2 12.2 GAUV 62-11 Wochenuhr

▼ Bediendialoge

▼ R.C40.338 GAUV 62-11

▼ 12.2 GAUV 62-11 Wochenuhr

📁 Montag  
06:00:00 = |  
21:00:00 = O

📁 Dienstag  
06:00:00 = |  
21:00:00 = O

📁 Mittwoch  
06:00:00 = |  
21:00:00 = O

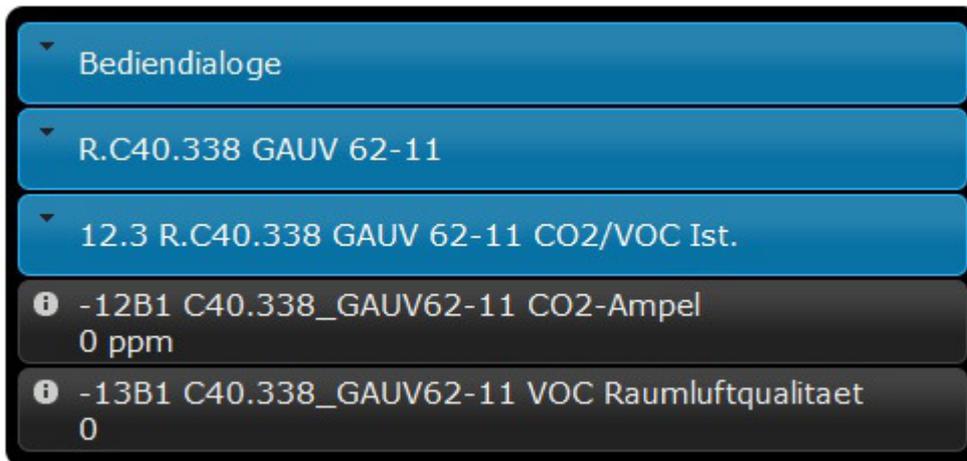
📁 Donnerstag  
06:00:00 = |  
21:00:00 = O

📁 Freitag  
06:00:00 = |  
21:00:00 = O

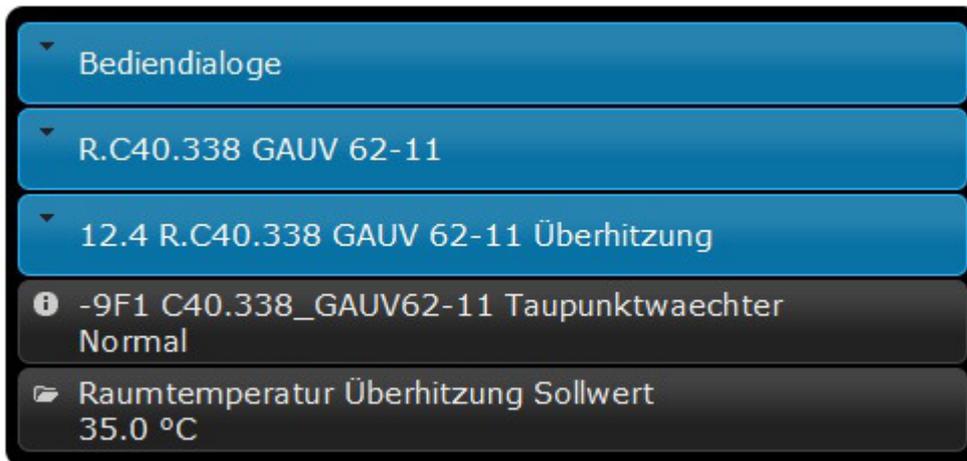
📁 Samstag

📁 Sonntag

5.11.3 12.3 R.C40.338 GAUV 62-11 CO2/VOC Ist.



