

EQM:Hydraulik – Energie- und Qualitätsmanagement gegen Korrosion und Belagbildung in hydraulischen Systemen

Projektbericht 2019



Zuwendungsempfängerin: Leuphana Universität Lüneburg
Förderkennzeichen: 03ET1270A/B
Vorhabenbezeichnung: EQM:Hydraulik – Energie- und Qualitätsmanagement gegen
Korrosion und Belagbildung in hydraulischen Systemen

Laufzeit des Vorhabens: 1.1.2015 – 30.11.2018
Berichtszeitraum: 1.1.2015 – 30.11.2018

Das Forschungsprojekt wird gefördert
durch die Forschungsinitiative EnOB
des Bundesministeriums für Wirt-
schaft und Energie. Förderkennzei-
chen 03ET1270A und 03ET1270B



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



EnOB

Forschung für
Energieoptimiertes Bauen

Autorenschaft

Prof. Dr. Oliver Opel (Leuphana Universität Lüneburg / FH Westküste)

Dipl.-Ing. Mani Zargari (SIZ energie+)

BSc. Marlies Wiegand (FH Westküste)

BSc. Karsten Neumann (FH Westküste)

Dipl.-Ing. Markus Peter (Institut für Gebäude- und Solartechnik, TU Braunschweig)

Steinbeis Innovationszentrum energie+

Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Norbert Fisch

Anschrift: Mühlenpfordtstraße 23

38106 Braunschweig

Fon: +49 531 3913555

Fax: +49 531 3918125

E-Mail: info@siz-energie-plus.de

Leuphana Universität Lüneburg

Fakultät Nachhaltigkeit

Anschrift: Scharnhorststraße 1 C40.313

21335 Lüneburg

Email: opel@leuphana.de

Fon: 04131 677-2952

Fax: 04131 677-2822

FH Westküste

Fachbereich Technik

Anschrift: Fritz-Thiedemann-Ring 20

25746 Heide

Phone: +49 481 8555-375

Fax: +49 481 8555-301

Email: opel@fh-westkueste.de



Inhaltsverzeichnis

1.	Kurzdarstellung.....	1
1.1	Aufgabenstellung	1
1.1.1	Ziele	1
1.1.2	Gesamtziel des Vorhabens	2
1.1.3	Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen (BMWi)	3
1.2	Voraussetzung, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
1.2.1	Arbeitsteilung im Konsortium.....	4
1.2.2	Vorarbeiten / Expertise	4
1.2.3	Verwertung.....	6
1.2.4	Planung und Ablauf des Vorhabens	7
1.2.5	Allgemeine Planung	7
1.2.6	Beschreibung der Arbeitspakete	8
1.2.7	Ablauf.....	12
1.3	Technischer und wissenschaftlicher Stand	12
1.3.1	Technischer Stand	12
1.3.2	Wissenschaftlicher Stand	26
1.3.3	Verwendete Fachliteratur und Vorarbeiten	29
1.4	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	29
2.	Eingehende Darstellung / Bericht.....	30
2.1	Zusammenfassung.....	30
2.1.1	Wesentliche wissenschaftlich-technische Erkenntnisse.....	30
2.2	AP1: Betreiberbefragung	33
2.2.1	Zielsetzung.....	33
2.2.2	Konzeption und Durchführung.....	33
2.2.3	Auswertung	34

2.3	AP2: Feldanalyse	37
2.3.1	Gebäudeauswahl und Probenahmen	37
2.3.2	Methodik	39
2.3.3	Allgemeine Ergebnisse.....	40
2.3.4	Analyse des Anlagenzustands und der –historie	45
2.3.5	Fallanalysen.....	46
2.3.6	Mikrobiologie.....	57
2.3.7	Korrosionssensor	58
2.4	AP3: Schadens- und Potentialanalyse	60
2.4.1	Literaturstudie zum Schadenspotential.....	61
2.4.2	Befragung zum Schadenspotential.....	63
2.4.3	Bestandsaufnahme	63
2.4.4	Entzinkung und Spannungsrisskorrosion bei Kupferlegierungen	68
2.4.5	Wirtschaftliche Betrachtungen.....	70
2.4.6	Energetischen Betrachtungen	73
2.4.7	Simulationsstudie zur Auswirkung von Belägen auf die Energieeffizienz von Heiz- und Kühlsystemen	75
2.4.8	Einfluss von Belägen auf den hydraulischen Abgleich.....	94
2.4.9	Weitere Folgen der Belagbildung in Wärmeübertragern	95
2.4.10	AP4: Monitoring/Evaluation / Sensor-Feldtest und Optimierungskonzepte (Phase II/III)	96
2.4.11	Gebäudeauswahl für die Ausstattung mit Messstrecke	96
2.4.12	Einbau Messstrecken für kontinuierliche Messungen	96
2.4.13	Feldtest des FeQuan-Sensors.....	96
2.4.14	Monitoring und Abhilfe.....	98
2.5	AP5: Dokumentation, Dissemination	134
2.6	Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen.	136
2.7	Fazit und Ausblick	136



2.8	Abkürzungen	137
2.8.1	Begriffe	137
2.9	Abbildungsverzeichnis.....	138
2.10	Tabellenverzeichnis.....	141
3.	Anhang	146
3.1	Fragen und Ergebnisse der Online Umfrage	146
3.2	Ergebnisse Phase I	156
3.2.1	Analyseergebnisse Phase I	156
3.2.2	Beispiel Objektbericht Objekt 7	157
3.3	Analysen Objekte Phase II/III	172
3.3.1	Objekt 9.....	172
3.3.2	Objekt 10 (Heizsystem)	187
3.3.3	Objekt 10 (Kühlsystem)	221
3.3.4	Objekt 11.....	256



1. Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Die Notwendigkeit, hydraulische Systeme in Gebäuden mittel- und langfristig auf eine energieeffiziente Bereitstellung von Wärme bzw. Kälte umzustellen, erfordert vorausschauende Energie- und Qualitätsmanagementkonzepte für den sicheren Betrieb dieser neuartigen, komplexen Systeme. Bei den neuen Anlagenkonzepten stellen physikalische, chemische und biologische Verschmutzungen - etwa durch Innenkorrosion oder Bakterienwachstum - erhebliche Risiken für die Langlebigkeit von hocheffizienten Bauteilen und die angestrebte Energieeffizienz dar. Die energetische Performanz der modernen Gebäude bleibt bei zu hoher Schlamm- und Schmutzbildung im Umlaufwasser aufgrund der Verschlechterung von Wärmeübergängen, dem Verblocken von Ventilen, der Störung des hydraulischen Abgleichs und der Erhöhung von Durchflusswiderständen hinter der Planung zurück. Neben der gestiegenen Sensibilität der hydraulischen Systeme zeichnet sich für moderne Gebäude weiterhin eine Entwicklung zur vermehrten Erhebung von Betriebskennzahlen zur Unterstützung der Gebäudewirtschaftung bzw. zur Ermittlung und Realisierung von energetischen und ökonomischen Einsparpotentialen ab.

1.1.1 Ziele

Ziele des Projekts waren die längs- und querschnittsmäßige Untersuchung von Korrosions- und Foulingproblemen der technischen Gebäudeausrüstung (TGA), vornehmlich in Heiz- und Kühlsystemen. Weiterhin ging es um die Entwicklung von Werkzeugen zum Energie- und Qualitätsmanagement von hydraulischen Systemen, die Anwendung von Qualitätssicherungs- und Monitoring-Hilfsmitteln (Sensor) als Feldtest und die Konzeption von Maßnahmen zur Vermeidung von Korrosions- und Foulingproblemen für ausgewählte Gebäude. Die Ergebnisse mündeten in die Erstellung eines Weißbuchs zur Planungsunterstützung und tragen zu einem Verständnis der Vorgänge und Schadenshöhen bei. Zudem wird die Eignung des neuen Sensorsystems für das korrosionsspezifische Monitoring zur Früherkennung von Korrosion und Fouling evaluiert.

1.1.2 Gesamtziel des Vorhabens

Ausgangspunkt des Projekts ist eine breit angelegte Umfrage zu betrieblichen Erfahrungen zu Korrosions- und Belagbildungsprozessen in Gebäuden, um ein detaillierteres Bild der durch wasserchemische Prozesse hervorgerufenen Probleme zu erlangen. In rund 20 Gebäuden werden die Systeme auf der Basis von Wasserproben und Bestandsaufnahmen untersucht und bewertet. Drei Gebäude werden mit dem FeQuan-Messsystem ausgestattet. Des Weiteren sollen drei Gebäude für gezielte Optimierungsmaßnahmen, den Test von Maßnahmen zur Minimierung und Beseitigung der vorhandenen Probleme und ein anschließendes, entsprechendes Monitoring ausgewählt werden. Die wasserchemischen Untersuchungen umfassen:

- Vor-Ort-Messungen grundlegender Feldparameter (Sauerstoff, pH-Wert, Leitfähigkeit, Redoxpotential) in Vor- und Rücklauf sowie einzelnen Heizkreisen
- Probenahme und Analyse des Anlagenfüllwassers aus Vor- und Rücklauf:
 - Eisengehalt (gelöst, partikulär)
 - Gehalte an weiteren Metallen (Kupfer, Zink, Nickel, Chrom, Mangan, Molybdän) in der gelösten und ungelösten Phase
 - Gehalt an organischem und anorganischem Kohlenstoff (TOC/TIC (Carbonathärte))
 - Wasserhärte und Härtebildner (Ca, Mg)
 - Salzgehalt (Na, K, Cl)
 - Bei Indikation mikrobiologischer Prozesse Nährstoffgehalte (N, P, Sulfat)
- Mikrobiologisches Screening/DNA-Sequenzierung, Quantifizierung mittels PCR (Unterauftrag)
- Spezifische Untersuchungen mit eisen- und manganoxidierenden Bakterien sowie weiteren identifizierten relevanten Organismen

Moderne Niedrigtemperatursysteme stellen korrosions- und wasserchemisch komplexe Systeme dar. Es besteht die Gefahr, dass, wie sich bereits in einer wachsenden Anzahl von Gebäuden zeigt, die Betriebssicherheit und Performanz durch Belag- und Feststoffbildungs- sowie Korrosionsprozesse stark beeinträchtigt wird. Die Umfragen und detaillierten Untersuchungen zielen auf eine bessere, bislang wenig vorhandene Wissensbasis bezüglich der tatsächlichen betriebstechnischen und energetischen Auswirkungen in modernen Niedrigexergiesystemen ab und münden in die Erstellung eines Weißbuches, das ggf. in Zusammenarbeit mit weiteren derzeit geplanten Projekten zur verbesserten Planung entsprechender Systeme erstellt wird. Hierzu ist ein Themenverbund innerhalb des EnBop-Programms mit gemeinsamen Workshops angedacht.



Weiterhin wird ein von der Universität Lüneburg entwickeltes und zum Patent angemeldetes System zur Messung bzw. Vorhersage von Korrosionsprozessen und Eisenschlammabbildung in Kombination mit der Software „Digitaler Prüfstand“ (synavision) sowie ein Online-Check für hydraulische Systeme im Feldtest getestet.

Die Forschungsfragen lauteten wie folgt:

- I. Welche der potenziell vorliegenden hydrochemischen und biologischen Prozesse (1.3.2) sind in betroffenen Gebäuden tatsächlich anzutreffen?
- II. Welche Maßnahmen und Werkzeuge sind geeignet, die hydrochemischen und korrosionsbedingten Risiken zu verringern?
- III. Welche Maßgaben können bereits in der Planung und Ausführung von Anlagen zur Verringerung von Belagbildungs- Korrosions- und Foulingserscheinungen beitragen?

1.1.3 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen (BMWi)

Korrosion, Belag- und Feststoffbildung in hydraulischen Systemen kann zu Beeinträchtigungen der Gebäudeperformanz bis hin zu Systemausfällen führen. Leistungskennzahlen insbesondere von hocheffizienten Heiz- und Kühlsystemen, die direkt nach Inbetriebnahme zunächst noch erreicht werden, können bereits nach kurzer Zeit durch die Verschlechterung von Wärmeübergängen, das Verblocken von Ventilen, die Störung des hydraulischen Abgleichs und die Erhöhung von Durchflusswiderständen deutlich abnehmen und zu erhöhten Heizwärme- und Hilfsenergiebedarfen bis hin zu Defekten an Ventilen und Pumpen führen. Solcherlei Prozesse tragen zu der in vielen Fällen deutlich hinter den Planungen zurückbleibenden energetischen Performanz moderner Gebäude bei. Für eine optimale Betriebsführung und die Verhinderung solcher Beeinträchtigungen müssen die Effekte systematisch erfasst sowie Monitoringstrategien zu deren Detektion und Vermeidung entwickelt und getestet werden.

Das Projekt trägt damit an einem besonders anfälligen Angelpunkt moderner energieeffizienter Gebäude, den hocheffizienten Heiz- und Kühlsystemen, dazu bei, in der Praxis auftretende Probleme und Verringerungen der Gebäudeperformanz zu vermeiden. Ohne funktionierende hydraulische Systeme ist eine der Planung entsprechende oder gar optimierte Betriebsführung nicht möglich. Das Projekt untersucht die Auswirkungen von Belag- und Feststoffbildungsprozessen in hydraulischen Systemen in Demonstrationsgebäuden des EnBau-Programms, die mit besonderen Anforderungen und Leistungen hinsichtlich der Energieeffizienz errichtet wurden, in EnEff:Stadt- und EnEff:Campus-Objekten sowie verschiedenen „konventionellen“, ohne wissenschaftliche Begleitung errichteten Gebäuden. Durch die Zu-

sammenarbeit mit dem Steinbeis Innovationszentrum Energie+ (SIZ E+) und die gute Vernetzung des Projektteams im EnOB-, EnEff:Stadt und EnBop-Programm sowie HIS kann auf eine Vielzahl entsprechender Gebäude und Kontakte zurückgegriffen werden. Auf dieser zunächst breit erhobenen Grundlage erfolgt die beispielhafte Umsetzung und Erprobung von Strategien für die Qualitätssicherung, spezifisches Monitoring und eine verbesserte Betriebsführung.

1.2 Voraussetzung, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Unter die Projektvoraussetzung fallen die Arbeitsteilung (1.2.1), die Expertise der Projektparteien (1.2.2) und die Verwertungsabsicht (1.2.3).

1.2.1 Arbeitsteilung im Konsortium

Das F/E-Projekt „EQM:Hydraulik – Energie- und Qualitätsmanagement gegen Korrosion und Belagbildung in hydraulischen Systemen“ wurde aufgabenteilig von der Leuphana Universität Lüneburg und dem SIZ energie+ über eine Bearbeitungszeit von 3 Jahren in Form von zwei Teilprojekten durchgeführt: Zum *Teilprojekt A* der Leuphana gehörte insbesondere die Untersuchung von Prozessen und Schadensbildern und die wasserchemische und mikrobielle Analytik (Feldstudie), der Feldtest eines Korrosionssensors und die Untersuchung von Verfahren zur Vermeidung von Korrosion und Fouling. Das *Teilprojekt B* des SIZ energie+ umfasste die Entwicklung einer Online-Befragung und Online-Checklisten, Umfrage (Feldstudie), Planung und energetisches Monitoring von Optimierungsmaßnahmen zur Vermeidung von Korrosion und Fouling. Die Zusammenarbeit basierte auf Grundlage der „Vereinbarung zur Durchführung des Verbundvorhabens“ (2014). und dem Zuwendungsbescheid sowie der Änderungsbescheide. Neben der Zusammenarbeit der genannten Partner wurde eine Nähe zu den in Form von Eigenleistungen beteiligten Gebäudebetreibern gepflegt. Die Gebäudebetreibenden beteiligen sich mit 50 % an den Kosten.

1.2.2 Vorarbeiten / Expertise

Das Konsortium verfügt über Expertise im Bereich Monitoring und Beurteilung Performance von Gebäuden (1.2.2.1) sowie in der Hydrochemie in TGA-Anlagen und deren Analyse (0).



1.2.2.1 Monitoring und Beurteilung der Gebäudeperformanz bzw. der Betriebsführung und Hydraulik

Das SIZ e+ ist eine Ausgründung von Forschenden der TU Braunschweig. Zu den Arbeitsschwerpunkten zählt die empirische Untersuchung der Qualität von Gebäuden. Dadurch liegt entsprechende, fundierte Expertise in diesem Bereich vor.

Chemie hydraulischer Systeme und Indikatorsysteme

Die Leuphana Universität Lüneburg verfügt über langjährige Erfahrung in der Wasserchemie sowie der wasserchemischen Analytik. Der Arbeitsgruppenleiter und Antragsteller Prof. Dr.-Ing. Wolfgang K.L. Ruck forscht seit Mitte der 1980er Jahre an mikrobiologischen und chemischen Prozessen im relevanten Gebiet Korrosion und Belagbildung sowie Wasserbehandlung.

Im Projekt „Thermische Untergrundspeicher in Energiesystemen: Optimierung der Einbindung der Aquiferspeicher in die Wärme- und Kälteversorgung der Parlamentsbauten im Berliner Spreebogen“ FKZ: 0329809C/D, wurde gezeigt, dass sich die Aktivität von Eisenionen basierend auf der Messung von Redoxpotential, Sauerstoff und pH-Wert messen lässt. Aufbauend hierauf wurde ein Sensorsystem zur Messung der Bildungsgeschwindigkeit von Eisenhydroxid in der Anlage entwickelt. Mit diesem Sensorsystem konnte die Bildung von Eisen- und Schwefelablagerungen in einem Wärmespeichersystem erfolgreich vorhergesagt werden. Mit dem Sensorsystem ist eine quantitative Messung der Eisen(II)-Ionenaktivität und somit potenziell eine Messung der Funktion von Korrosionsschutzmaßnahmen sowie eine Detektion anderer, auch mikrobiologisch katalysierter Korrosionsprozesse, die Eisen(II) oder Sulfid als Folge korrosiver Vorgänge freisetzen, möglich.

Damit ist eine On-Line-Überwachung relevanter Vorgänge in hydraulischen Systemen sowie die Einbindung in Monitoringsysteme möglich. Weiterhin kann das Sensorsystem potenziell bei der Überwachung in der Inbetriebnahmephase und bei der Diagnostik betroffener Systeme als mobiles Messsystem eingesetzt werden.

Die Schutzrechtsanmeldung für das Sensorsystem ist erfolgt, das Verfahren wurde im Februar 2012 [1] offenbart und soll in die Verwertung gebracht werden.

Hinsichtlich der Langzeitstabilität verschiedener Sensortypen bei der Festinstallation in entsprechenden Systemen und zur verbesserten mobilen Anwendbarkeit sowie zur Beantwortung von Fragen bezüglich des Einflusses verschiedener Komplexbildner und Inhibitoren, welche in den angezielten Anwendungsbereichen vorkommen, bestanden bislang noch Unklarheiten. Diese werden in einem aktuell durchgeführten ZIM-Projekt (ZIM KF2098304DB2) bearbeitet und eine entsprechende Hardware entwickelt, die einen festinstallierten sowie

mobilen Einsatz ohne Öffnung des Sensorsystems und damit verbundenem Verlust des Anlagenfluids ermöglicht. Zudem wurden Sensoren identifiziert und getestet, die eine ausreichende Langzeitstabilität sowie kompakte Bauform und geeignete Ausgänge sowie digitale Wartungsfunktionen aufweisen. Diese sollen im hier skizzierten Projekt im Feldtest zur Anwendung kommen.

Dem Projekt vorangehend wurden zudem bereits mehrere Gebäude mit wasserchemischen Schäden und die jeweilige Wasserchemie untersucht. Weiterhin stand die Mikrobiologie der Eisenoxidation und mikrobiologische Sukzession im Fokus detaillierter Untersuchungen.

1.2.3 Verwertung

Die Verwertung erfolgt gemäß den Zielen des Programmes EnBop: Die Ergebnisse des Projektes werden Planern, Herstellern, Dienstleistern und insbesondere Betreibern in Form eines „Weißbuches TGA NT-Wärme und Kälte“ zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus soll die Integration von Monitoringsystemen und eines Sensorsystems vorgenommen werden, welches großes Marktpotential und erwartbare Effekte hinsichtlich der Betriebssicherheit und Performanz von TGA-Systemen aufweist. Korrosionsschäden, darunter ein großer Anteil durch mikrobielle Korrosion, betragen allgemein ca. 4 % des BIP in Industriestaaten, darunter fallen industrielle Prozesse, Kühlkreisläufe, Korrosion in der Öl- und Gasindustrie etc., wobei Effizienzverluste in der Energieverwendung nicht enthalten sind. Ausmaß und Umfang korrosionsbedingter Schäden in TGA-Systemen sind ebenfalls nicht exakt bekannt, sie sind jedoch für die Betriebsführung von mit Niedrigexergiesystemen ausgestatteten Gebäuden von bedeutendem Interesse und sollen im Rahmen des Projektes eingängig untersucht werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass Korrosion auch in Heiz- und Kühlsystemen von Gebäuden hohe wirtschaftliche Schäden hervorrufen.

In das Projekt fließen die gebäudetechnischen Erfahrungen des SIZ und die wasserchemischen sowie mikrobiologischen Erfahrungen der Arbeitsgruppe Umweltchemie der Leuphana Universität Lüneburg bezüglich der Untersuchung der wasserchemischen Vorgänge, insbesondere jedoch hinsichtlich des wasserchemischen Sensorsystems ein.

Somit wird eine gute Fundierung der Ergebnisse sowie eine erfolgreiche Weiterentwicklung vorhandenen Wissens im Bereich der thematisierten Fragestellungen in TGA-Systemen garantiert. Das interdisziplinär zusammengesetzte Team gewährleistet eine gute Vernetzung der verschiedenen Wissensbereiche. Die beteiligten Wissenschaftler sind international sowohl in der wasserchemischen und mikrobiologischen, aber auch in der Energieforschung gut vernetzt. Die Methoden und Ergebnisse werden international veröffentlicht und beruhen auf dem aktuellen Stand des Wissens in diesen Bereichen.



Der Rahmen der EnOB-Förderung bietet darüber hinaus eine hervorragende Gelegenheit, die Ergebnisse direkt in die nationale Fachöffentlichkeit einzubringen. Die Ergebnisse und Lösungsansätze können so direkt bei der Planung neuer Projekte innerhalb und außerhalb der EnOB-Förderung einfließen und weiter validiert werden. Die Gebäudebefragungen, Bestandsaufnahmen und Analysen sowie insbesondere auch die Dokumentation der Optimierungsmaßnahmen werden mit der Begleitforschung EnBop abgestimmt.

Um die aktuellen Arbeiten zu Korrosion und energetischen sowie wirtschaftlichen Effekten verstärkter Korrosion in Heiz- und Kühlsystemen bestmöglich zu verknüpfen, ist die Einrichtung eines Themenverbunds mit gemeinsamen, projektübergreifenden Workshops geplant, die auch zur Dissemination und Diskussion der erhaltenen Ergebnisse mit Wissenschaftlern und Anwendern genutzt werden.

1.2.4 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Projektplanung lässt sich allgemein darstellen (1.2.5) und untergliedert in Arbeitspakete (1.2.6). Der Ablauf ist in 1.2.7 beschrieben.

1.2.5 Allgemeine Planung

Die weitere Arbeitsplanung stützte sich auf eine über Fachkreise bekannt gegebene Online-Befragung von Gebäudebetreibern (AP1: Betreiberbefragung (Phase I)), die neben dem Erkenntnisgewinn bezüglich der Schadenshäufigkeit auf eine Beteiligung der Teilnehmenden an der Feldstudie abzielte. Die Erhebungsbögen wurden durch das SIZ e+ erstellt, mit inhaltlicher Unterstützung von der Leuphana. Geplant war der Umfang von ca. 25 (EnOB/nicht-EnOB und Referenz-) Gebäuden. Aus einer Liste von 35 Objekten gingen 19 Objekte mit 64 Kreisläufen in die Untersuchung im Rahmen des Projekts ein. Somit wurden mehr Kreisläufe beprobt als ursprünglich vorgesehen. Als Referenzgebäude kristallisierten sich plangemäß jene ohne erkennbare Beeinträchtigungen heraus, deren Werte auch in die Normungsarbeit eingebracht wurden (Siehe 2.5).

Zur gebäudespezifischen Erfassung sollten Planungsunterlagen, Revisionen, Wartungsaufwände, und der aktuelle Anlagenzustand erfasst und Proben des Anlagenwassers entnommen und analysiert werden. Eine Auswahl von sechs Gebäudekreisläufen erhielt eine vertiefte Untersuchung mit vierteljährlicher Probenahme und dem Einbau einer online angebotenen, im Projekt zusammen gestellten Messtrecke mit dem Korrosionssensor. Dazu wurden nach einer eingehenden Marktrecherche eine kostengünstige Kunststoffarmatur (MWF) und Modbus fähige Sensoren (Hamilton) verwendet sowie standardisierten EQM-

Werkzeuge, insbesondere der Energie-navigator der Fa. synavision. Für drei Systeme wurden Maßnahmen gegen die Korrosionsprobleme erarbeitet. In einem Gebäude wurden die Maßnahmen durchgeführt, in einem anderen wurden sie vorbereitet und seitens des Gebäudemangements noch nicht vorgenommen und in einem weiteren Gebäude mit festgestellter mikrobiellen Korrosion erwies es sich als erfolgreich, das System unter Beobachtung zu halten, da sich das System in diesem Fall wieder von selbst stabil einstellen konnte.

1.2.6 Beschreibung der Arbeitspakete

Das Projekt gliedert sich in fünf Arbeitspakete, von denen die Feldstudie (AP2: Feldanalyse (Phase IIa)), der Sensor-Feldtest bzw. das sensorgestützte Monitoring in acht Gebäuden/Kreisläufen und mit der Erstellung von Optimierungskonzepten für drei Gebäude (AP4: Monitoring/Evaluation / Sensor-Feldtest 3+5 Geb. und Optimierungskonzepte 3 Geb. (Phase III)) den Kern ausmachen.

AP1: Betreiberbefragung (Phase I)

Zunächst wird im Rahmen einer internetgestützten Betreiberbefragung neben erfassten spezifischen Anlagendaten (Baujahr, Auslegungsleistungen, Systemfüllvolumen, Temperaturen, Wartungsaufwand etc.) ermittelt, ob und welche Probleme im Betrieb der jeweiligen Anlage aufgetreten sind, ggf. noch bestehen oder bestanden und deren erneutes Auftreten befürchtet wird. Die Befragung soll alle bislang geförderten EnOB- und EnEff:Stadt-Bauvorhaben im Rahmen des EnBop-Programmes laufende Vorhaben sowie Hochschulen (über das HIS-Netzwerk), staatliche Baubetriebe und Liegenschaftsgesellschaften sowie weitere gewerbliche Wohn- und Nichtwohngebäudebetreiber und Unternehmen mit eigenen Liegenschaften umfassen. Auf diesem Wege sollen Erkenntnisse über das akute Problemausmaß sowie ggf. erste Hinweise auf verbindende Elemente erlangt und erhoben werden. Die Befragung wird vom SIZ in Zusammenarbeit mit der Leuphana durchgeführt.

Weiterhin wird durch die Befragung nach Verantwortlichen gesucht, die Interesse an einer vertieften Untersuchung haben oder an im Rahmen des Projekts durchgeführten und per Monitoring begleiteten Abhilfemaßnahmen (AP2: Feldanalyse (Phase IIa) u. AP4: Monitoring/Evaluation / Sensor-Feldtest 3+5 Geb. und Optimierungskonzepte 3 Geb. (Phase III)). Da von den Anlagenbetreibenden eine Beteiligung an den Kosten des Projekts erwartet wird, werden weitere Gespräche mit Interessenten stattfinden, in denen das Projekt und die Problemstellung vorgestellt wird.

Bei mehr als drei an einer Umsetzung von Optimierungsmaßnahmen mit messtechnischer/analytischer Begleitung (AP4: Monitoring/Evaluation / Sensor-Feldtest 3+5 Geb. und



Optimierungskonzepte 3 Geb. (Phase III)) interessierten Kooperationsparteien wird eine Auswahl anhand der Stärke der Schäden, des zur Verfügung stehenden Projektbudgets und der allgemeinen Relevanz der betrachteten, ggf. unterschiedlichen Systeme und Schadensfälle durchgeführt.

AP2: Feldanalyse (Phase IIa)

In 20 sich aus der Befragung und den Betreibergesprächen ergebenden Gebäuden, idealerweise 10 EnBau/EnSan-Gebäude sowie 10 weiteren Nichtwohngebäude, erfolgt eine Analyse des Anlagenzustands und der -historie. Die Gebäude sollten mindestens seit 5 Jahren in Betrieb sein, es können jedoch auch Einzelfalluntersuchungen in erst kürzlich in Betrieb genommenen Gebäuden durchgeführt werden. Weiterhin werden 5 Referenzgebäude, deren idealerweise ähnliche Anlagentechnik nach Aussage der Betreiber bislang ohne im Betrieb aufgetretene Probleme war, vergleichend untersucht. Für die Datenerfassung wird außerdem ein Online-Check entwickelt, der eine strukturierte Auditierung von Anlagen und eine übergreifende Auswertung ermöglicht.

Die Untersuchungen umfassen nach Begehung der Anlage und einer detaillierten Dokumentation der Planung und Instandhaltung der ersten Jahre die Sichtung der Revisionsplanung, weitere Befragungen zu Komfort und Zuverlässigkeit der Anlage (SIZ zusammen mit LEU) sowie die Beprobung und chemische Analyse (wasserchemisch/mikrobiologisch und feststoffanalytisch (LEU)) der hydraulischen Systeme.

Hierfür sollen wasserchemische und grundlegende mikrobiologische Untersuchungen durchgeführt sowie die Anlagentechnik bauteilaufgelöst und hinsichtlich der verwendeten Materialien aufgenommen werden.

Die wasserchemischen Untersuchungen umfassen:

- Vor-Ort-Messungen grundlegender Feldparameter (Sauerstoff, pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Redoxpotential) in Vor- und Rücklauf sowie einzelnen Heizkreisen
- Probenahme und Analyse des Anlagenfüllwassers aus Vor- und Rücklauf:
 - Eisengehalt (gelöst, partikulär)
 - Gehalte an weiteren Metallen (Kupfer, Zink, Nickel, Chrom, Mangan, Molybdän) in der gelösten und ungelösten Phase
 - Gehalt an organischem und anorganischem Kohlenstoff (TOC/TIC (Carbonathärte))
 - Wasserhärte und Härtebildner (Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-})
 - Salzgehalt (Na, K, Cl)
 - Bei Indikation mikrobiologischer Prozesse Nährstoffgehalte (N, P)

- Mikrobiologisches Screening/DNA-Sequenzierung, Quantifizierung mittels PCR (Unterauftrag)
- Spezifische Untersuchungen mit eisen- und manganoxidierenden Bakterien sowie weiteren identifizierten relevanten Organismen

Die erhaltenen Daten werden im Hinblick auf die beobachteten Prozesse ausgewertet.

In drei EnBau/EnSan-Gebäude sowie fünf weiteren Nichtwohngebäuden mit Indikation von wasserchemischen Schäden werden solche weitergehende Bestandsaufnahmen der hydraulischen Systeme durchgeführt, die insbesondere auch Analysen des wasserchemischen Zustands in unterschiedlichen Teilbereichen sowie zusätzliche mikrobiologische und feststoffchemische Analysen zur Untersuchung mikrobieller Korrosion und Biofouling umfassen und sowohl zur Analyse der zugrundeliegenden Kausalitäten sowie zur Begründung, Fundierung und zur Planungsvorbereitung von Optimierungsmaßnahmen dienen.

In Verbindung mit der Aufnahme der Anlagen- bzw. Schadenshistorie sowie der Anlagentechnik/Bauteile und verwendeten Materialien kann eine detaillierte Auswertung zur Identifikation ggf. ursächlicher Konstruktionsdetails und eine Empfehlung für weitere Schritte und Maßnahmen (AP4: Monitoring/Evaluation / Sensor-Feldtest 3+5 Geb. und Optimierungskonzepte 3 Geb. (Phase III) vorgenommen werden, die im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführt und messtechnisch begleitet werden können.

Die benötigten Informationen für diese weitergehende Auswertung umfassen:

- Planungsunterlagen und Unterlagen zur Revisionsplanung, Anlagen- und Bauteilliste sowie Auslegungsdaten
- Zusammenstellung der Schadens- und Maßnahmenhistorie
- Wenn vorhanden: Daten zur energetischen Performanz (Plan/Ist)

Teilergebnis ist eine indikative Bestandsaufnahme über Korrosionsschäden in den hydraulischen Systemen energieeffizienter Gebäude. Das energetische Monitoring (0) dient einer umfassenden Bestandsaufnahme des Ist-Zustandes, um Vorher-Nachher-Vergleiche im Zusammenhang mit den in diesen Gebäuden vorzunehmenden Optimierungsmaßnahmen zu ermöglichen. Der Feldtest des neuentwickelten Sensorsystems (AP4) dient der In-Situ-Evaluierung des Systems und der Generierung von spezifischem Anwendungswissen, um die zukünftige standardmäßige Verwendung dieser Technologie im Gebäudebereich zu ermöglichen.



AP3: Schadens- und Potentialanalyse und Bewertung (Phase IIb)

Die Schadensbilder werden aus energetischer sowie Nutzungssicht analysiert und bewertet. Das Einsparpotential sowie wirtschaftliche Effekte werden auf der Basis der Befragungen (LEU in Abstimmung mit SIZ e+), Bestandsaufnahmen (wasserchemisch/-analytisch und feststoffanalytisch (LEU)) und einer Literaturstudie abgeschätzt.

Teilergebnis ist eine **Evaluation des Einflusses von Schadensbildern auf die Energieeffizienz und den Nutzerkomfort in Gebäuden** sowie jeweils ein Leitfaden/Weißbuch-Kapitel zu den wirtschaftlichen Auswirkungen der betrachteten Prozesse und zur In-Situ-Analyse entsprechender Systeme. Weiterhin dienen die ökonomischen Analysen zur Verdeutlichung der wirtschaftlichen Effekte, die in den Gesprächen mit Gebäudebetreibern und zur Begründung von Maßnahmen genutzt werden.

AP4: Monitoring/Evaluation / Sensor-Feldtest 3+5 Geb. und Optimierungskonzepte 3 Geb. (Phase III)

Ausgehend von den Untersuchungen und Vorarbeiten sowie eingehenden gebäudespezifischen Untersuchungen (anlagentechnisch/chemisch/mikrobiologisch) werden für drei der Gebäude Optimierungskonzepte entwickelt (LEU/SIZ e+), in Kooperation mit den Gebäudebetreibern umgesetzt (LEU/SIZ e+) und mittels der installierten Messtechnik (energetisches Monitoring/Korrosionssensor) sowie eingehenden nass- und feststoffchemischen sowie mikrobiologischen Analysen begleitet.

Die Maßnahmen können den Umbau, die Spülung, die regelungstechnische Optimierung sowie die Optimierung der Anlagen in der Betriebsführung, auch chemisch (Wasseraufbereitung etc.), beinhalten. So sollen auf dem Stand des Wissens basierende, für die Betriebsoptimierung anwendbare, erfolgversprechende Verfahren hinsichtlich ihres Potentials zur Reduzierung der Problematik evaluiert und ggf. auf dem Stand des Wissens nicht lösbare Prozesse identifiziert und analysiert werden, um hieraus ggf. Anforderungen an weiterführende Technologien ableiten zu können. Es fließen die Ergebnisse aus AP 1 bis 3 ein, die im Hinblick auf die Auswahl der Gebäude aus Sicht der Optimierungskonzeption von AP 4 begleitet werden. Die Optimierung wird anschließend sowohl in Bezug auf die Energieeffizienz und den Nutzungskomfort als auch hinsichtlich der Aussagen der integrierten Sensorik evaluiert.

Um für den Feldtest des Sensors eine ausreichende Datenbasis zu erlangen wird der Korrosionssensor in 5 weiteren Gebäuden installiert. Diese Gebäude werden in das erweiterte wasserchemische/mikrobiologische Monitoring einbezogen. Idealerweise werden die Gebäude für den Sensorfeldtest derart ausgewählt, dass sich Synergien für die Untersuchung verschiedener Anlagen und Schadensfälle/Ursachen ergeben.

Ergebnis sind Aussagen über die Möglichkeit zur Optimierung bei wasserchemischen Schäden sowie zur Möglichkeit der kontinuierlichen Überwachung mit Hilfe der eingesetzten Sensorik.

AP5: Dokumentation, Dissemination und Leitfaden

Als Hauptergebnis des Projekts wird ein praktischer Leitfaden zur wasserchemischen Qualitätssicherung von hydraulischen Anlagen in Planung, Errichtung und Betrieb entwickelt. In diesem Arbeitspaket ist zusätzlich die Dokumentation und Koordination der Arbeitspakete 1 – 4 im Hinblick auf die Leitfadenerstellung sowie die projektspezifische Koordination der Mitarbeit an einem projektübergreifenden Themenverbund angesiedelt. SIZ überarbeitet die Online-Checklisten in eine finale Fassung zur Anwendung in der Praxis.

1.2.7 Ablauf

Der Projektstart verzögerte sich aufgrund der verspäteten Einstellung von Mitarbeitern. Eine weitere Abweichung vom Zeitplan ergab sich durch schwierige Terminfindung und träge Rückmeldungen der Gebäudebetreibenden hinsichtlich Datenaufnahmen und Beprobungen. Dies führte zu einer parallelen Bearbeitung der Feld- und Detailanalyse.

1.3 Technischer und wissenschaftlicher Stand

Dieses Kapitel beginnt mit dem technischen Stand, an den angeknüpft wurde (1.3.1) und legt wissenschaftliche Erkenntnisse zu den sich abspielenden mechanischen und (bio-) elektrochemischen Prozessen dar (1.3.2).

1.3.1 Technischer Stand

Zunächst werden Entwicklungen im Anlagenbau skizziert, verwendete Verfahren und Schutzrechte benannt, der Stand der Technik im Bereich Wasserbehandlung und Probleme diskutiert, geltende Normen und Regeln sowie Normen und Regeln aus der Deutschen Demokratischen Republik (DDR) betrachtet und schließlich Vermeidungsstrategien aus den Normen sowie Hinweise für den Betrieb aus den Normen herausgehoben.

Entwicklung

Bei der Wärmeversorgung von Gebäuden bestehen immense Potentiale zu mehr Energieeffizienz. Die Realisierung dieser Potentiale steht auf der politischen Agenda und wird durch vielfältige Förderprogramme des Bundeswirtschaftsministeriums (BMWi) forciert. So werden



seit dem 01.08.2016 unter anderem Heizungsoptimierungen gefördert. Dies erfolgt durch den Einbau von modernen, hocheffizienten Pumpen (förderfähig sind dabei Heizungs-Umwälzpumpen und Warmwasser-Zirkulationspumpen sowie der fachgerechte Austausch) bzw. die Durchführung des hydraulischen Abgleichs, der die Wärme im Gebäude optimal verteilt. Zu den förderfähigen Investitionen gehört außerdem die Anschaffung und die fachgerechte Installation von:

- voreinstellbaren Thermostatventilen
- Einzelraumtemperaturreglern
- Strangventilen
- Technik zur Volumenstromregelung
- Separater Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik und Benutzerinterfaces
- Pufferspeichern
- die professionell erledigte Einstellung der Heizkurve

Die Förderung beträgt 30 % der Nettoinvestitionskosten für Leistungen sowohl im Zusammenhang mit dem Ersatz von Heizungs-Umwälzpumpen und Warmwasser-Zirkulationspumpen durch hocheffiziente Pumpen als auch zusätzliche Investitionen und Optimierungsmaßnahmen im Zusammenhang mit dem hydraulischen Abgleich und beläuft sich auf bis zu 25.000 Euro pro Standort.

Diese Informationen verdeutlichen zum einen die Wichtigkeit, die der technischen Optimierung beigemessen wird und unterstreichen zum anderen die Entwicklung zu komplexerer Anlagentechnik.

Mit der Einführung von hocheffizienten Niedrigexergie-Heizsystemen in den Heizungsbau sowie effizienten Kühlsystemen und Betonkernaktivierung haben sich Veränderungen in der Wasserchemie der verwendeten hydraulischen Systeme sowie der verwendeten Mechanik (Pumpen und Ventile) ergeben. Durch die Verwendung von im Vergleich zu Metallen nicht vollständig diffusionsdichten Kunststoffen, in Teilbereichen gemeinsam mit Metallwerkstoffen, findet keine vollständige Zehrung des bei der Befüllung der Systeme eingebrachten Sauerstoffes mehr statt. Vielmehr sind insbesondere in modernen, hocheffizienten Niedrigexergie-Heiz- und Kühlsystemen dauerhaft geringe Sauerstoffmengen vorhanden, die zu verstärkter und anhaltender Korrosion insbesondere eisenhaltiger, aber auch kupferhaltiger Materialien im System führen und eine ansonsten unter in klassischen Heizungssystemen vorhandenen Bedingungen auftretende Passivierung durch Alkalisierung und das Fehlen der kathodischen Depolarisationsprozesse verhindern. Hinzu kommen die aufgrund geringerer Temperaturen und möglicherweise aus Kunststoffmaterialien austretenden kohlenstoffhaltigen Substanzen verbesserten Bedingungen für ein Wachstum von Mikroorganismen, die zu einer komplexen Wasserchemie und verstärkter Korrosion sowie Belagbildung beitragen.

Auch in Kupferinstallationen, insbesondere aber beim oft anzutreffenden Materialmix wird die Korrosion durch ständige geringe Sauerstoffgehalte und mikrobiologische Aktivität befördert. Diese materialwahlbedingten wasserchemischen Veränderungen treffen auf immer filigraner werdende, energieeffiziente Pumpen und für den hydraulischen Abgleich genutzte feinmechanische Ventile, die mit Toleranzen und Spalten im Bereich von Millimetern bis Mikrometern empfindlich auf Feststoffe in den hydraulischen Systemen reagieren. Auch Kapillarrohmatten und Kühldeckensegel reagieren äußerst empfindlich auf Feststoffe und Biofilme. Magnetitpartikel lagern sich gezielt an den Magnetpumpen an und führen zu Effizienzverlusten sowie Defekten. Die Folge sind vielfältige Effekte, die von erhöhten Hilfsenergiebedarfen, Verblockung und starker Durchflussreduzierung in Teilbereichen über für Niedrigexergiesysteme besonders heikle abnehmende Wärmeübergangskoeffizienten in den Flächenheizsystemen bis hin zu Pumpendefekten reichen. Problematisch sind weiterhin Prozesse, die durch nicht-fachgerechte Installation und Inbetriebnahme hervorgerufen, jedoch erst spät durch im Betrieb auftretende Probleme entdeckt werden. Eine Rückführung auf die jeweiligen Ursachen ist derzeit, mit entsprechenden wirtschaftlichen Folgen für den Betrieb, unmöglich. Hier setzen wasserchemische Überwachungs- und Monitoringstrategien zur Qualitätssicherung im Gebäude-TGA-Bereich an.

Verfahren und Schutzrechte

Im Projekt wird ein von der Universität Lüneburg entwickeltes und zum Patent angemeldetes System zur Messung bzw. Vorhersage von Korrosionsprozessen und Eisenschlambildung in Kombination mit der Software energie navigator (synavision) sowie ein Online-Check für hydraulische Systeme im Feldtest erprobt. Für das Sensorsystem gab es zu Projektbeginn noch keine geeignete Messstrecke zum Festeinbau in Gebäudesystemen. Verfügbar war eine einzelne mobile Einheit (Messkoffer).

Stand der Technik im Bereich Wasserbehandlung und Probleme

Nach dem Stand der Technik werden sich bildende Feststoffe durch Filtersysteme entfernt. Ein Teil der Partikelfracht wird jedoch durch fehlerhaften hydraulischen Abgleich oder Verblockungen in langsam durchflossenen Teilbereichen nicht abtransportiert. Zunehmende Strömungsminderung und anaerobe MIC können zu vollständigem Funktionsverlust des Teilbereichs führen. Bei starker Beladung führen Filtrationssysteme insbesondere zu Druckabfall und steigendem Pumpenenergiebedarf. Absetzbehälter und Schlammfänger erfassen hingegen nur größere Partikel.

Zur Druckhaltung stehen verschiedene Systeme zur Verfügung (Abb. 1). Beim Membranausdehnungsgefäß ist insbesondere der Vordruck richtig einzustellen, um Gaseindiffusion zu vermeiden.

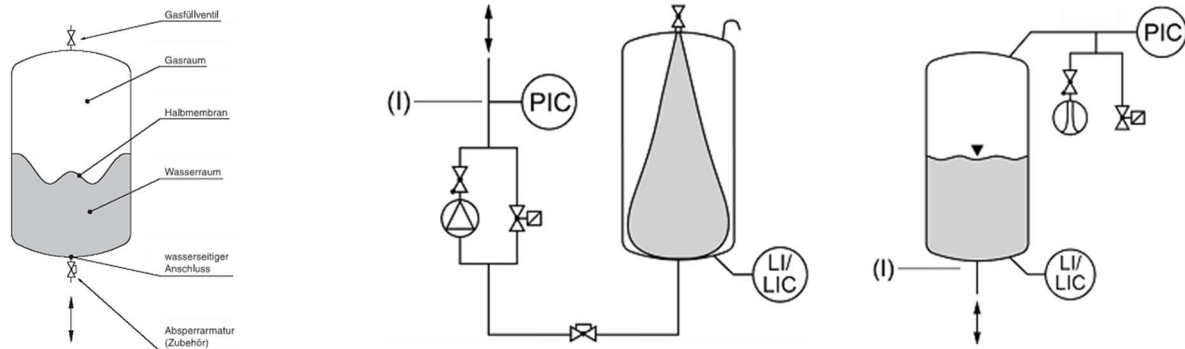


Abb. 1: Membran Druck-Ausdehnungsgefäße (MAG), Pumpendruckhaltung, Kompressordruckhaltung [2]

Der Sauerstoffkorrosion wird nach dem Stand der Technik teilweise durch passivierende Wasserbehandlung (bspw. Sauerstoffbindemittel, Laugen), der Bildung von Eisen- und Kupferausfällungen und -Belägen mit Inhibitoren, Komplexbildnern und Stabilisatoren bzw. Dispergiermitteln entgegengewirkt. Organische, abbaubare Zusätze, aber auch anorganische Zusatzstoffe sind eine potenzielle Nährstoffquelle und befördern dabei zumeist die mikrobielle Korrosion. Zur Einschränkung des Bakterienwachstums werden Biozide eingesetzt. Es existiert eine Vielzahl an chemischen Behandlungen, deren Formulierungen aus den verschiedenen Substanzklassen z.T. Produktgeheimnis sind und deren Wirkungsweisen nicht eindeutig dokumentiert sind. Zur Entfernung von Sauerstoff werden teilweise Entlüftungssysteme verwendet. Bei den geringen Sauerstoffkonzentrationen, wie sie in den betrachteten Systemen vorherrschen, haben diese Entlüftungssysteme keine Funktion oder können sogar Sauerstoff in das System einbringen.

Derzeit ist die Funktionalität der Passivierung und Stabilisierung schlecht zu überwachen und nur durch vorgelagerte Maßnahmen vor Korrosionsvorbeugung zu sichern. Dies führt dazu, dass zu Ablagerungen führende wasserchemische Probleme oft erst festgestellt werden, wenn Schäden eingetreten sind.

Der Einsatz entsprechender Monitoringsysteme soll diese selbst bei professioneller, dem Stand des Wissens und der Technik entsprechender Wasseraufbereitung oder -behandlung und sauberer Betriebsführung bestehende Lücke schließen.

Für die Korrosionsmessung in TGA-Systemen gibt es zu Projektbeginn keine technischen Lösungen und kein direktes Alternativprodukt zum verwendeten Sensor. Zur Korrosionsmessung im Industriebereich werden traditionell sog. Coupons eingesetzt, welche aus einer Ma-

terialprobe bestehen, die in das Medium eingebracht wird. Die Auswertung erfolgt nach einer bestimmten Expositionszeit durch optische Inspektion, Wägung und weitere Untersuchungen. Erzielt wird die Angabe der Korrosionsgeschwindigkeit in mm/a. Darüber hinaus werden Sensorsysteme zur (kontinuierlichen) Messung von Korrosion von den Firmen Pepperl und Fuchs (CorrTran MV) sowie Honeywell (SmartCET) seit ca. 2008 angeboten. Diese beruhen auf der elektrochemischen Messung der Korrosion an dem überwachten, hierfür eingebrachten Werkstoffstück. Es können Flächenkorrosion sowie Lochkorrosion an der Werkstoffelektrode gemessen werden, indem der lineare Polarisationswiderstand sowie das elektrochemische Rauschen bestimmt werden.

Die genannten Verfahren beruhen auf der Bestimmung der Korrosion am lokal ins System eingebrachten, separaten Werkstoffstück und funktionieren hauptsächlich bei direkter Korrosivität des Fluides gegenüber diesem Werkstoff. Dies ist in gebäudetechnischen Systemen nicht der Fall. Zudem erfassen diesen Systemen keine lokalen Vorgänge, die an anderer Stelle in der Anlage stattfinden, insbesondere mikrobiell induzierte Korrosion.

Geltende Normen und Regeln

In Tab. 1 sind geltende Normen und Regeln aus dem deutschsprachigen Raum aufgeführt, die das Thema der Korrosion in wasserführenden Systemen tangieren. Von hoher praktischer Bedeutung ist die Richtlinie 2035 des Vereins Deutscher Ingenieure [VDI 2035-2], die häufig als Referenz für die Befüllung und dem Betrieb von wasserführenden TGA-Systemen herangezogen wird. Sie bezieht sich allerdings nicht auf Kühlsysteme, sondern nur auf Heizsysteme. Diese Lücke auszufüllen ist Ziel der BTGA-Regel 3.003.

Tab. 1 Übersicht themenbezogener Normen [3], [4], [5],[6], [7], [8],[9], [10],[11],[12],[13], [14]

Bezeichnung	Anwendungsbereich und weitere Aspekte
VDI 2035-1 (2009) Vermeidung von Schäden in Warmwasser-Anlagen -Steinbildung in Trinkwassererwärmungsanlagen und Warmwasser-Heizungsanlagen	• Warmwasser-Heizanlagen nach DIN 4751-1/-3 mit Betriebstemperaturen < 100 °C • Konstruktive Anforderungen und Härtegrad des Füll- bzw. Umlaufwassers (UW) je nach Temperaturgradient • Chem. Methoden zur Senkung des Härtegrades im Betrieb
VDI 2035-2 (2009) -Heizwasserseitige Kor-	• Anwendungsbereich s.o.



rosion	• Fokus auf konstruktive Vorkehrungen zur Vermeidung von Sauerstoffzutritt • Wenige wasserchem. Anforderungen an UW: Leitfähigkeit, pH-Wert, Sauerstoff; i.d.R. mit LW einzuhalten • $LF < 100 \mu S/cm$; 100-1500 $\mu S/cm$ zulässig bei sehr niedrigen Sauerstoffgehalt • Einsatz von Chemikalien nur im Ausnahmefall • Einsatz von Inhibitoren nur bei unvermeidlichen Sauerstoffzutritt • Wenig Einschränkungen bei Materialauswahl und -mix • Jährl. Wartung, Prüfung pH-Wert, Kontrolle des Anlagendrucks
TÜV Süd (1998)	• Anwendungsbereich s.o.
Erläuterungen zur VDI 2035-2	• Geringfügig geschärfte Grenzwerte im Vergleich zu VDI 2035-2 • Empf. $LF < 100 \mu S/cm$; Max. Grenzwert: 1000 $\mu S/cm$ • Empfehlung der Befüllung mit VE-Wasser
ÖNORM H5195-1 (2001)	• Warmwasser-Heizungsanlagen mit Betriebstemperaturen $< 100^\circ C$
Verhütung von Schäden durch Korrosion und Steinbildung in geschlossenen Warmwasser-Heizungsanlagen mit Betriebstemperaturen $< 100^\circ C$	• Vermeidung von Verschmutzung bei Montage • Weniger wasserchem. Anforderungen am FW/UW im Vergl. zur VDI 2035-2 (nur Härte Chlorid $< 30 \text{ mg/L}$, Ammoniumsalze) • Keine Begrenzung der LF • Ausdrückliche Würdigung der Einsatzmöglichkeit von Inhibitoren • Vermeidung von Verzinkungen wg. Gefahr der Gasentwicklung [und Unverträglichkeit mit Inhibitoren!] • Regelmäßige Prüfung des UW (alle 2 Jahre)

BTGA-Regel 3.002 Geschlossene wasser- geführte Heiz-und Kalt- /bzw. Kühlwassserkreis- läufe in Gebäuden -Druckprüfung, Spü- len/Reinigen und Befül- lung im Rahmen der Inbetriebnahme	• Geschlossene wassergeführte Heiz-und Kalt-/bzw. Kühlwassserkreisläufe in Gebäuden • Druckprüfung und Belastungsprüfung hydraulisch oder pneumatisch (bei abschnittsweiser Abnahme, um Standzeiten zu vermeiden) • Spülen im Durchfluss- oder Umlaufverfahren je nach Installationsart, empfohlen mit Füllwasser gemäß 3.003 • Unmittelbare Überführung in den bestimmungsgemäßen Betrieb • Wasseranalyse vor Abnahme zur Sicherstellung der Qualität des Füllwassers
BTGA-Regel 3.003 -Zuverlässiger Betrieb unter wassertechnischen Aspekten	• Wasserführende Anlagen mit Systemtemperaturen < 40 °C • Differenziertere wasserchem. Anforderungen an UW als bei allen anderen Regeln – LF im UW: 100-1000 µS/cm • Zus. Grenzwerte für den Gehalt an sulfat- und nitratreduzierenden Mikroorganismen • Regelmäßige (6-mtl.) bzw. bei Anlagen mit UW-Volumen > 1 m³ kontinuierliche Prüfung der wasserchem. Parameter des UW (pH-Wert, LF, Gesamthärte) • Geringes Augenmerk auf die Vermeidung von Sauerstoffzutritt • Hervorhebung der Bedeutung der Instandhaltung, Dokumentation • Hinweise zu Schadensarten und -abhilfemaßnahmen
DIN EN 14868 (2005)	• Unverbindliche Empfehlung • Heizsysteme bis 110 °C und Kühl- und Kältesysteme, die mit LW oder vergleichbaren Wasser befüllt wurden • Übergeordnete Bedeutung des Sauerstoffeintrages für



	die Korrosionswahrscheinlichkeit, entspr. konstruktive Hinweise • Kategorisierung der Anlagen in Sauerstoffoffen und -geschlossen • Möglichkeit der mikrobiologisch induzierten Korrosion • Ursachen für Korrosionsschäden getrennt aufgeführt für beide Anlagenkategorien (s.o.) • Materialmix wird kritisch gesehen, ebenso geringe Stahlmenge bei großem Wasservolumen • Hinweise für Inbetriebnahme: Vermeidung von Leerstandszeiten mit Restwasser, ausreichender Systemdruck, ggf. chem.-mech. Reinigung, LW- oder besser VE-Wasser, pH-Wert-Anhebung bei Sauerstoffzutritt; • Einsatz von Inhibitoren zulässig bei Sauerstoff-offenen Anlagen-Hinweis auf erhöhtes Risiko der Lockkorrosion und des mikrobiologischen Wachstums • Jährliche Wartung: Systemdruck, Druckhaltung, Inhibitorkonzentration, Prüfung von Geruch Trübung oder Verfärbung • Hinweise zur Reinigung von Systemen, bei denen bereits Korrosion aufgetreten ist.
DIN EN 12502-2 /-5 Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe - Hinweise zur Abschätzung der Korrosionswahrscheinlichkeit in Wasserverteilungs- und –speichersystemen Einflussfaktoren für Kupfer und Kupferlegierungen/ Eisen / nichtrostenden	• Wasserverteilungs- und Speichersysteme explizit keine Zirkulationswasser in Heiz- und Kühlsystemen • Vermeidung von Mischinstallationen, hohen Temperaturgradienten und Strömungsgeschwindigkeiten • Klassifizierung der Korrosionsarten bei den verschiedenen Metallen • Hinweis auf die Möglichkeit mikrobiologischer Korrosion • Hinweise zum Einfluss der Wasserbeschaffenheit (pH-Wert > 7 (Schutzschichtbildung) bzw. > 8,5 (sehr niedrige Korrosionsrate)), Chlorid, Salze, Sauerstoff < 0,05

de Stähle /Gusseisen, niedrig oder unlegierte Stähle	mg/L (sehr niedrige Korrosionsrate)
	• Inbetriebnahme: Empfehlung zur Spülung, Vermeidung von feuchten Leerstandszeiten • Aufgrund des breiten Anwendungsbereiches relativ allgemein enthalten

Normen und Richtlinien aus der Deutschen Demokratischen Republik (DDR)

In der DDR existierten ebenfalls umfangreiche Regeln und Normen in Bezug auf die wasserseitige Korrosion von Heiz- und Kühlsystemen (Tab. 2).

Tab. 2 Normen und Regeln in der DDR [1], [15],[16],[17], [18],[19], [20], [21], [22]

TGL-Nr.	Ausgabe	Titel
TGL 18771/01	1986-06-00	Korrosion und Korrosionsschutz. Metallische Werkstoffe in Wasserführenden Anlagen. Allgemeine Festlegungen
TGL 18771/02	1986-06-00	Korrosion und Korrosionsschutz. Metallische Werkstoffe in Wasserführenden Anlagen. Un- und niedriglegierter Stahl, unlegiertes Gusseisen in Rohrleitungen, Behältern und Wärmeüberträgern
TGL 18771/03	1986-06-00	Korrosion und Korrosionsschutz. Metallische Werkstoffe in Wasserführenden Anlagen. Feuerverzinkter Stahl in Rohrleitungen und Behältern
TGL 18771/04	1987-05-00	Korrosion und Korrosionsschutz. Metallische Werkstoffe in Wasserführenden Anlagen. Korrosionsbeständige Stähle in Rohrleitungen, Behältern und Wärmeüberträgern
TGL 18771/05	1987-05-00	Korrosion und Korrosionsschutz. Metallische Werkstoffe in Wasserführenden Anlagen. Kupfer und Kupferlegierungen in Rohrleitungen, Behälter und Wärmeüberträgern
TGL 190 255/01	1988-06-00	Wärmeversorgungsanlagen. Wärmeträger. Heizwasser, Dampf, Kondensat. Qualitätsanforderungen
TGL 190- 255/02	1978-07-00	Wärmeversorgungsanlagen. Wärmeträger. Qualitätsüberwachung



Inhalt

TGL 18771/01 Korrosion und Korrosionsschutz Metallische Werkstoffe in wasserführenden Anlagen, Allgemeine Festlegungen:

- Allgemeines
- Wasseranforderung/-prüfungen in Abhängigkeit von den verwendeten Materialien und den eingesetzten Korrosionsschutzmaßnahmen

TGL 18771/02 Korrosion und Korrosionsschutz Metallische Werkstoffe in wasserführenden Anlagen, unlegierte Stähle, Gusseisen:

- Grundsätzlich korrosionsgeschützt zu verwenden außer bei Wasser-Heizungsanlagen
- Wasserqualitätsanforderung nach TGL 18771/01
- Bei hohen Salzgehalten und Sauerstoffgehalt $>0,1 \text{ g/m}^3$ Korrosionsgefahr
- pH-Wert als Indikator für die Korrosionswahrscheinlichkeit
- Empfohlene Fließgeschwindigkeit $0,5 \text{ m/s} < v < 4 \text{ m/s}$ zur Vermeidung der Absetzung von Partikeln und Arrosion
- Hinweise für Inbetriebnahme (wie bei /03)
- Verbot von Gusseisen nach Kupfer in Fließrichtung des Wassers (!)
- Inhibitoren als Schutzmaßnahme

Tabelle 1

pH-Wert	Sauerstoffkonzentration in g/m ³	Auswirkungen auf die Korrosion
< 4,5	beliebig	Lösliche Korrosionsprodukte in Form von Eisenionen. Die Korrosionsgeschwindigkeit nimmt mit abnehmendem pH-Wert zu.
4,5 bis 9,0	≥ 0,1	Unlösliche Korrosionsprodukte in Form von Eisenoxidhydraten. Die Korrosionsgeschwindigkeit nimmt mit zunehmender Sauerstoffkonzentration zu.
≥ 7,5	< 0,1	Technisch unbedeutende Korrosion. Bei T > 200 °C Fe ₃ O ₄ -Schutzschichtbildung mit gleichzeitiger Wasserstoffentwicklung, insbesondere in härtearmen und -freien Wässern.
≥ 7,5	0,1 bis 2,0	Bei T 50 bis 150 °C Bildung von Eisen-II-hydroxid, woraus Fe ₃ O ₄ -Schutzschichten bei gleichzeitiger Wasserstoffentwicklung entstehen.
4,5 bis 6,0	0,1 bis 2,0	Bei Gußeisen mit Lamellengraphit und c(Cl) > 4,2 mol/m ³ c [SO ₄] > 3,6 mol/m ³ ist Spongiose möglich.

Abb. 2: Auszug aus der TGL 18771/02: Zulässige Sauerstoffkonzentration in Abhängigkeit vom pH-Wert

TGL 18771/03 Korrosion und Korrosionsschutz i Metallische Werkstoffe in wasserführenden Anlagen, verzinkte Stähle:

- Betrifft verzinkte Rohre und Behälter in wasserführenden Anlagen
- Schutzschichtbildung bei basischem Wasser mit ausreichender Säurekapazität
- Einfluss von gelöst Kupfer bekannt („indirekte Kontaktkorrosion“)
- Einfluss gelöster Salze in Zusammenhang mit Sauerstoff
- Strömungsgeschwindigkeit > 0,5 m/s zur Vermeidung von Ablagerungen
- Spülung vor Inbetriebnahme, anschließend Wasser in Anlage belassen, oder mit Stickstoff füllen oder trocknen
- Korrosion unbedeutend bei c(O₂) < 0,1 g/m³



- Kontaktkorrosion vermeiden
- Verwendung von Inhibitoren empfohlen
- Ersetzt TGL 18770/01; 18770/02 und weitere
- Verweis auf Konditionierung von Kühlwasserkreisläufen ZKS Richtlinie R 36-84

TGL 190-255/01 Wärmeversorgungsanlagen Wärmeträger Heizwasser:

- Anforderungen an Wasserchemie
- Verweis auf ZKS R 36-84 und ZKS R 33-85 (Kühlwasserkreisläufe Korrosionsschutz), R 33-853

Verbindlich ab 1.5.1989

Dieser Standard gilt nicht für Primärnetze, die aus Kernkraftwerken versorgt werden.

Allgemeine Forderungen

1. Die Wärmeträger müssen eine solche Qualität aufweisen, daß ein störungsfreier Betrieb der Wärmeversorgungsanlage einschließlich der Abnehmeranlagen jederzeit gesichert ist.

2. Nach Aufnahme des Probebetriebes bei Erst-inbetriebsetzung von Wärmenetzen sind Abweichungen von den Qualitätsanforderungen für einen zu vereinbarenden Zeitraum zulässig, wobei im Verlaufe des Betriebes eine ständige Verbesserung der Werte nachzuweisen ist.

3. Der Einsatz von filmbildenden Aminen zum Korrosionsschutz oder von Komplexbildnern zur Verhinderung von Belägen oder zur Verbesserung der Schutzschichten ist zulässig und hat auf der Grundlage der Anwendungsrichtlinien des Verfahrensträgers zu erfolgen.

4. Eine Verunreinigung der Wärmeträger mit Stoffen, die nicht in den Qualitätsanforderungen nach Tabelle erfaßt sind und zu Schäden und Störungen in der Wärmeversorgungsanlage führen können, ist unzulässig.

Tabelle Qualitätsanforderungen

Kennwert	Einheit	zulässige Werte für Heizwasser					Dampf und Kondensat
		bei indirektem Anschluß sowie bei direktem Anschluß von Warmwasserkesseln	bei direktem Anschluß und in Primärkreisläufen von Heißwasserkesseln	bei direktem Anschluß von Mischvorwärmern	bei Anschluß an Wärme-erzeugungsanlagen mit Zwangsdurchlauf-Dampf-kessel > 8,0 MPa		
Σ Erdkalkalitionen (eq)	μmol/kg	≤ 36	≤ 36	≤ 36	≤ 10	≤ 36 ¹⁾	
pH-Wert	-	8,5 bis 9,5	8,5 bis 9,5	8,5 bis 9,5	8,5 bis 9,5	≤ 7	
Sauerstoff (O ₂)	μg/kg	≤ 50 ²⁾	≤ 50 ²⁾	≤ 50 ²⁾	≤ 50 ²⁾	≤ 50 ³⁾	
Gesamtkohlensäure (CO ₂)	mg/kg	-	-	≤ 10	-	≤ 10 ³⁾	
Ammoniak (NH ₄ ⁺)	mg/kg	-	≤ 8	≤ 8	≤ 2	≤ 8	
Gesamteisen (Fe)	μg/kg	-	≤ 100	wie Kessel-speisewas-ser nach TGL 190-99/01	≤ 100	≤ 100 ¹⁾	
Gesamtkupfer (Cu)	μg/kg	-	≤ 15	wie Kessel-speisewas-ser nach TGL 190-99/01	≤ 15	≤ 15	

Fortsetzung der Tabelle Seite 2

Bauinformation
Informationskabinett
Projektierungsgrundlagen

1 In Wärmeanlagen, in denen eine Kondensat-aufbereitungsanlage vorhanden ist, die die Einhaltung des Wertes nach Tabelle gewähr-leistet, darf mit dem Abnehmer ein höherer Wert vereinbart werden.

2, 3 siehe Seite 2

Abb. 3: Auszug aus der TGL 190-255/01: Wasserchemische Anforderungen an das Umlaufwasser.

TGL 190-255/02 Wärmeversorgungsanlagen Wärmeträger Qualitätsüberwachung:

- Probenahmehäufigkeit, -ort, Untersuchungsumfang

ZKS Richtlinie R 38-87 Werkstoffeinsatz und Korrosionsschutz in Luftkühlanlagen:

- Anforderungen an Materialien und Wasserqualität
- Verweis auf ZKS R 36-84 und ZKS R 33-85 (Kühlwasserkreisläufe Korrosionsschutz), R 33-853 (nicht gefunden)

Tabelle 5 Richtwerte der Inhaltsstoffe des Umlaufwassers für Sprühbefeuchter bei Normalklimaanforderungen

Befeuchter/Kriterien	Düsen- kammer	Scheibenbe- feuchter
Karbonathärte KH (°dH)		
- ohne Härtestabilisierung	≤ 10	≤ 5
- mit Härtestabilisierung ¹	≤ 20	≤ 20
Abdampfrückstand bei 105 °C in mg/l	≤ 2000	≤ 1000
el. Leitfähigkeit bei 20 °C χ_{20} (µS/cm)	≤ 2400	≤ 1200
Chlorid Cl ⁻ in mg/l	≤ 300	≤ 200
Sulfat SO ₄ ²⁻ in mg/l	≤ 500	≤ 350
pH-Wert el.	6,8 ... 8,5	
Ammonium NH ₄ ⁺ in mg/l	≤ 5	
Summe Eisen und Mangan Σ Fe + Mn in mg/l	≤ 2	
Nitrat NO ₃ ⁻ in mg/l	≤ 50	
Silikat SiO ₂ in mg/l	≤ 20	
abfiltrierbare Stoffe in mg/l ²	≤ 30	
KMnO ₄ -Verbrauch in mg/l	≤ 50	

Abb. 4: Auszug aus der ZKS Richtlinie R 38-87: Wasserchemische Anforderungen am Umlaufwasser in Kälteanlagen



Bewertung

In den betrachteten Systemen wird ein Sauerstoffeintrag nicht ausgeschlossen und es werden Grenzwerte für den pH-Wert oder den Salzgehalt in Abhängigkeit von diesem benannt.

Vermeidungsstrategien aus den Normen

Die Normen (ohne jene aus der DDR) unterscheiden sich vor allen Dingen in der unterschiedlichen Bewertung der Einflussfaktoren auf Korrosionsprozesse und den entsprechenden Vermeidungsstrategien. So liegt der Fokus bei der VDI 2035 Blatt 2 auf der Vermeidung des Sauerstoffeintrages. Schon geringe Mengen an Sauerstoff im UW gelten als Indikator für einen Sauerstoffeintrag und führen zu einer Erhöhung der Anforderungen an LF und pH-Wert im UW. Chemikalien, wie Inhibitoren, sollen nur im Ausnahmefall eingesetzt werden.

Die ÖNORM H5195-1 geht ausdrücklich auf die Möglichkeit des Einsatzes von Inhibitoren ein, wenn die chemischen Anforderungen am UW nicht eingehalten werden können und nennt als einzige Norm Gehaltsgrenzen für die entsprechenden Inhaltsstoffe.

Die BTGA-Regel 3.003 betrifft Kalt- und Kühlwassersysteme, die nicht durch die VDI-Regeln abgedeckt sind. Der Fokus liegt auf der wasserchemischen Eignung des FW und der regelmäßigen Wartung (Druckhaltung, Kontrolle des UW). Der Einfluss des Sauerstoffzutritts und mögliche Gegenmaßnahmen werden genannt, aber nicht in der Tiefe behandelt wie bei der VDI 2035.

In der DIN EN 14868 wird wie in der VDI 2035-2 die Bedeutung des Sauerstoffeintrages hervorgehoben. Bei unvermeidlich hohem Sauerstoffeintrag wird die Möglichkeit des Einsatzes von Inhibitoren gegeben. Nur in dieser Norm und in den Erläuterungen zur VDI 2035-2 des TÜV Süd (1998) wird die Verwendung von VE-Wasser empfohlen.

Die DIN EN 12502-2 bis -5 behandelt keine Systeme in denen Heiz- oder Kühlwasser zirkuliert. Es werden Einflussfaktoren qualitative bewertet, sowie der Zusammenhang zwischen pH-Wert, Sauerstoff-, Chlorid- und Salzgehalten und der Korrosionswahrscheinlichkeit dargestellt.

Hinweise für den Betrieb aus den Normen

Fast alle Normen und Regeln empfehlen Wartungsintervalle für die Systeme zwischen 1 und 24 Monaten (BTGA 3.002: 1-12 Monate oder kontinuierlich, ÖNORM H5195-1 24 Monate). Geprüft werden sollen der Anlagendruck (VDI 2035-2, DIN EN 14868, BTGA 3.002) sowie die chem. Parameter des UW in unterschiedlicher Intensität (entweder nur pH-Wert oder alle angegebenen Parameter).

Die VDI 2035-2 geht besonders auf die Ausführung der Anlagen zur Druckhaltung ein. So wird generell von Anlagen abgeraten, bei denen das Umlaufwasser mit der atmosphärischen Luft in Kontakt steht. Das Umlaufwasser soll durch eine Butyl-Kautschuk Membran von der atmosphärischen Luft getrennt werden. Offene Ausdehnungsgefäße sind aus korrosionstechnischer Sicht generell abzulehnen. Der Systemdruck muss an jeder Stelle mindestens 0,5 bar betragen.

1.3.2 Wissenschaftlicher Stand

Im Folgenden wird erläutert, wie es zur Bildung von Feststoffen in hydraulischen Systemen kommt und welchen Einfluss die Sauerstoffkonzentration, Schwefelverbindungen und Bakterien ausüben.

Festphasenbildungen in hydraulischen Systemen

Grundsätzlich sind Festphasenbildungen in hydraulischen Systemen durch das Kalk-Kohlensäure-System und das Eisen-Mangan-Schwefel-System (durch Flächenkorrosion sowie Lochkorrosion) mit Bildung von Eisenausfällungen in Abhängigkeit von der Sauerstoffverfügbarkeit möglich. Bei der Bildung von inhibierend wirkenden Korrosionsschutzschichten ist das Kalk-Kohlensäure-System ebenfalls maßgeblich [23]. Bei der Kupferkorrosion werden je nach Redoxmilieu und pH-Wert als Belagschichten Oxide (rotbraunes Cuprit), Hydroxocarbonate (blaugrüner Malachit) sowie Sulfide (schwarzes Kupfersulfid) gebildet [24][25]. Speziell bei Niedrigexergiesystemen kommen potenziell Biofilmbildung, Sulfatreduktion und mikrobiologische Sukzession mit Auswirkungen auf die Korrosionsprozesse und die Eisen- und Kupferchemie (microbial induced corrosion – MIC) vor [26]. Übermäßige Calcitausfällungen treten in der Regel nur in Hochtemperatursystemen auf, die nicht mit entsalztem Wasser gefüllt sind. Zwischen den einzelnen Phänomenen bestehen mitunter Wechselwirkungen, die durch Reaktionsprodukte und katalytische Effekte hervorgerufen werden können. Neue Ergebnisse deuten zudem auf Auswirkungen katalysierender manganoxidierender Bakterien hin, bspw. *Leptothrix* spp, die besonders gut in Wässern mit pH 8-9 und niedrigen Calcium- und Magnesiumgehalten vorkommen [27].

Einfluss des Sauerstoffgehalts

Sauerstoff ist bei der Korrosion von Eisen- und kupferhaltigen Werkstoffen für die kathodische Depolarisation und die weitere Oxidation des in Lösung gegangenen Eisens zu Eisen(III)-Verbindungen von Bedeutung. Sauerstoff verhindert hierdurch die Passivierung des Materials durch die Eigenalkalisation, erniedrigt den durch die kathodische Reaktion ange-

hoben pH-Wert und führt so zu anhaltender Korrosion und der Bildung von unlöslichen Eisen(III)-Verbindungen und Feststoffen im System [Wagner et al. 1988]. Dabei sind in Niedertemperaturheizsystemen für eine Kalk-Rost-Schutzschichtbildung zu geringe, aber für eine verstärkte Korrosion gerade ausreichende Sauerstoffgehalte und eine zu geringe Wasserhärte vorhanden.

Einfluss von Schwefelverbindungen

Eine bedeutende Rolle nimmt Schwefel bei Korrosionsprozessen in Heiz- und Kühlsystemen ein. Korrosiv wirken insbesondere Formen elementaren Schwefels, der mikrobiologisch aus Sulfat gebildet wird. Elementarer Schwefel, insbesondere in Form von vergleichsweise gut wasserlöslichem Polysulfid, kann Eisen- und Kupferwerkstoffe unter der Bildung von Sulfiden oxidieren oder in einer kathodischen Reaktion anstelle von Sauerstoff reduziert werden. Abb. 5 zeigt den Mechanismus der Korrosion in sauerstoffarmen Systemen durch elementaren Schwefel (bzw. Polysulfid) in einer gedachten Rostblase, in der mikrobiologische sowie abiotische Prozesse ineinandergreifen [26][28][29][30]. Dabei führt Schwefel in der kathodischen Reaktion nicht zu einer Anhebung des pH-Werts, so dass zum einen eine Passivierung ausbleibt, zum anderen jedoch die pH-Wert-Abhängigkeit der Korrosionsreaktion verringert wird. In der Folge kann es zu Korrosionserscheinungen auch bei alkalischen pH-Werten kommen [26].

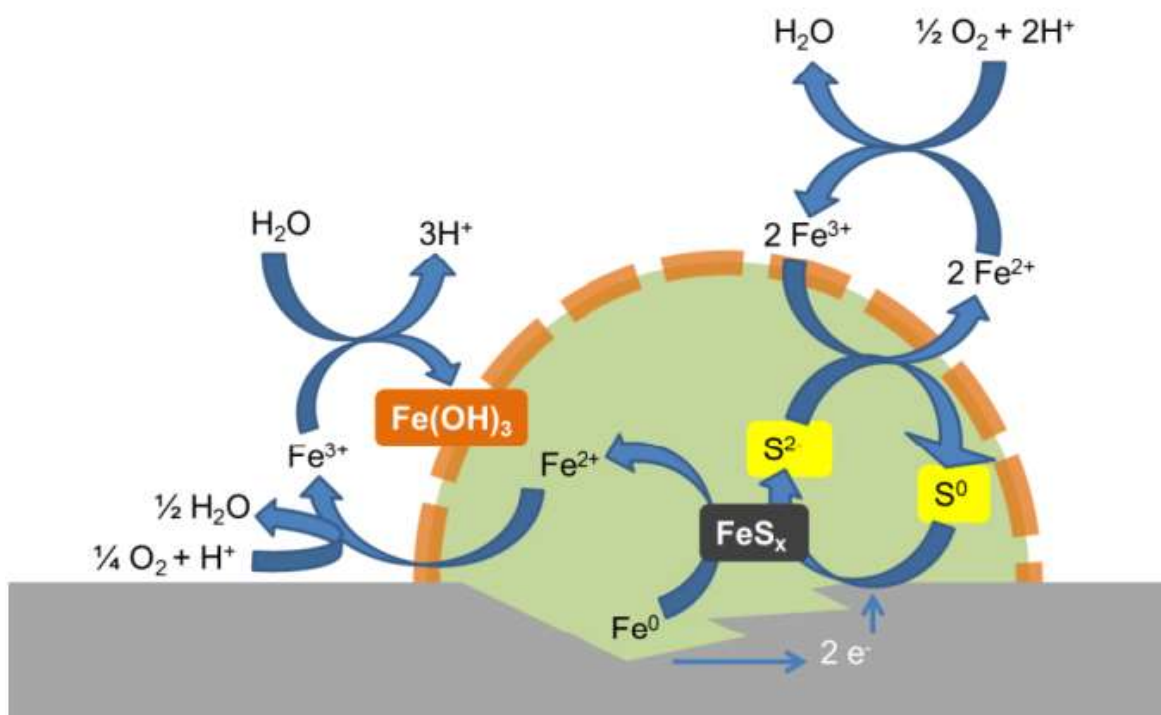


Abb. 5: Einfluss von Schwefel auf Korrosionsprozesse [26][28][29][30]

Einflüsse mikrobiologischer Aktivität auf die Performanz hydraulischer Systeme in Gebäuden

Eisenoxidierende Bakterien können gerade unter sauerstoffarmen, jedoch nicht vollständig sauerstofffreien Bedingungen die Korrosion und Feststoffbildung beschleunigen, indem sie durch ihre mikrobiologische Tätigkeit die durch geringe Sauerstoffgehalte verlangsamten Funktionen der Oxidation des in der anodischen Reaktion gebildeten Eisen(II) zu Eisen(III) katalysieren und beschleunigen [31]. Diese Bakteriengemeinschaften reichern in ihren eisenhaltigen Sekreten Nährstoffe und Elektrolyte an, es bildet sich ein Biofilm, der durch gesenkten pH-Wert, geringeren Sauerstoffgehalt, mikrobiell gebildeten Schwefel und eine höhere Konzentration von Elektrolyten korrosionsfördernd wirkt. Die verbesserte Nährstoffverfügbarkeit im Biofilm führt zur Ausbildung komplexer Bakteriengemeinschaften, man spricht von MIC (microbially induced corrosion) oder Biofouling [32] [23]. Sie bilden zusätzlich selbst in nahezu von organischem Kohlenstoff freien Milieus eine Primärproduktion von organischem Kohlenstoff, was eine Lebensgrundlage für heterotrophe Organismen wie beispielsweise Sulfatreduzierer oder heterotrophe Eisen- und Manganoxidierer schafft, die bei den in Heiz- und Kühlsystemen vorzufindenden Bedingungen gut leben können [27]. Aus dem Metall herausgelöstes, zu Mangan IV oxidiertes Mangan wirkt dabei ebenso wie Eisen(III) korrosionsbeschleunigend. Der Gesamtprozess ist in Abb. 6 dargestellt.

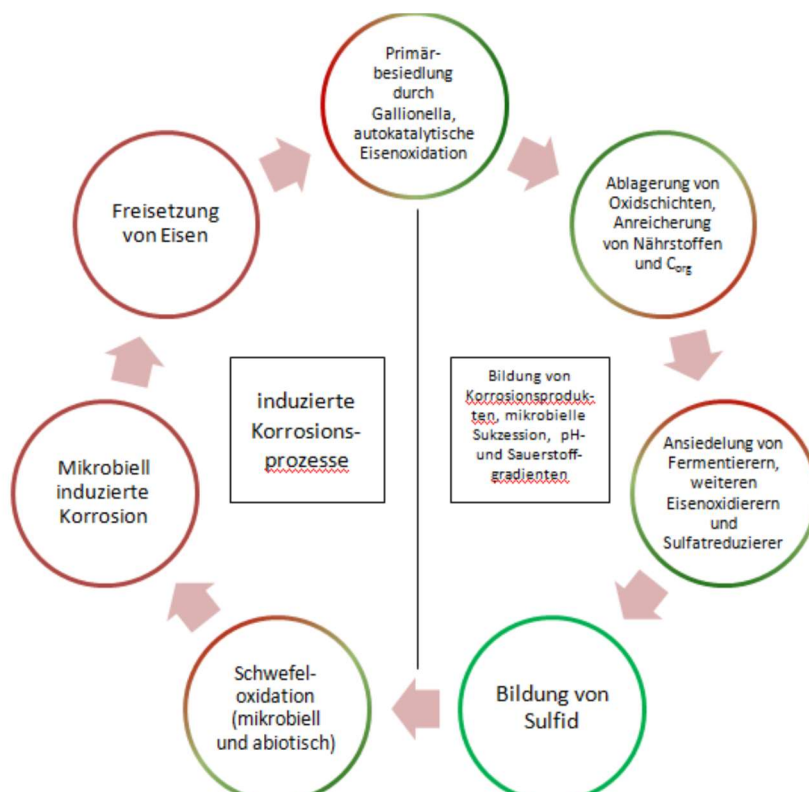


Abb. 6: MIC-Prozesse und mikrobielle Sukzession [26]



1.3.3 Verwendete Fachliteratur und Vorarbeiten

Grundlage für die dargestellten Zusammenhänge sind neben den genannten folgende Quellen:

[33],[25],[27],[32],[34],[30],[28],[24],[29],[1],[35],[26],[36],[37],[38],[31],[39],[40],[23]

1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Durch die Zusammenarbeit mit dem Steinbeis Innovationszentrum Energie+ (SIZ e+) und die gute Vernetzung des Projektteams im EnOB-, EnEff:Stadt und EnBop-Programm sowie HIS kann auf eine Vielzahl Gebäude und Kontakte zurückgegriffen werden. Dies ermöglicht die Untersuchung der Auswirkungen von Belag- und Feststoffbildungsprozessen in hydraulischen Systemen in Demonstrationsgebäuden des EnBau-Programms, die mit besonderen Anforderungen und Leistungen hinsichtlich der Energieeffizienz errichtet wurden, in EnEff:Stadt- und EnEff:Campus-Objekten sowie verschiedenen „konventionellen“, ohne wissenschaftliche Begleitung errichteten Gebäuden.

Weitere Zusammenarbeit bestand mit der Auftragnehmerin Fa. Synavision, die die Online-Qualitätsmanagementplattform „EnergieNavigator“ für die Projektzwecke weiterentwickelt hat. Mitglieder des Projektteams beteiligten sich außerdem in der Normungsarbeit (VDI, BTGA) und in Ausschüssen der GfKorr.

Mit zeitlicher Überschneidung zu dieser Feldstudie wurde ein FuE-Projekt „FeQuan-Monitor“ an der Leuphana im Verbund mit KMU bearbeitet. Es beinhaltete sensor-gestützte Korrosionsuntersuchungen in Echtzeit an definierten Testständen. Im „FeQuan-Monitor“-Projekt wurde die Spezifikation der Messausstattung und der Softwareschnittstelle zur Datenverwaltung und –aufbereitung zur Nutzung in Gebäudekreisläufen vorgenommen. Zu den Forschern dieses Projekts bestand ebenfalls eine Vernetzung. Übernommen wurden die im FeQuan-Projekt optimierten Auswertungs- und Ausgabemethoden.

Außerdem bestand Kontakt zu einer Wasserbehandlungsfirma, deren Produkt Anwendung in einem Gebäude aus der Feldstudie findet, und die die Besichtigung eines Spülvorgangs in einem geschädigten Logistikzentrum ermöglichte.

2. Eingehende Darstellung / Bericht

Die Ergebnisse werden nach den einzelnen Arbeitspaketen Betreiberbefragung (AP1: Betreiberbefragung), Feldanalyse (AP2: Feldanalyse), Schadens- und Potentialanalyse (AP3: Schadens- und Potentialanalyse), Optimierungskonzepte (AP4: Monitoring/Evaluation / Sensor-Feldtest und Optimierungskonzepte (Phase II/III)) sowie Dokumentation und Dissemination (AP5: Dokumentation, Dissemination) aufgeschlüsselt.

2.1 Zusammenfassung

Die Vermeidung von Innenkorrosion in Anlagen der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) und die Schadensbehebung verursachen hohe betriebswirtschaftliche Kosten. Diese Kosten können durch eine korrekte Planung und Inbetriebnahme vermieden und durch eine Überwachung der Wasserqualität dauerhaft gesichert werden. Sowohl für Überwachungswerkzeuge als auch für begleitende Beratung ergibt sich ein bislang wenig ausgestalteter Markt. Im Projekt EQM:Hydraulik wurde der hohe Bedarf an entsprechenden Produkten und Dienstleistungen in der TGA-Branche offenbar. Neben der Ergründung des Problemausmaßes wurde ein Korrosionssensor im Feld getestet. Das übergeordnete Ziel dieses Projekts ist die Qualitätssicherung von TGA-Anlagen, wozu neben der Kapitalerhaltung die Erhaltung der energetischen Performanz zählen.

2.1.1 Wesentliche wissenschaftlich-technische Erkenntnisse

- Von den 64 untersuchten Heiz- und Kühlsystemen wurden anhand eines im Projekt entwickelten Bewertungssystems mit vier Hauptkategorien - gelöste und ungelöste Metalle, Vor-Ort-Parameter wie Sauerstoffgehalt, Leitfähigkeit, pH-Wert, Redoxpotential und errechnete Eisen(II)-Ionenaktivität und Belagbildungs- (Korrosions-) Rate, Salze und Nährstoffe sowie Wasserhärte – 75 % der Kühlsysteme und 50 % der Heizsysteme mit als kritisch oder einen schlechten Zustand aufweisend bewertet.
- Auffällig war, dass keines der mit vollentsalztem Wasser befüllten Systeme kritische oder schlechte, sondern ausnahmslos gute korrosionstechnische Zustände aufwiesen. Bei den anderen Systemen war der Chloridgehalt der vielfach ausschlaggebende Faktor, in Kombination mit eindringendem Sauerstoff und dem sich in der Anlage einstellenden pH-Wert.



- In allen 32 mikrobiologisch untersuchten Anlagen wurden komplexe Bakteriengemeinschaften gefunden, wobei Sulfatreduzierer, Nitratreduzierer, Biofilmbildner, stickstofffixierende Bakterien sowie fermentierende (säurebildende) und schwer abbaubare Substanzen (wie Inhibitoren, aber auch aus Kunststoffmaterialien und Dichtmassen stammende Verbindungen) verstoffwechselnde Organismen häufig gefunden wurden und Korrosionsprozesse beeinflussen können.
- Auffällig war, dass in allen untersuchten, sauerstoffdichten Systemen mit dem Füll- und Nachspeisewasser eingebrachtes Nitrat und Sulfat fast vollständig mikrobiologisch gezehrt wurde (Sulfatdefizit). Die Stoffwechselprodukte Ammonium/Ammoniak sowie Sulfid/elementarer Schwefel sind hochkorrosiv auf Kupfer- und Eisenwerkstoffe und tragen zu den vorgefundenen Korrosionsprozessen bei.
- Es herrscht eine zeitliche Abfolge (Sukzession) der Lebensgemeinschaften vor, bei der zunächst (nach anfänglicher Sauerstoffzehrung) das leichter zu reduzierende Nitrat und nach vollständiger Nitratdepletion (und entsprechender Etablierung Stickstofffixierender Organismen) Sulfat reduziert wird. Die Sulfatreduktion setzt dabei je nach Zusammensetzung der Wasserinhaltsstoffe nach etwa 1-2 Jahren ein und kann verantwortlich für in der Praxis oft erst nach einiger Zeit auftretende Korrosionsprozesse und korrosionsbedingte Betriebseinschränkungen bis hin zu Ausfällen hydraulischer Komponenten sein.
- In allen Anlagen wurden mehr oder weniger hohe Sauerstoffkonzentrationen im Bereich 0,01-0,1 mg/L gefunden. Die Lage des Messpunktes spielte dabei eine untergeordnete Rolle: Die Sauerstoffkonzentrationen als Fließgleichgewichte zwischen eindiffundierendem Sauerstoff und Sauerstoffzehrung waren für die Anlagen charakteristisch und unterschieden sich zwischen unterschiedlichen Anlagen deutlich, innerhalb beispielhaft untersuchter Anlagen jedoch vergleichsweise weniger stark.
- Zudem wurden in sehr vielen Anlagen messbare Eisen(II)-Konzentrationen gefunden, obwohl theoretische Halbwertszeiten von Eisen(II) und Sauerstoff bei den hohen pH-Werten in diesen Anlagen größenordnungsmäßig nur Sekunden betragen sollten. Tatsächlich scheint bei den geringen Sauerstoffkonzentrationen und hohen pH-Werten Diffusionslimitierung aufzutreten, was eine plausible Erklärung für die geringe Variation der Sauerstoffkonzentrationen innerhalb der untersuchten Anlagen und das

gleichzeitige Auftreten gut messbarer Sauerstoff- und Eisen(II)-Konzentrationen darstellt.

- Das getestete Sensorsystem ist in der Lage, viele korrosionstechnische Parameter sowie die Menge an primären Korrosionsprodukten empfindlich zu erfassen. Es ist in der Lage, neben der Sauerstoffkonzentration auch eine Abschätzung der Sauerstoffzehrung und damit der Lage des Fließgleichgewichts und der Stärke der Korrosionsprozesse an zentraler Stelle der Anlage zu geben. Die mit Laboranalysen vergleichenden Untersuchungen in Phase I und II zeigten vielfach annähernd analytische Genauigkeiten der Berechnungsmethode, allerdings reagiert das System empfindlich auf mikrobiologische Veränderungen der Wasserchemie, die häufig reduzierend wirken und einen erhöhten Sensorresponse zur Folge haben. In einem Fall wurde ein plötzliches Divergieren des Sensorsignals und der analytisch bestimmten Werte bei hohen Konzentrationen biotisch gebildeter organischer Säuren beobachtet, das jedoch den späteren Gleichgewichtszustand vorwegnahm. In vielfacher Hinsicht kann daher von einer Frühwarnfunktion des Systems ausgegangen werden, da aufkommende mikrobiologische Korrosion frühzeitig und abklingende Eisengehalte ebenfalls frühzeitig erfasst wurden.
- Die Energieeffizienz der Systeme wird durch verringerte Wärmeübergänge negativ beeinflusst. Dies führt insbesondere bei Kesselanlagen und BHKW durch erhöhte Abgastemperaturen und geringere Brennwertnutzung direkt zu entsprechenden Mehrverbräuchen. Durchflussreduktion bspw. in Ventilen führt zu einem nicht mehr gegebenen hydraulischen Abgleich und zunächst geringerer Wärmeübergabe, durch die Regelantwort des Systems jedoch zu erhöhtem Durchfluss und entsprechend höheren Rücklauftemperaturen, wiederum mit Folgen für die Wärmeübergabe am Wärmetauscher und damit zu Effizienzverlusten und geringeren COP bei Wärmepumpen. Die Auswirkungen sind teilweise deutlich und können zu erheblichem Mehrverbrauch führen.
- Weiterhin für die Praxis in besonderem Maße relevant sind die erheblichen Kosten für Korrosionsvorsorge, Sanierung und Nutzungseinbußen.



2.2 AP1: Betreiberbefragung

Zu Beginn der Projektlaufzeit erfolgte eine Umfrage hinsichtlich der Erfahrungen und Kenntnisse bzgl. Korrosionsvorgängen in TGA-Systemen und ihren Folgen, deren Ergebnisse im Folgenden zusammengefasst und diskutiert werden.

2.2.1 Zielsetzung

Über das Thema der Korrosion in hydraulischen Systemen ist in der Praxis wenig bekannt. Tangierte Fachleute erlangen –so die Annahme– hiervon erst durch eigene Erfahrungen Kenntnis, wenn sie eigene Erfahrungen machen (Schadensfälle) oder sich vor der Inbetriebnahme mit den vorhandenen einschlägigen Regeln auseinandersetzen (z.B. VDI 2035). Die Befragung verfolgt daher im Wesentlichen folgende Ziele:

- Eruierung des vorhandenen Kenntnisstandes bei den Verantwortlichen und Handelnden
- Sensibilisierung für das Thema
- Auffinden von potenziellen Partnern, die mit einem Gebäude bei der Feldstudie mitwirken möchten

2.2.2 Konzeption und Durchführung

Die Befragung wird als Online-Umfrage mit SurveyMonkey organisiert, siehe Abb. 7. Alle Interessierten können die Umfrage via Webbrowser aufrufen und sich beteiligen. Neben vorgegeben Antworten sind individuelle Eingaben möglich. Prinzipiell ist eine anonyme Teilnahme möglich. Auf freiwilliger Basis können aber auch Kontaktdaten hinterlassen werden, wenn Teilnehmende Interesse an einer Mitwirkung im Forschungsvorhaben haben oder über den Fortschritt im Projekt informiert werden möchten (Teilnahme mit einem zu untersuchenden Gebäude, Teilnahme bei Workshops, Newsletter). Jede(r) Befragte wird hinsichtlich ihrer/seiner Funktion im Gebäudebereich befragt (Property-Manager, Planer*in, Betreiber*in bzw. Facility-Manager, Wasserbehandler*in, etc.). Neben Fragen zum Kenntnisstand, werden persönliche Einschätzungen zum Schadenspotential und das Vorhandensein standardisierter Handlungsanweisungen für Wartung und Schadensbeseitigung abgefragt.

Es ist davon auszugehen, dass es sich um keine repräsentative Befragung handelt, da die Befragten nicht zufällig aus einer repräsentativen Gruppe ausgewählt wurden. Vielmehr dürften Personen teilgenommen haben, die mindestens von dem Thema tangiert sind. Der Aufruf zur Teilnahme erfolgte in Form der ersten Veröffentlichungen und Ankündigungen im Rahmen des Forschungsprojektes, die sich an einen entsprechend interessierten Personenkreis

wendet. Eine detaillierte Aufführung der Fragen und Ergebnisse findet sich im Anhang, Abschnitt 3.

EQM: Hydraulik - Energie- und Qualitätsmanagement gegen Korrosion und Belagbildung in hydraulischen Systemen

Gefördert durch:

LEUPHANA
UNIVERSITÄT LÜNEBURG

siz energie+

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Zu Ihrer Person

Typ Ihres Unternehmens
Für welche Art von Unternehmen/Institution arbeiten Sie?

- ☐ Eigentümer privat
- ☐ Eigentümer öffentlich
- ☐ Projektentwicklung
- ☐ Architekturbüro
- ☐ Fachplaner Technische Gebäudeausrüstung
- ☐ Errichter Technische Gebäudeausrüstung
- ☐ Facility Management
- ☐ Forschung
- ☐ Sonstiges (bitte angeben)

Ihre Rolle
Ich betreue Gebäude als...

- ☐ Property Manager/-in (strategische Tätigkeit kaufmännisch, juristisch etc.)
- ☐ Facility Manager/-in (operativ/technische Tätigkeit)

Abb. 7: Screenshot der webbasierten Umfrage

2.2.3 Auswertung

in den folgenden Abschnitten werden die Einzelfragen zu Themenfeldern gruppiert und Antworten entsprechend zusammengefasst. Eine Bewertung erfolgt im Abschnitt 0.

Teilnahme

Von den Personenkreisen, die mit Planung, Errichtung der Betrieb der Gebäude befasst sind, finden sich die meisten der Umfrage aus dem Kreis der Property-Manager, Facility-Manager und Fachplaner*innen. 76 % aller Befragten haben bereits Erfahrung mit Korrosion



in hydraulischen Systemen gemacht und ein fast ebenso großer Anteil hat auch Probleme im Gebäudebestand durch Korrosion. Es haben insgesamt 55 Personen teilgenommen.

Kooperationswille

Unter den Befragten fand sich niemand, der oder die mit einem Gebäude an dem Forschungsprojekt teilnehmen wollte. Allerdings fanden sich im Projektverlauf aus den bereits geknüpften Kontakten genügend Kooperationspartner deren Gebäude in die Feldstudie aufgenommen wurden. Die Befragten, die Ihre Kontaktdaten hinterließen, wurden schriftlich kontaktiert, auf laufende Veröffentlichungen hingewiesen und aufgefordert, mit dem Projektteam in Kontakt zu treten, wenn Sie weiterhin an einer Kooperation oder einem Wissensaustausch interessiert sind. Es gab Rückmeldungen von zwei etablierten Herstellern von Kunststoff basierten (diffusionsoffenen) Flächenkühlsystemen, die zu den Workshops zum Erfahrungs- und Wissensaustausch eingeladen wurden.

Schadensumfang

Das Schadenspotential wird als „hoch“ eingeschätzt. Die Mehrzahl ist der Ansicht, dass potenziell alle Bauteile von Korrosion betroffen sind und es seien überwiegend erhebliche Schäden bei nur leichten Nutzungseinschränkungen zu erwarten. Ein Drittel sieht das Risiko „hoher“ oder „sehr hoher“ finanzieller Schäden.

Ursachen

Die meisten Befragten (76 %) sind sich darüber einig, dass eine falsche Materialauswahl die Hauptursache für Korrosion sei. Als bedeutend aber der Materialauswahl nachrangig wird der Sauerstoffeintrag angesehen. Mikrobakterielle Vorgänge und zu geringer Betriebsdruck werden hingegen kaum als Ursache in Betracht gezogen.

Kompetenzen zur Korrosionsvermeidung

Ein großer Anteil der Befragten (76 %) sehen keine oder eine geringe Kompetenz bei den Fachplanern zur Vermeidung von Korrosion, fast alle Befragten haben das gleiche Bild von den Errichtern. Niemand traut einem FM entsprechende Kenntnisse zu. Nur 30 % fühlen sich in Korrosionsfragen kompetent beraten.

Vermeidungs- und Schadensmanagement

Die überwiegende Anzahl (80 %) berichten von fehlenden Wartungsanweisungen zur Vermeidung von Korrosion. Am häufigsten wird im Gebäudebetrieb das Thema Korrosion ignoriert und es wird nichts zu seiner Vermeidung unternommen. In wenigen Fällen kommt zur Korrosionsvermeidung VE-Wasser zum Einsatz, es werden baulichen Veränderungen vorgenommen oder Korrosionsinhibitoren eingesetzt. Messtechnik zur Überwachung des Umlaufwassers kommt fast gar nicht zum Einsatz. Die VDI 2035 beachten nur 50 % der Befragten. 80 % der Befragten berichten über ein fehlendes Schadensmanagement.

Bewertung

Die anfängliche Vermutung, dass keine ausreichende Kompetenz zur Korrosionsvermeidung bei den Verantwortlichen besteht, wurde bestätigt. Sowohl hinsichtlich der Schadensvermeidung als auch der Schadensbeseitigung besteht bei allen Beteiligten im Allgemeinen Ratlosigkeit, obgleich die korrosionsbedingten Risiken als „hoch“ eingeschätzt werden. Hier besteht eine große Diskrepanz zwischen Anspruch und Realität. Bei den Ursachen wird der Sauerstoffeintrag als bedeutendste Einflussfaktor angesehen. Diese Erkenntnis lässt sich aus der VDI 2035 Blatt 2 ableiten, in der die Vermeidung des Sauerstoffeintrages oberste Priorität eingeräumt wird. Ebenso lässt sich aus dieser Regel die falsche Materialauswahl als Ursache ableiten. Die Erkenntnisse im Forschungsvorhaben bestätigen die Bedeutung des Sauerstoffeintrages, aber weniger hinsichtlich der Materialauswahl: Die in der VDI-Regel genannte Bimetallkorrosion hat nach wasserchemischen Erkenntnissen nur geringfügige Bedeutung, da sich letztendlich auch auf unterschiedlichen Metall-Oberflächen Passivierungsschichten mit einem ähnlichen elektrochemischen Potential einstellen. Lediglich bei der Kombination von unlegiertem Stahl und Kupfer kann es durch Korrosionspartikel im Umlaufwasser zu einer gegenseitigen Förderung der Korrosion kommen.

Obwohl die Bedeutung des Sauerstoffeintrages richtig erkannt wurde, wird der Druckhaltung keine besondere Bedeutung beigemessen. Dabei ist der Sauerstoffeintrag die direkte Folge einer mangelhaften Druckhaltung.

Die Bedeutung mikrobiologischer Vorgänge wird von den Befragten unterschätzt. Die Feldstudie hat gezeigt, dass sich besonders in Kühlsystemen fast immer Mikroorganismen fanden, die einen Einfluss auf Korrosionsvorgänge haben (siehe 2.3).

Es zeigt sich die Notwendigkeit, Wissenslücken zu schließen und den Handelnden Werkzeuge an die Hand zu geben, um die Korrosionsrisiken zu minimieren. Das mit diesem Projekt entwickelte Weißbuch soll diese Aufgabe übernehmen.



2.3 AP2: Feldanalyse

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden Gebäude für die Feldanalyse ausgewählt und beprobt (2.3.1), die allgemeinen Untersuchungsergebnisse der Probenahmen ausgewertet (2.3.3) und der Zustand sowie die Historie der Gebäude nach einer Checkliste analysiert (2.3.4). Es folgen die Betrachtung einiger Fallbeispiele (2.3.5) und die Diskussion mikrobiologischer Erkenntnisse (2.3.6).

2.3.1 Gebäudeauswahl und Probenahmen

Die Auswahl der Gebäude fiel auf folgende Objekte und wurde an den gelisteten Tagen beprobt (Tab. 3, Daten anonymisiert).

Tab. 3 Übersicht aller Probenahmen

Gebäude	Kürzel	Kreis	Ort	Datum
1	1.1_K	Kühl	Amsterdam	13.07.2015
1	1.2_H	Heiz	Amsterdam	13.07.2015
1	16.1_H	Heiz	Amsterdam	01.06.2016
1	16.2_K	Kühl	Amsterdam	01.06.2016
1	16.3_H	Heiz	Amsterdam	01.06.2016
1	16.4_K	Kühl	Amsterdam	01.06.2016
2	16.5_K	Kühl	Amsterdam	01.06.2016
2	16.6_H	Heiz	Amsterdam	01.06.2016
2	16.7_K	Kühl	Amsterdam	01.06.2016
2	16.8_H	Heiz	Amsterdam	01.06.2016
2	16.9_K	Kühl	Amsterdam	01.06.2016
3	3.1_H	Heiz	Brüssel	21./22.09.2015
3	3.10_K	Kühl	Brüssel	21./22.09.2015
3	3.2_K	Kühl	Brüssel	21./22.09.2015
3	3.3_H	Heiz	Brüssel	21./22.09.2015
3	3.4_K	Kühl	Brüssel	21./22.09.2015
3	3.5_H	Heiz	Brüssel	21./22.09.2015

3	3.6_K	Kühl	Brüssel	21./22.09.2015
3	3.7_H	Heiz	Brüssel	21./22.09.2015
3	3.8_K	Kühl	Brüssel	21./22.09.2015
3	3.9_H	Heiz	Brüssel	21./22.09.2015
5	5.1_H	Heiz	Bremen	10.12.2015
6	6.1_H	Heiz	Norderstedt	19./26.01.2016
6	6.2_K	Kühl	Norderstedt	19./26.01.2016
6	6.3_K	Kühl	Norderstedt	19./26.01.2016
6	6.4_K	Kühl	Norderstedt	19./26.01.2016
6	6.5_H	Heiz	Norderstedt	19./26.01.2016
6	6.6_H	Heiz	Norderstedt	19./26.01.2016
6	6.7_K	Kühl	Norderstedt	19./26.01.2016
6	6.8_H	Heiz	Norderstedt	19./26.01.2016
6	2.1_K	Kühl	Norderstedt	26.08.2015
7	7.1_H	Heiz	Holzminden	24.02.2016
7	7.2_K	Kühl	Holzminden	24.02.2016
7	7.3_H	Heiz	Holzminden	24.02.2016
8	8.1_H	Heiz	Rheine	08.03.2016
9	9.1_H	Heiz	Gelsenkirchen	09.03.2016
9	9.2_H	Heiz	Gelsenkirchen	09.03.2016
9	9.3_K	Kühl	Gelsenkirchen	09.03.2016
9	9.4_K	Kühl	Gelsenkirchen	09.03.2016
10	10.1_K	Kühl	Berlin	19.04.2016
10	10.2_H	Heiz	Berlin	19.04.2016
10	4.1_H	Heiz	Berlin	17.11.2015
10	4.2_K	Kühl	Berlin	17.11.2015
11	11.1_HK	Kombi	Berlin	20.04.2016



11	11.2_K	Kühl	Berlin	20.04.2016
11	11.3_K	Kühl	Berlin	20.04.2016
12	12.1_H	Heiz	Berlin	26./27.04.2016
12	12.2_H	Heiz	Berlin	26./27.04.2016
12	12.3_K	Kühl	Berlin	26./27.04.2016
12	12.4_HK	Kombi	Berlin	26./27.04.2016
12	12.5_HK	Kombi	Berlin	26./27.04.2016
12	12.6_HK	Kombi	Berlin	26./27.04.2016
12	12.7_HK	Kombi	Berlin	26./27.04.2016
12	12.8_HK	Kombi	Berlin	26./27.04.2016
13	13.1_K	Kühl	Norderstedt	18.05.2016
13	13.2_K	Kühl	Norderstedt	18.05.2016
13	13.3_H	Heiz	Norderstedt	18.05.2016
14	14.1_H	Heiz	Düsseldorf	24.05.2016
14	14.2_K	Kühl	Düsseldorf	24.05.2016
15	15.1_K	Kühl	Lingen	25.05.2016
17	17.1_K	Kühl	Hannover	10.08.2016
17	17.2_K	Kühl	Hannover	10.08.2016
17	17.3_K	Kühl	Hannover	10.08.2016
18	18.1_HK	Kombi	Hamburg	23.08.2016

2.3.2 Methodik

Phase I umfasste die einmalige Untersuchung der Gebäude auf wasserchemische und Feldparameter sowie in 32 Gebäuden mikrobiologisch entsprechend des Arbeitsplans. Für die Erfassung der Feldparameter wurde ein im Projekt FeQuan-Korrosionssensor entwickelter Analysekit verwendet, der eine unbeeinflusste Messung des Anlagenwassers erlaubt. Die anfänglich genutzten Anschlussschläuche aus Edelstahl-Wellrohr wurden jedoch aufgrund starker Verschmutzung und schlechter Entfernbarkeit von Ablagerungen durch austauschba-

re PVC-Schläuche ersetzt. Die Eindiffusion von Sauerstoff und hierdurch entstehende Messfehler wurden mittels Vergleichen mit festinstallierten Sensoren sowie rechnerisch ermittelt. Der Vergleich ergab Abweichungen $< 5 \mu\text{g/L}$ Sauerstoff im Rahmen der allgemeinen Messunsicherheit, die rechnerische, ohne Sauerstoffzehrung einbeziehende Bewertung der Eindiffusion ließ auf Konzentrationserhöhungen von $< 1 \mu\text{g/L}$ schließen. Hierdurch resultierende Messfehler konnten entsprechend ausgeschlossen werden. Die ansonsten nicht den Regeln der Technik entsprechenden Schläuche konnten daraufhin temporär zur Messung der Feldparameter in den untersuchten Anlagen verwendet werden. Als wesentlich insbesondere für die anspruchsvolle Sauerstoffmessung muss die Nullpunktkalibrierung genannt werden, die wie in vorangegangenen Arbeiten der Autoren mit alkalischer Ascorbinsäure durchgeführt wurde. Weitere Details sind in den Veröffentlichungen zum Projekt dargestellt (Opel et al. 2018). Abb. 8 zeigt eine typische Probenahmesituation.



Abb. 8: Probenahme in einem untersuchten Objekt

2.3.3 Allgemeine Ergebnisse

Die Untersuchungsergebnisse bestätigen im Wesentlichen die Hypothesen des Projekts: Wenngleich es ganz offenbar eine Vielzahl an problemlos funktionierenden Systemen gibt, bestehen insbesondere in Kühlsystemen große Unsicherheiten bezüglich korrosionstechnisch sachgemäßem Betrieb (Abb. 9). Als Ursachen dafür kann insbesondere der Mangel an Regelwerken für Füllwasser der Kühlsysteme und mikrobielle Korrosion gelten. In der Folge

fehlender spezifischer technischer Regeln werden Kühlsysteme in der Praxis oft mit (bei entsprechender Rohwasserqualität aber unproblematischem), nicht aufbereitetem oder nach der (für Heizsysteme anzuwendenden) VDI 2035 mit enthärtetem Wasser gefüllt, was korrosionstechnisch gegenüber salzarmem Wasser nachteilig ist. Hierbei wirkt nicht nur Chlorid korrosiv, sondern insbesondere auch die Verfügbarkeit von Sulfat für mikrobiologische Prozesse (Schwefelkorrosion). Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Verfügbarkeit organischen Kohlenstoffs.

So ergeben sich für Sauerstoff in Verbindung mit Chlorid für abiotische Korrosion einerseits und Sulfat sowie organischen Kohlenstoff für mikrobiologische Korrosion andererseits zwei wesentliche, durch die Verwendung salzarmen Wasser gut in der Praxis einzuschränkende Korrosionsrisiken.

Ein wesentlicher Output des Projekts wurde daraufhin verwendet, Irrtümer in Bezug auf die Verwendung vollentsalzten Wassers in geschlossenen Anlagen auszuräumen, insbesondere der oft niedrige pH-Wert, der bei Messung in einer aus der Anlage entnommenen Probe durch das Vorhandensein gelösten Eisens bei Kontakt mit Sauerstoff auftreten kann. Dabei liegt in der Anlage oft ein den technischen Regeln entsprechender pH-Wert vor, der durch die Oxidation geringster Mengen Eisen(II) zur dissoziierenden Kationensäure Eisen(III) bei Entnahme aus der Anlage bei Wasser mit geringer Pufferkapazität um 2-3 pH-Stufen abfallen kann.

Die Ergebnisse der Feldstudie sind im Detail in den Veröffentlichungen zum Projekt dargestellt. Insgesamt befanden sich über 75 % der Kühlanlagen und knapp 50 % der Heizanlagen in einem kritischen oder schlechten Zustand. Anlagen mit vollentsalztem Wasser wiesen einen durchgehend guten Zustand auf (Abb. 9; Opel et al. 2018).

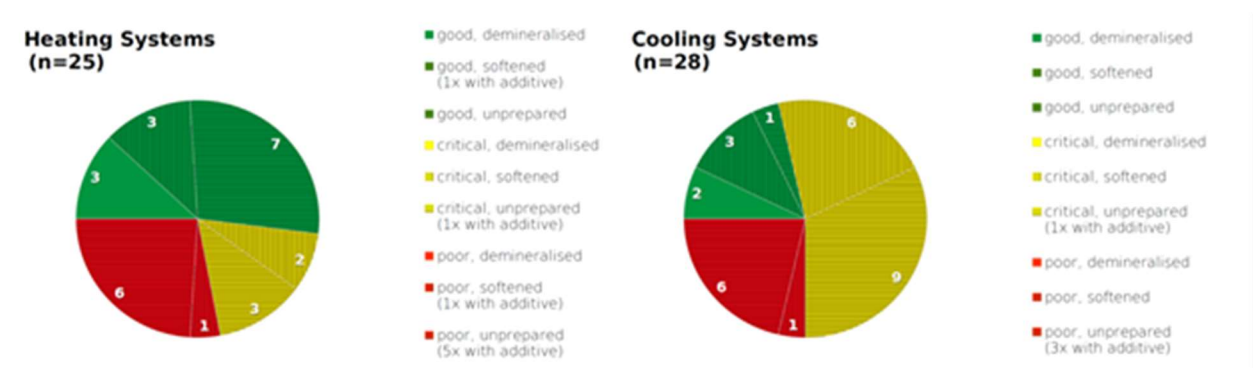


Abb. 9: Beurteilung der untersuchten Anlagen nach einem Ampelschema

Anlagen mit < 15 mg/L Chlorid wiesen allesamt Gelösteisenkonzentrationen < 0,1 mg/L und entsprechend gute Zustände auf. Anlagen > 15 mg/L Chlorid können verstärkte Korrosion zeigen, wenn gleichzeitig Sauerstoff in ausreichender Menge eingetragen wird (Abb. 10).

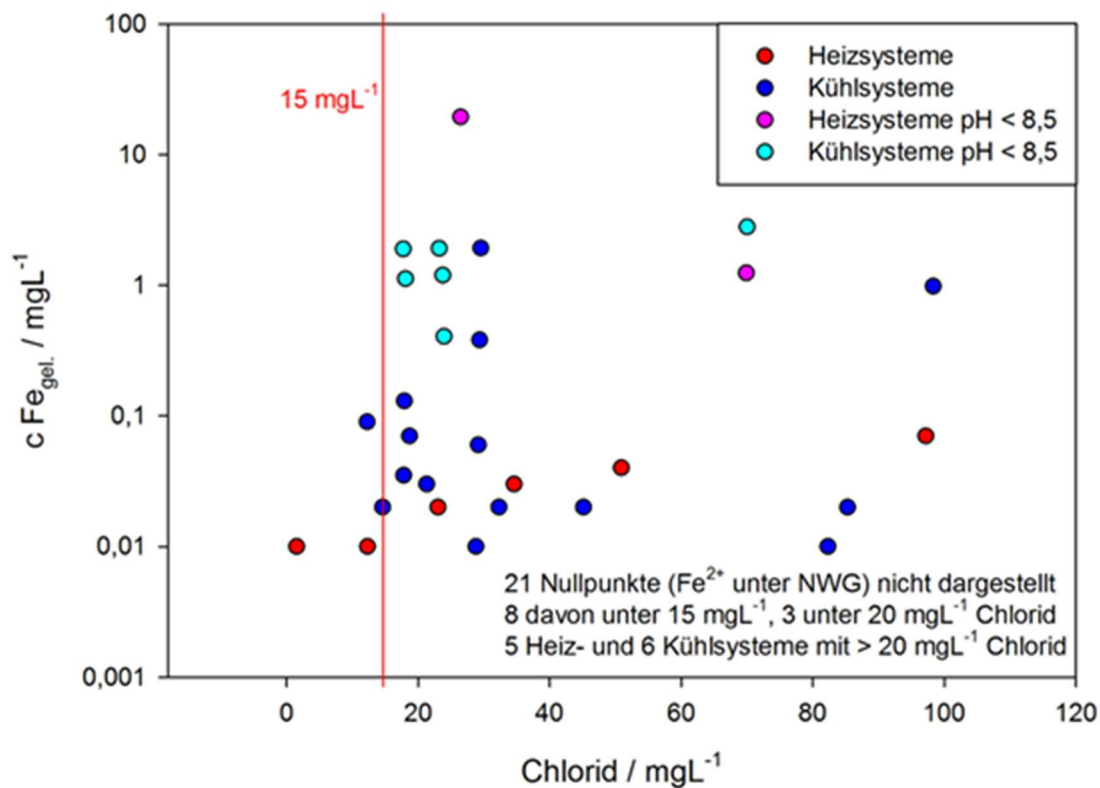


Abb. 10: Gelösteisenkonzentration in Relation zum Chloridgehalt

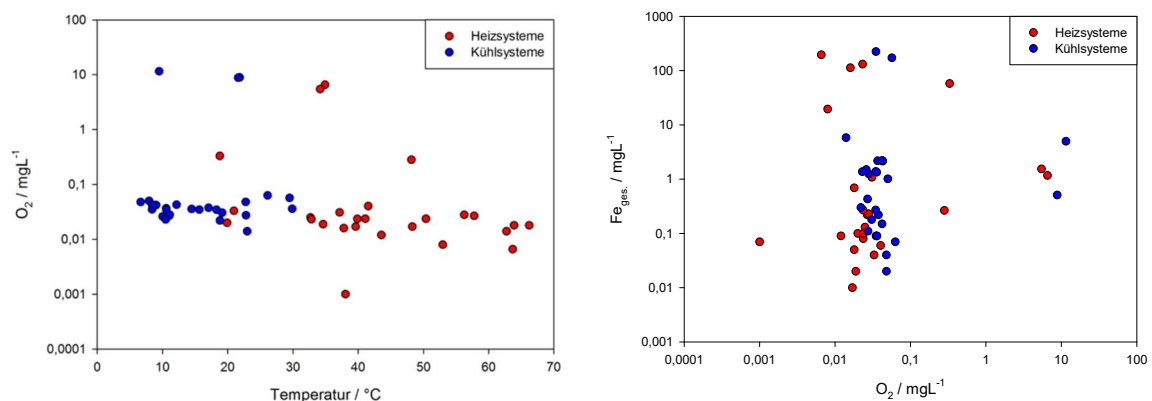


Abb. 11: Sauerstoffgehalt in Relation zur Temperatur und Gesamteisenkonzentration in Relation zum Sauerstoffgehalt

Die Korrosionsneigung zeigte keinen direkten Bezug zur Sauerstoffkonzentration, es konnte jedoch in allen Systemen Sauerstoff im Bereich 10-100 µg/L (in korrosionstechnisch geschlossenen Anlagen) gefunden werden (Abb. 11). Die Sauerstoffkonzentration muss als Ergebnis der Menge eindiffundierenden Sauerstoffs und Sauerstoffzehrung durch Korrosionsprozesse gesehen werden. EPDM-Schläuche und andere diffusionsoffene Kunststoffe zeigten sich als häufige Ursache verstärkter Korrosion.



Der pH-Wert zeigte sich dem Stand des Wissens entsprechend als wichtiger, auch indikativer Parameter für Korrosion (Abb. 12).

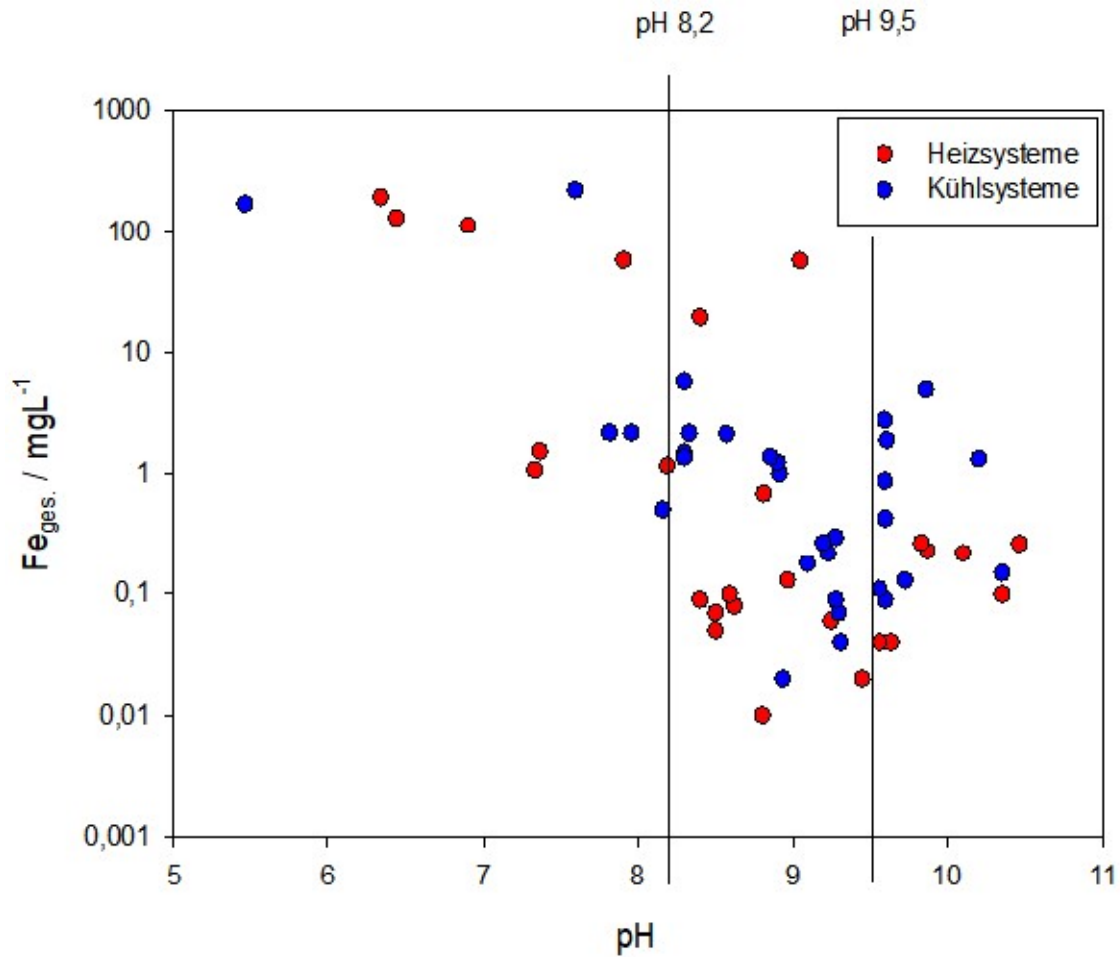
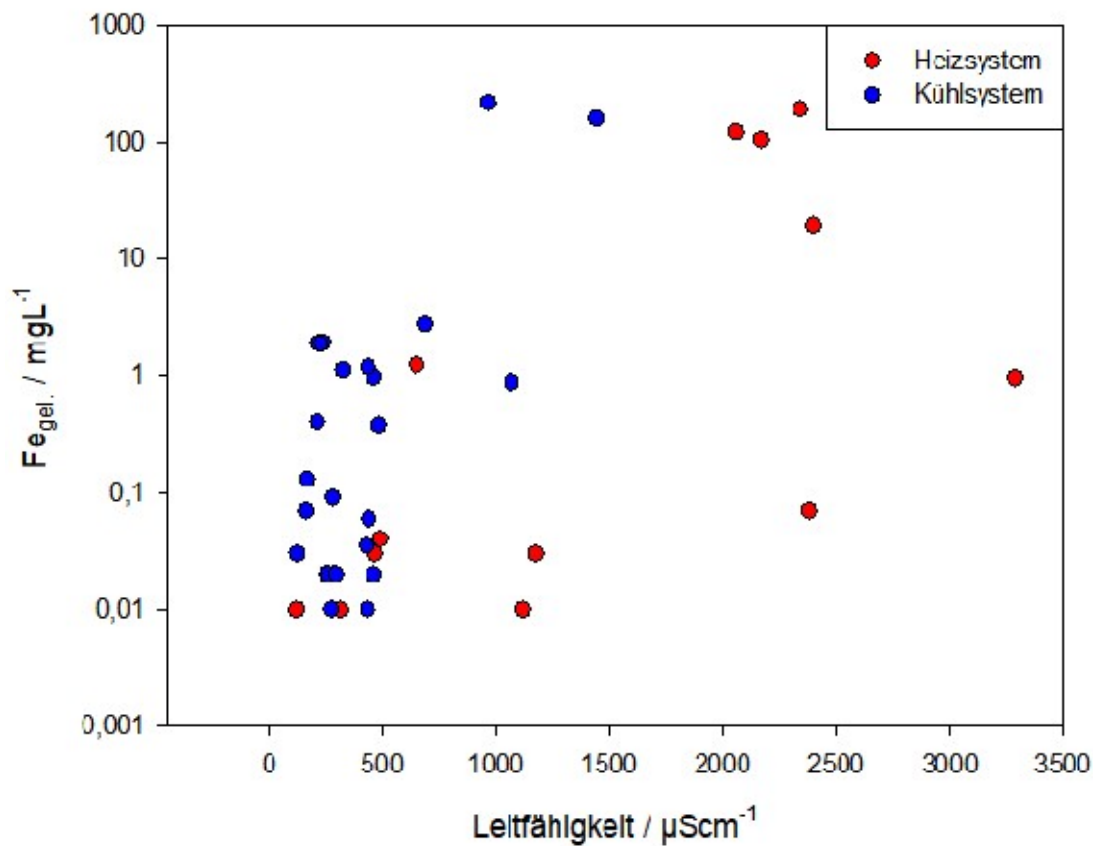


Abb. 12: Gesamteisenkonzentration in Relation zum pH-Wert

Die elektrische Leitfähigkeit zeigte ebenfalls einen Einfluss der jedoch nicht direkte Folge der Leitfähigkeit, sondern des Chlorids- und Sulfatgehalts, ggf. des Nitratgehalts ist. Bis 500 $\mu S/cm$ werden oft gute korrosionstechnische Zustände gefunden (Abb. 13).



Heizsysteme sind weniger auffällig in Bezug auf Korrosion und eher aufgrund der Überschreitung der zulässigen Gesamthärte des Umlaufwassers. Besonders in Neubauten ist Korrosion der hydraulischen Systeme ein ernst zu nehmendes Problem. Das Problembewusstsein nimmt in der Branche zu, jedoch ist es zumeist schwer abschätzbar, ob ein System mit überschrittenen Grenzwerten wieder in den Toleranzbereich zurückkehrt oder sich weiter verschlechtert.

Salze und hauptsächlich Chlorid stellt in unaufbereiteten Umlaufwässern eine der Hauptursachen für korrosive Vorgänge dar. Der im Rahmen des Projekts erarbeitete, empfohlene Grenzwert von 15 mg/L hat sich ohne Ausnahme in der Feldstudie bestätigt (unter diesem Grenzwert gibt es keine Kreisläufe mit hohen Metallgehalten). Dieser Wert wurde in die neue BTGA-Regel 3.003 aufgenommen. Des Weiteren konnte anhand der Daten aus der Feldstudie auch ein deutlicher Zusammenhang zwischen dem (in der Betonherstellung gebräuchlichen) Cl-/OH- Verhältnis und der Eisen(II)-Konzentration aufgezeigt werden, was dem Einfluss des pH-Werts und Chlorid bei Anwesenheit von Sauerstoff entspricht.



Ein ebenfalls hervorzuhebendes Ergebnis sind die negativen Folgen falsch angewendeter Inhibitoren (erhöhte Eisenwerte, Inhibitor führt selbst zu Ablagerungen). Es wurden häufig überdurchschnittlich stark von Korrosion betroffene Systeme vorgefunden, in denen sich Inhibitoren in nicht ausreichender Konzentration befinden. Die schlechtesten Systemzustände wurden in Systemen mit falsch angewendeten Inhibitoren, Frostschutzmittelresten und mit diffusionsoffenen Kunststoffen festgestellt.

In Bezug auf Bakterien wurde in sauerstoffdichten Systemen durch die Zehrung von Sulfat- und Nitrat-Gehalten zu mikrobakterieller Aktivität kommen. Sulfat und Nitrat werden gezehrt, die Stoffwechselprodukte Sulfid und elementarer Schwefel sowie Ammoniak (insbesondere bei Kupferleitungen) fördern die Korrosion. In mehreren korrosiven Systemen konnte über einen längeren Zeitraum nachgewiesen werden, wie Sulfat- und Nitrat-Gehalte vollständig gezehrt wurden. In einem Kreislauf wurde die Produktion von korrosiver Essigsäure durch Bakterien nachgewiesen. Weiterhin spielen stickstofffixierende Organismen offenbar eine Rolle, da sie den pH-Wert absenken können.

2.3.4 Analyse des Anlagenzustands und der –historie

Die Analyse des Anlagenzustands umfasste hydrochemische und grundlegende mikrobiologische Untersuchungen (für ausgewählte Kreisläufe) sowie die bauteilaufgelöste Aufnahme der Anlagentechnik und verwendeten Materialien nach einer Check-Liste. Der Online-Check (Tab. 4) wurde für die Datenerfassung entwickelt und ermöglicht eine strukturierte Auditierung von Anlagen und eine übergreifende Auswertung.

Tab. 4 Übersicht der geprüften Parameter beim Online-Check

Parameter	Hinweis zur Erhebung
Anlagendruck	Am höchsten Punkt und an der Saugseite einer möglichst hoch Pumpe
Art der Druckhaltung	Membranausdehnungsgefäße: Hersteller, Typ Volumen, Funktion (Vordruck prüfen, Membran prüfen durch Betätigung des Ventils: wenn Wasser rauskommt: defekt) Automatische Druckhaltungs- und Nachspeisesysteme: Hersteller, Typ, eingestellte Werte, Funktion, Warnmeldungen wegen Funktionsstörungen, Alarmer aufgeschaltet auf GLT?
Entgasung	Entgasungssysteme: Hersteller, Typ, eingestellte Werte, Funktion, Warnmeldungen wegen Funktionsstörungen, Alarmer aufgeschal-

	tet auf GLT?
Nachspeisung	Manuell/automatisch, wenn manuell: Intervall
	Nachspeisemenge
	Art des Nachspeisewassers (LW, Enthärtet, VE)

2.3.5 Fallanalysen

Im Folgenden werden verschiedenen Fälle dargestellt, die im Rahmen der Feldstudie beobachtet und analysiert wurden.

Erwünschtes Systemverhalten nach Inbetriebnahme

In diesem Beispiel wird aufgezeigt wie sich ein System idealerweise bei der Inbetriebnahme verhält. Das Wasser alkalisiert nach der Befüllung durch die anfänglichen Korrosionsprozesse von alleine, siehe Abb. 14. Nach einem Jahr befindet sich der pH-Wert im zulässigen Bereich. Die anfänglich gesetzte Obergrenze von 8,5 resultierte aus der fälschlichen Annahme, dass sich Aluminium in dem System befindet. Die gelösten Metalle, die aktive Korrosionsvorgänge anzeigen sind ausgefallen und haben sich abgesetzt. Sie sind nach einem Jahr nicht mehr nachweisbar. Auch der Sauerstoffgehalt ist von anfänglich 0,33 mg/l auf 0,02 mg/l durch die korrosionsbedingte Zehrung gefallen. Auch die Mikrobiologie passt sich während des Inbetriebnahmeprozesses an, siehe Abb. 16. Nach anfänglicher Sauerstoffzehrung sind Nitratreduzierer nachweisbar, die das in dem Umlaufwasser vorhandene Nitrat reduzieren. Wenn dieses gezehrt wurde etablieren sich Sulfatreduzierer. Nach der Sulfatdepletion können Stickstofffixierer, Nitratreduzierer, Schwefeloxidierer und Sulfatreduzierer in unterschiedlichen Anteilen vorkommen und komplexe Lebensgemeinschaften bilden. Diese Prozesse erhöhen das Korrosionsrisiko. Durch die Sulfatreduzierung entsteht elementarer Schwefel, bei der Stickstofffixierung werden Säuren freigesetzt, die der korrosionsschützenden pH-Wert Anhebung entgegenstehen. Nitratreduzierer bilden Ammoniak, das auf Kupfer korrosiv wirkt. Auch wenn das Umlaufwasser trotzdem im alkalischen Bereich bleibt kann unter Biofilmen ein saures Milieu entstehen, das die lokale Korrosion befördert.

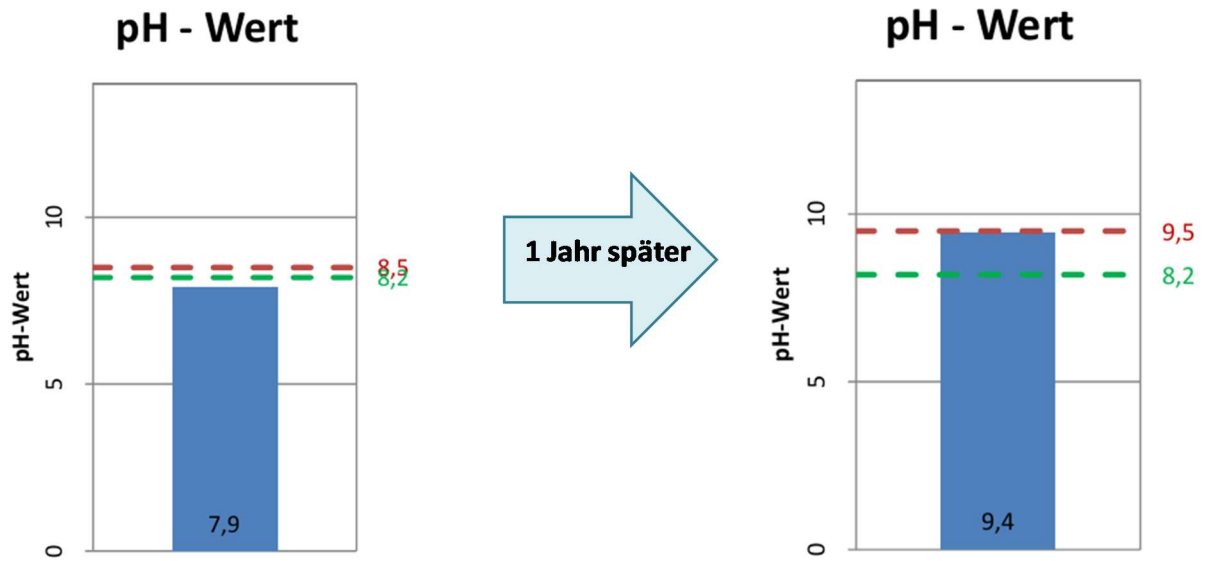


Abb. 14: Sekundär-Kühlsystem, Sauerstoff-diffusionsdicht

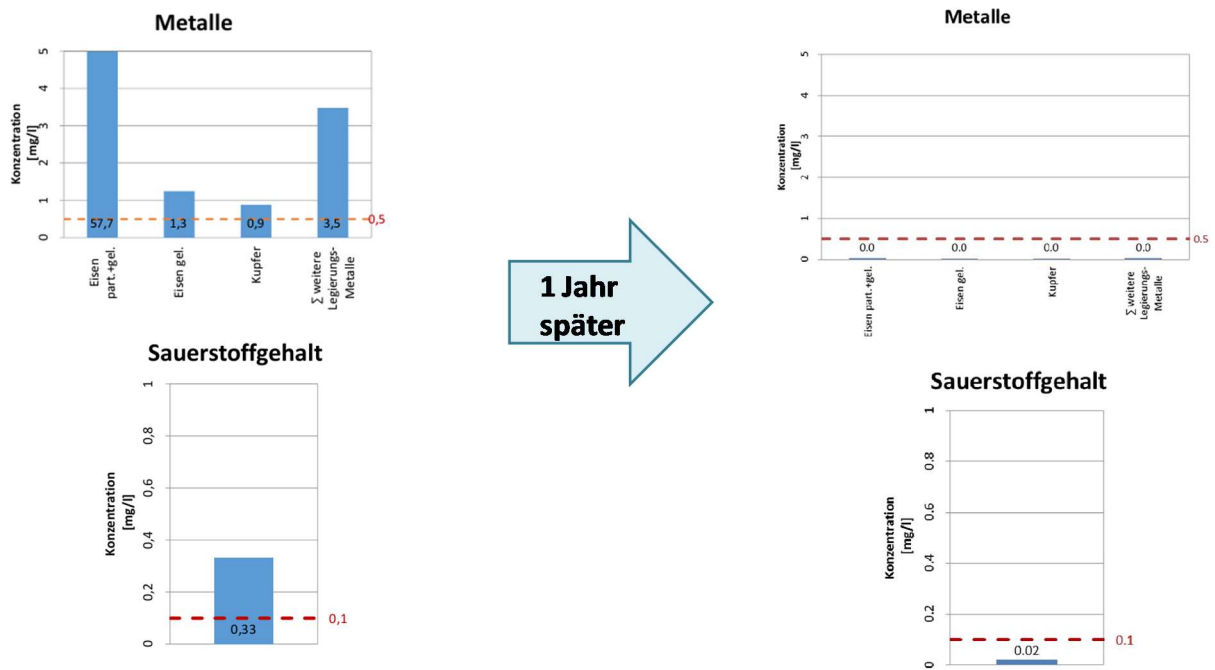


Abb. 15: Sauerstoff wurde gezehrt, Korrosionsprodukte sind ausgefallen und wurden abfiltriert

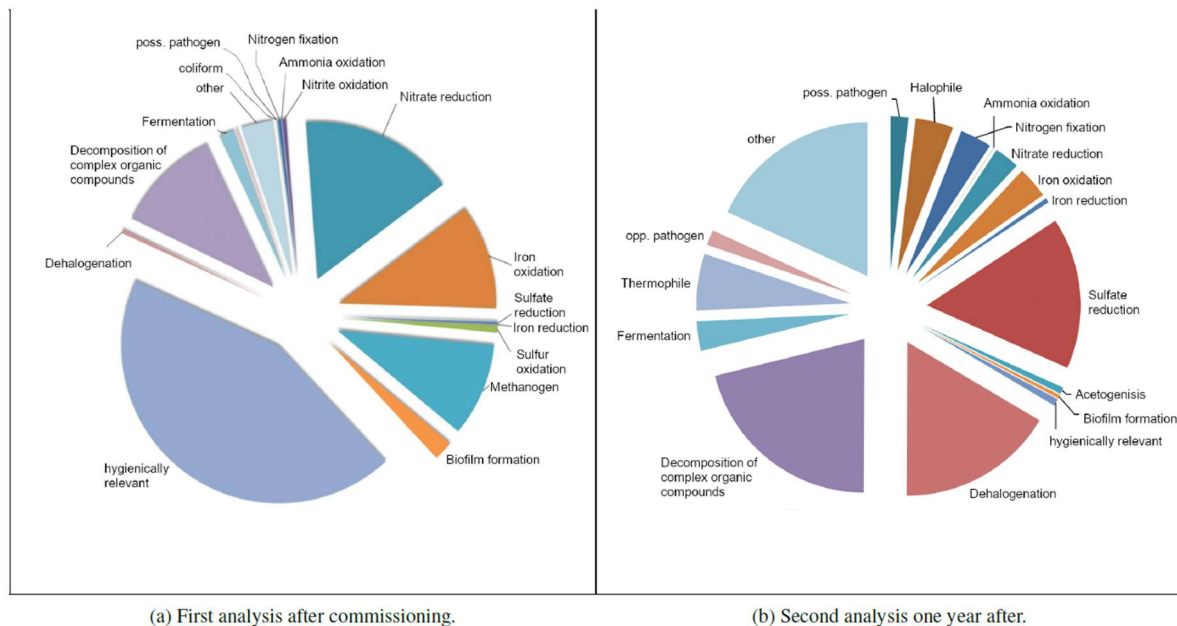


Abb. 16: Die Mikrobiologie passt sich dem Nährstoffangebot an, Nitrat wurde gezehrt, Sulfatreduzierer treten vermehrt auf (mikrobiologische Sukzession)

Starke mikrobiologische Aktivitäten durch die Zehrung chemischer Zusatzstoffe

In dem untersuchten 30 Jahre alten System wurden erhebliche Mengen gelöstes Eisen vor-
gefunden. Das Umlaufwasser färbte sich nach Entnahme durch den Sauerstoffeintrag der
Umgebungsluft braun (Abb. 17 und Abb. 18). Es fanden sich im Umlaufwasser Glykolrück-
stände und Inhibitorreste, die durch Bakterien verarbeitet wurden. Das Wasser war durch die
Säureprodukten der Bakterien sauer (pH 6,3) wodurch die Korrosion massiv befördert wurde.
Dieses Beispiel zeigt auf, dass eine inkonsequente Behandlung mit Schutzmitteln und eine
ausbleibende Wartung das Korrosionsrisiko eher steigert als senkt.

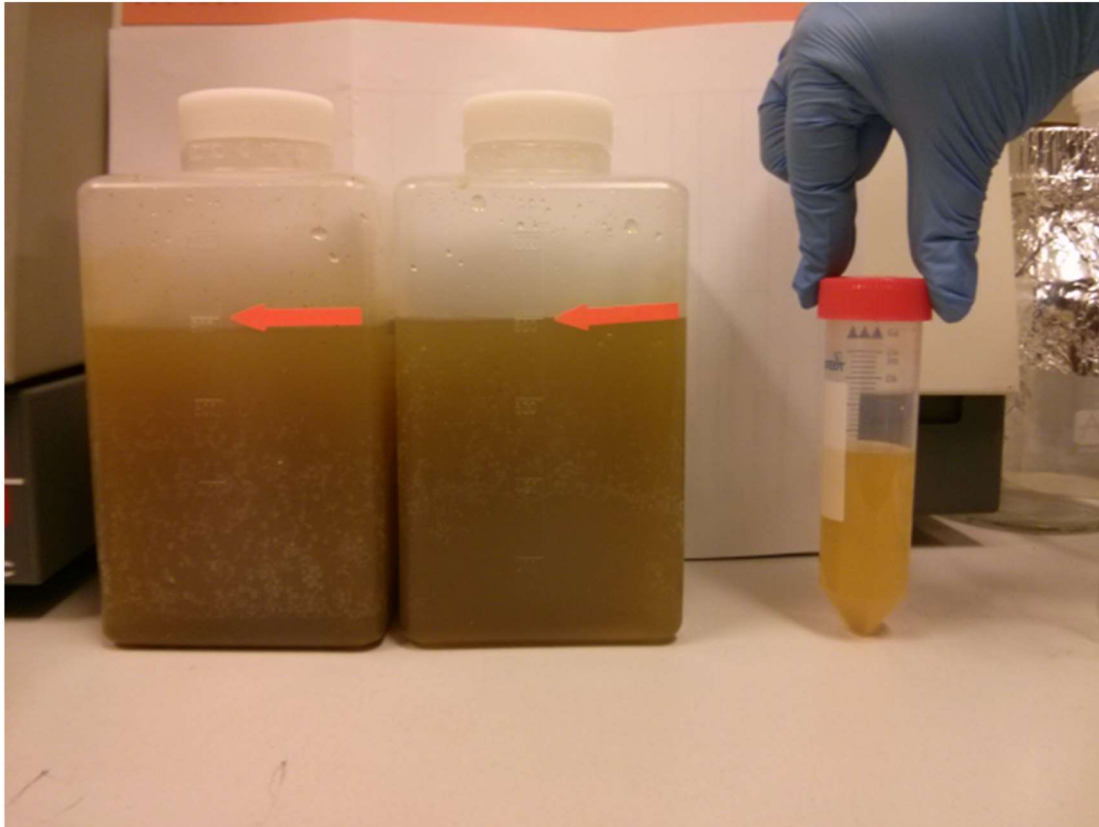


Abb. 17: Wasserproben aus einem Stahlsystem, mit Inhibitorrückständen, Sauerstoffeintrag durch Wasserverlust und wiederholte Nachspeisung mit Frischwasser (pH= 6,3): starke Korrosion

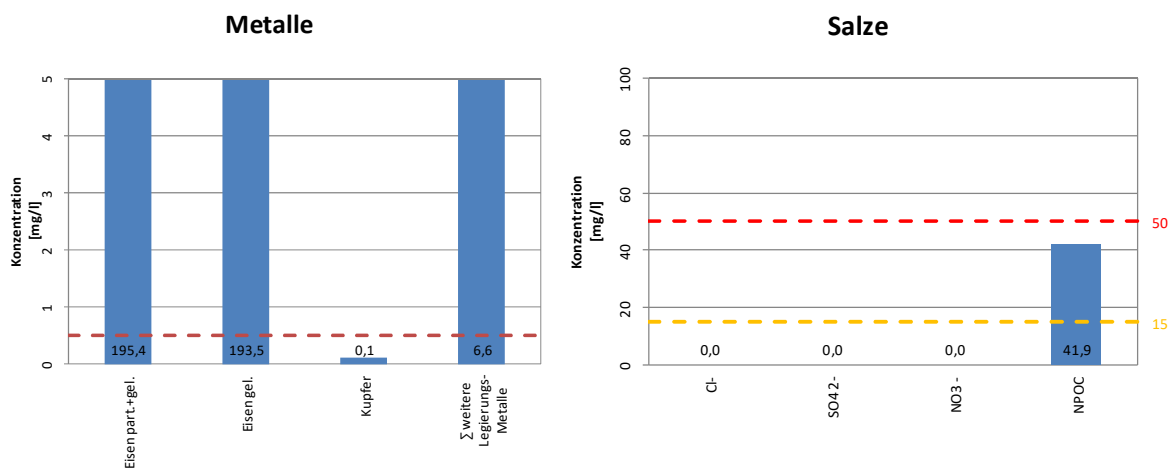


Abb. 18: Inhibitorreste und vermutlich Sauerstoffeintrag durch Wasserverlust und kontinuierliche Nachspeisung mit Frischwasser (pH= 6,3), Salze aufgrund der hohen Eisenwerte nicht messbar gewesen, Sauerstoffgehalt nicht aussagekräftig (wird sofort gezehrt)

Hoher Chloridgehalt bei mäßigen Sauerstoffgehalt

Obwohl der Sauerstoffgehalt mit 0,05 mg/l relativ niedrig ist, werden hohe Eisengehalte nachgewiesen, siehe Abb. 19 und Abb. 20. Als ursächlich wird der sehr Chloridgehalt angesehen, der die Schutzschichten auf den Metalloberflächen schädigt. Ein Vergleich mit dem lokalen Standortwasser (Abb. 21) bestätigt durch den dort vorgefundenen ähnlich hohen Chloridgehalt seine Verwendung als Füllwasser. Es fällt bei diesem Vergleich auch auf, dass Nitrat vollständig und Sulfat zum Teil durch mikrobiologische Vorgänge gezehrt wurde.

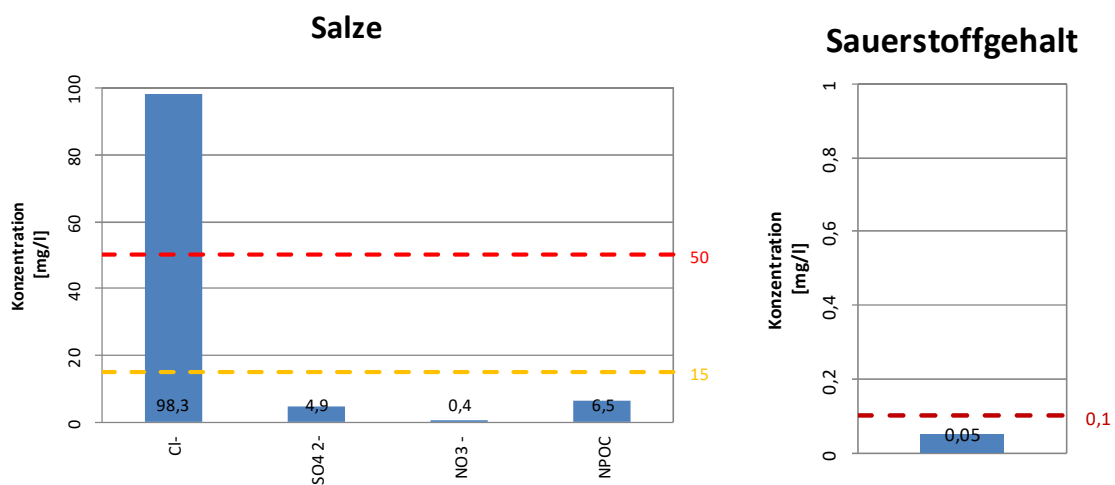


Abb. 19: Heizsystem, hoher Chlorid-Gehalt und Sauerstoffeintrag: starke Korrosion, Aluminium – Wärmetauscher korrodiert

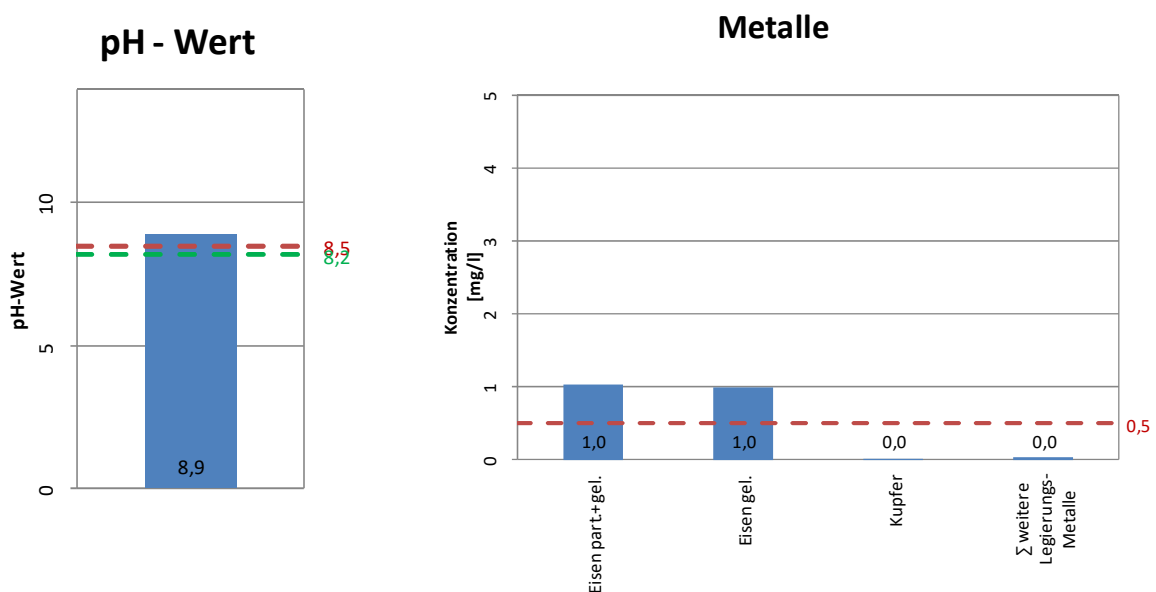


Abb. 20: pH-Wert oberhalb des zulässigen Bereiches für Aluminium-Bauteile, gelöstes Eisen II



	Symbol	Einheit	Trinkwasser	Grenzwert*
Nitrat	NO_3^-	mg/l	12	50
Nitrit	NO_2^-	mg/l	< 0,02	0,50
Phosphat (gesamt)	PO_4^{3-}	mg/l	1,1	–
Kieselsäure	SiO_2	mg/l	9,2	–
Fluorid	F^-	mg/l	0,14	1,5
Chlorid	Cl^-	mg/l	79	250
Sulfat	SO_4^{2-}	mg/l	52	250
Hydrogencarbonat	HCO_3^-	mg/l	211	–
* derzeit gültige Trinkwasserverordnung (TrinkwV). < Messwert ist kleiner als die analytische Bestimmungsgrenze				

Abb. 21: Vergleich des Umlaufwassers mit dem Standortwasser: Cl-Gehalt bestätigt, Wasser wurde enthärtet, Sulfat und Nitrat gezehrt aufgrund Mikrobiologie

Sauerstoffeintrag infolge Leckage und Druckabfall

Das System hatte zunächst einen ausreichenden Druck, der Sauerstoffgehalt sowie die Metallgehalte lagen im zulässigen Bereich. Infolge einer Leckage und ausbleibender Druckhaltung stieg der Sauerstoffgehalt. Dadurch wurde die Korrosion befördert und die Metallgehalte stiegen ebenfalls. Neben der geringfügigen und daher unentdeckten Leckage fehlte jegliche Druckhaltung, so dass der Systemdruck unbemerkt abfallen konnte (Abb. 24). Weiterhin wurde durch die chemische Analyse des Umlaufwassers aufgedeckt, dass entgegen der Beauftragung enthärtetes statt vollentsalztes Wasser eingefüllt wurde. Die Leitfähigkeit liegt mit in etwa 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ weit über der eines vollentsalzten Wassers (< 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$) (Abb. 24). Im Gespräch mit ausführenden Firmen ist öfter aufgefallen, dass nicht zwischen vollentsalztem und enthärtetem Wasser unterschieden wird. Dabei bewirkt eine alleinige Enthärtung im Vergleich zu einem unbehandelten Wasser eine Erhöhung des Korrosionsrisikos.

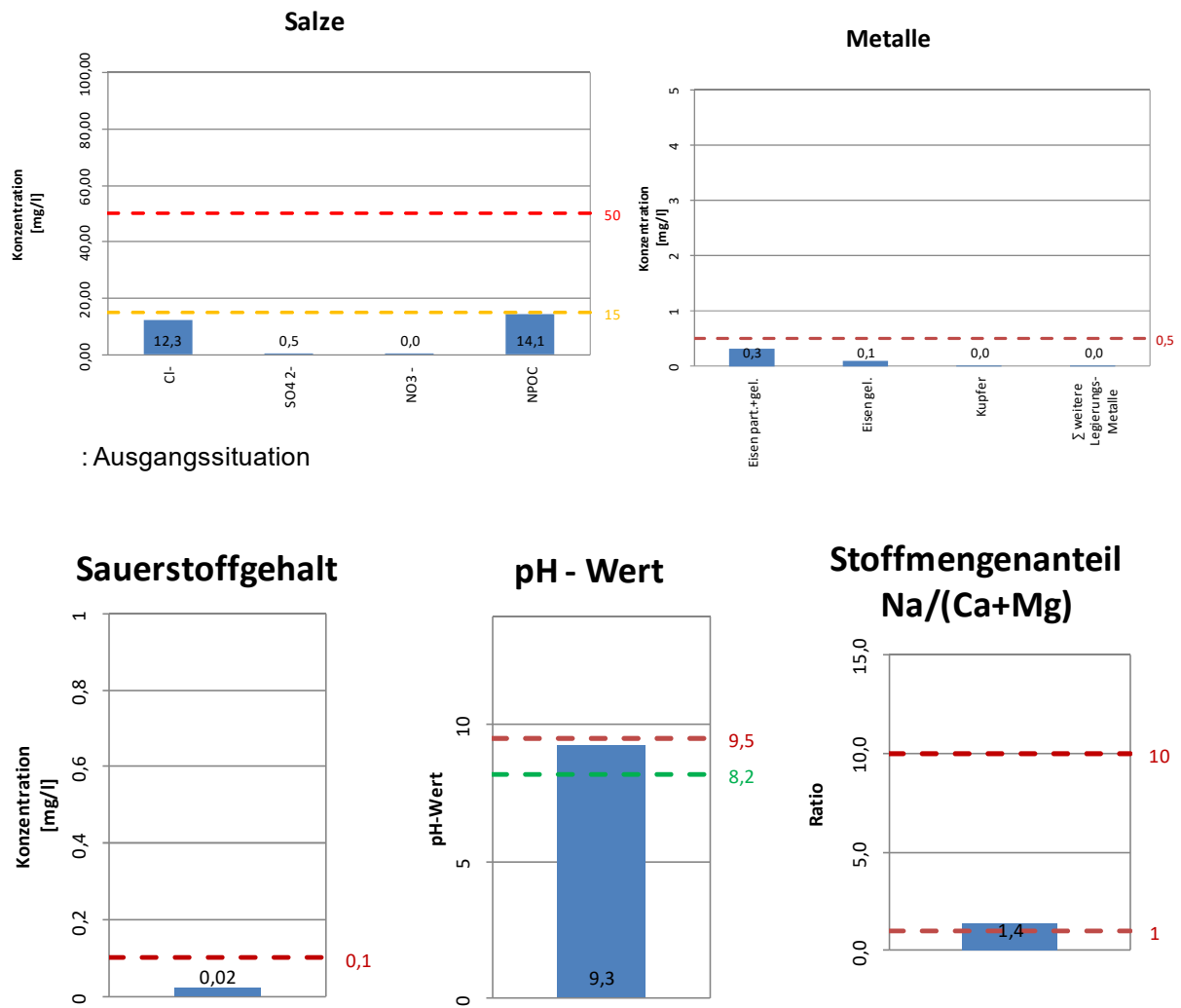


Abb. 22: Kombiniertes Kühl-Heizsystem, sauerstoffdichter Kunststoff, Stahlbauteile

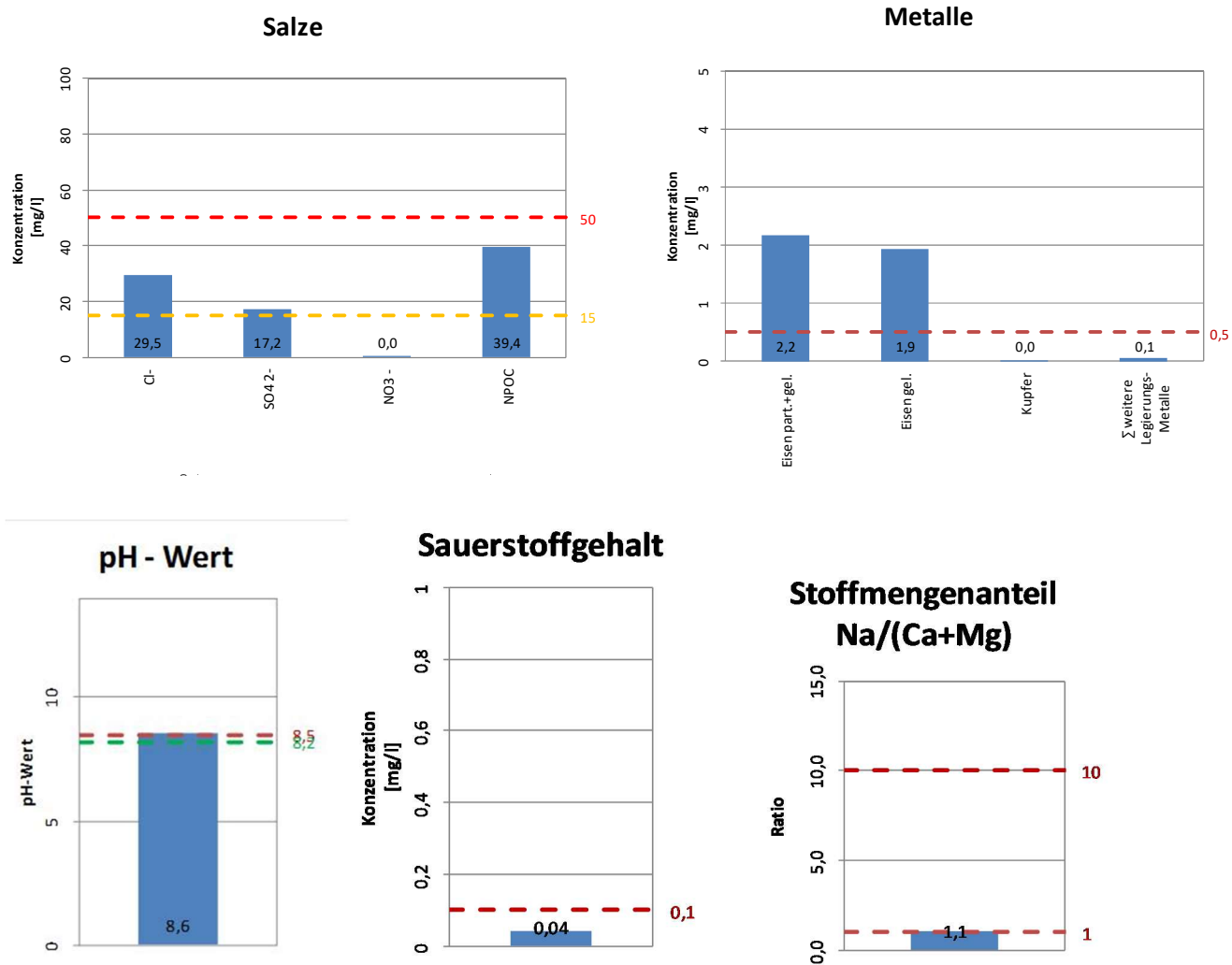


Abb. 23: Ein Jahr später: Salz- und Sauerstoffgehalt gestiegen, Korrosion

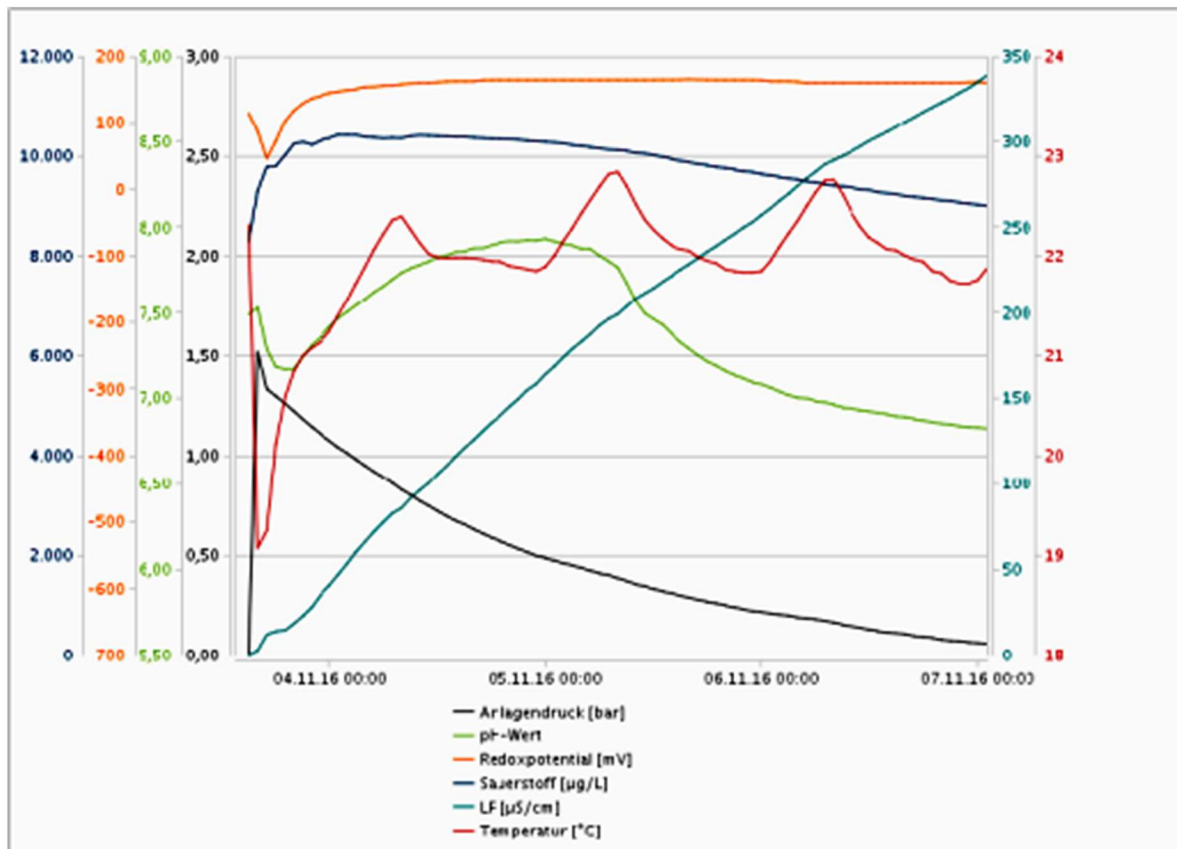


Abb. 24: Ursachen: Leckage, Nachspeisung mit unbehandeltem Wasser (trotz bestelltem VE-Wasser), keine Druckhaltung (Planungsfehler)

Diffusionsoffenes Sekundärsystem aus weitestgehend korrosionsfesten Materialien

Das System verfügt über diffusionsoffene Kapillarmatten aber ist ausschließlich aus Kunststoffen und Buntmetallen gefertigt (bis auf die Umwälzpumpe), die weitestgehend korrosionsfest sind (Abb. 25). Der Sauerstoffgehalt liegt bei der Sättigungsgrenze (Abb. 26). Neben Zink wurden keine Korrosionsprodukte nachgewiesen. Eisen, das potentiell aus der Umwälzpumpe stammen könnte wurde auch nicht nachgewiesen. Das verwendete Standortwasser wurde nur enthärtet. Nitrat wurde durch mikrobiologische Vorgänge gezehrt (Abb. 27 und Abb. 28). Der hohe Chloridgehalt bei einer niedrigen Gesamthärte in einem sauerstoffreichen Milieu fördert die Entzinkung von Buntmetallbauteilen (siehe Abschnitt 2.4.4). Hier zeigt sich die Notwendigkeit diffusionsoffene Stränge korrosionsfest auszuführen und mit einem Wärmetauscher von dem Restsystem hydraulisch zu trennen. Die Entzinkung führt zu einer Schwächung der Bauteile und zu Ablagerungen, die die Ventile der Kapillardecken blockieren können. Zielführend wäre eine Vollentsalzung zur Senkung des Chloridgehaltes um die Entzinkung zu stoppen.

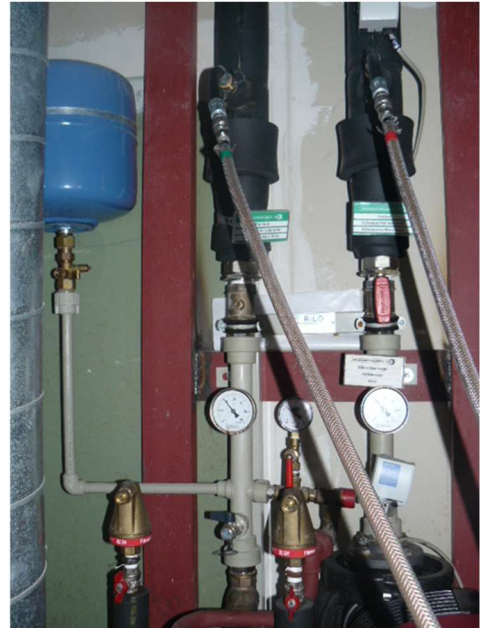


Abb. 25: Sauerstoffoffenes Sekundärsystem mit Kapillarmatten zum Heizen und Kühlen – korrosionsfest ausgeführt (bis auf Graugusspumpe), unproblematisch

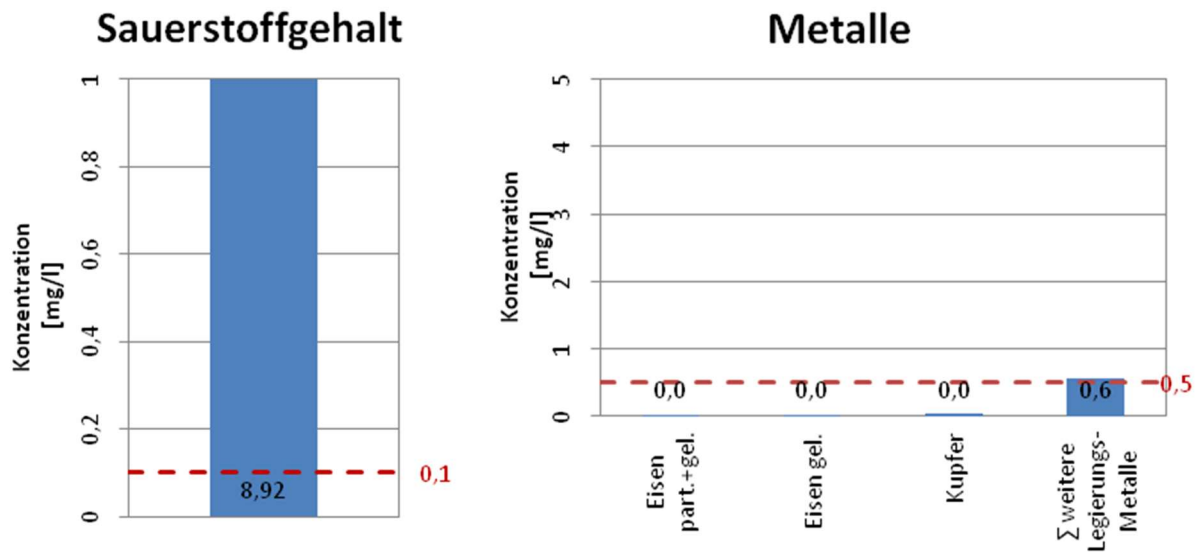


Abb. 26: Umlaufwasser sauerstoffgesättigt, geringer Anteil an NE-Metallen aus Verzinkungen, Lötzinn, Edelstahl und Buntmetallen, kein Eisen in Lösung

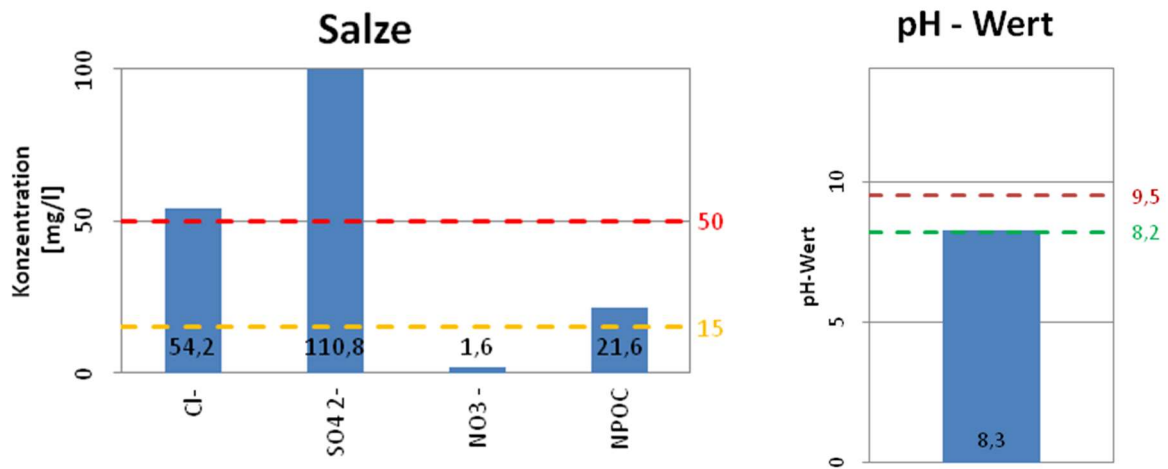


Abb. 27: Salzgehalte entsprechen dem unbehandeltem Standortwasser, hoher Chlorid-Gehalt, pH-Wert im empfohlenen Bereich

Parameter	Einheit	Grenzwerte für Trinkwasser	Mittelwert
pH-