5.11.4 12.4 R.C40.338 GAUV 62-11 Überhitzung



5.11.5 12.7 R.C40.338 GAUV 62-11 Soll Kühlen



The screenshot displays a hierarchical menu structure for temperature control. The top level is 'Bediendialoge', which is expanded to show 'R.C40.338 GAUV 62-11'. This is further expanded to '12.7 R.C40.338 GAUV 62-11 Soll Kühlen'. Below this, there are several settings:

- Sollwertsteller Raumtemperaturkorrektur**: 0.0 K
- Raumtemperatur Tagbetrieb Sollwert Kühlen**: 23.0 °C
- Raumtemperatur Abwesenheit Sollwert Kühlen**: 25.0 °C
- Raumtemperatur Nachtbetrieb Sollwert Kühlen**: 30.0 °C

5.11.6 12.9 R.C40.338 GAUV 62-11 Ist Kühlen

- ▼ Bediendialoge
- ▼ R.C40.338 GAUV 62-11
- ▼ 12.9 R.C40.338 GAUV 62-11 Ist Kühlen
- ❶ Raumtemperatur errechnet für Kühlen  
0.0 °C
- ❶ Raumtemperatur C40.338 GAUV 62-11  
0.0 °C
- ❶ Ausgang Kühlventil  
0.0 %
- ❶ -8M1 C40.338\_GAUV62-11 Kuehldecke Ventilantrieb  
VK46  
0.0 %

5.11.7 12.13 R.C40.338 GAUV 62-11 Sommerkomp.

- ▼ Bediendialoge
- ▼ R.C40.338 GAUV 62-11
- ▼ 12.13 R.C40.338 GAUV 62-11 Sommerkomp.
- ❗ Aussentemperatur  
0.0 °C
- ❗ errechnete Sommerkompensation  
0.0 K
- 📁 Sommerkompensation von Aussentemperatur Sollwert  
26.0 °C
- 📁 Sommerkompensation bis Aussentemperatur Sollwert  
32.0 °C
- 📁 Sommerkompensation Temperaturschiebung um Sollwert  
2.0 K
- 📁 Sommerkompensation der Raumtemperatur Freigabe  
Ja

5.11.8 12.14 R.C40.338 GAUV 62-11 LVB Ventil K



## **5.12 R.C40.338 GAUV 62-11**

Im folgenden Kapitel werden die Bediendialoge der Seite R.C40.338 GAUV 62-11 aufgeführt.

### **5.12.1 13.1 R.C40.338 GAUV 62-11 Präsenz.M**



### 5.13 R.C40.338 GAUV 62-11

Im folgenden Kapitel werden die Bediendialoge der Seite R.C40.338 GAUV 62-11 aufgeführt.

#### 5.13.1 14.1 R.C40.338 GAUV 62-11 VR Status



5.13.2 14.2 R.C40.338 GAUV 62-11 Soll CO2

- ▼ Bediendialoge
- ▼ R.C40.338 GAUV 62-11
- ▼ 14.2 R.C40.338 GAUV 62-11 Soll CO2
- ❗ -12B1 C40.338\_GAUV62-11 CO2-Ampel  
0 ppm
- 📁 Volumenstromregelung Start ab Vmin wenn CO2 >  
Sollwert  
800 ppm
- 📁 Volumenstromregler Vmax CO2 > Sollwert  
1000 ppm

5.13.3 14.3 R.C40.338 GAUV 62-11 VR Zul.Soll

- ▼ Bediendialoge
- ▼ R.C40.338 GAUV 62-11
- ▼ 14.3 R.C40.338 GAUV 62-11 VR Zul.Soll
- ❗ errechneter Zuluft Volumenstrom VR007-ZU4  
0 m<sup>3</sup>/h
- ❗ -10M1 C40.338\_GAUV62-11 VR007-ZU4-C40.338  
0 m<sup>3</sup>/h
- 📁 Zuluft Volumenstrom min Sollwert VR007-ZU4  
200 m<sup>3</sup>/h
- 📁 Zuluft Volumenstrom max Sollwert VR007-ZU4  
348 m<sup>3</sup>/h

5.13.4 14.4 R.C40.338 GAUV 62-11 VR Abl.Soll

- ▼ Bediendialoge
- ▼ R.C40.338 GAUV 62-11
- ▼ 14.4 R.C40.338 GAUV 62-11 VR Abl.Soll
- ❗ errechneter Abluft Volumenstrom VR008-AB4  
0 m3/h
- ❗ -11M1 C40.338\_GAUV62-11 VR008-AB4-C40.338  
0 m3/h
- 📁 Abluft Volumenstrom min Sollwert VR008-AB4  
125 m3/h
- 📁 Abluft Volumenstrom max Sollwert VR008-AB4  
348 m3/h

5.13.5 14.5 R.C40.338 GAUV 62-11 VR007-ZU4

- ▼ Bediendialoge
- ▼ R.C40.338 GAUV 62-11
- ▼ 14.5 R.C40.338 GAUV 62-11 VR007-ZU4
- ❗ Ausgang Volumenstrom VR007-ZU4  
0 m3/h
- ❗ -10M1 C40.338\_GAUV62-11 VR007-ZU4-C40.338  
0 m3/h
- ❗ LVB-10M1 C40.338\_GAUV62-11 VR007-ZU4-C40.338  
Auto
- 📁 Handwert Volumenstromregler 100%=Nenn  
Volumenstrom VR007-ZU4  
0 %
- 📁 Steuerung Volumenstromregler VR007-ZU4  
Auto

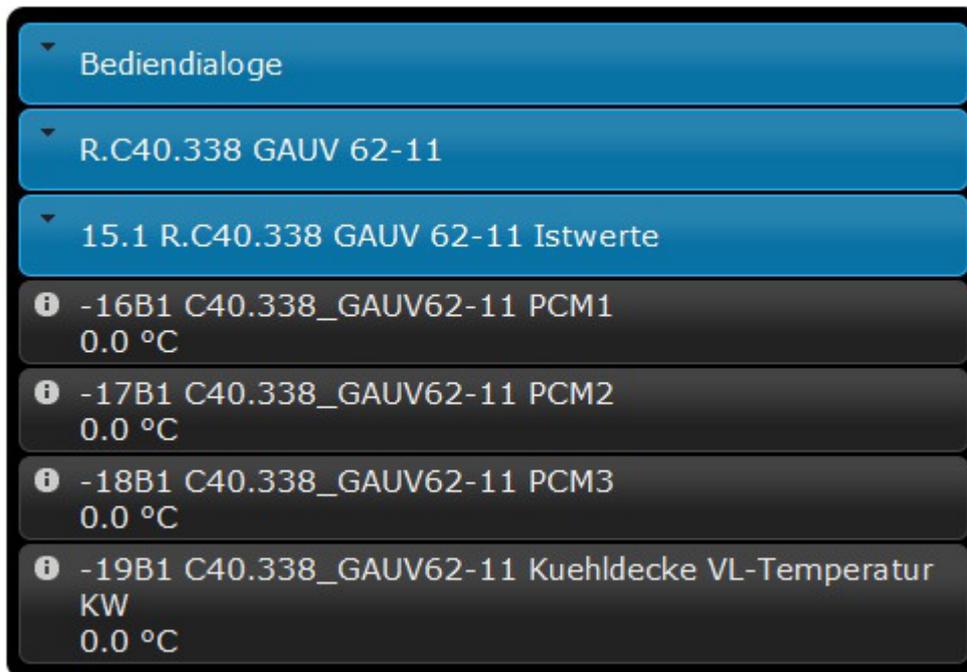
5.13.6 14.7 R.C40.338 GAUV 62-11 VR008-AB4

- ▼ Bediendialoge
- ▼ R.C40.338 GAUV 62-11
- ▼ 14.7 R.C40.338 GAUV 62-11 VR008-AB4
- ❗ Ausgang Volumenstrom VR008-AB4  
0 m3/h
- ❗ -11M1 C40.338\_GAUV62-11 VR008-AB4-C40.338  
0 m3/h
- ❗ LVB-11M1 C40.338\_GAUV62-11 VR008-AB4-C40.338  
Auto
- 📁 Handwert Volumenstromregler 100%=Nenn  
Volumenstrom VR008-AB4  
0 %
- 📁 Steuerung Volumenstromregler VR008-AB4  
Auto

## 5.14 R.C40.338 GAUV 62-11

Im folgenden Kapitel werden die Bediendialoge der Seite R.C40.338 GAUV 62-11 aufgeführt.

### 5.14.1 15.1 R.C40.338 GAUV 62-11 Istwerte



5.14.2 15.2 R.C40.338 GAUV 62-11 Istwerte



## 5.15 R.C40.338 GAUV 62-11

Im folgenden Kapitel werden die Bediendialoge der Seite R.C40.338 GAUV 62-11 aufgeführt.

### 5.15.1 16.1 R.C40.338 GAUV 62-11 Status

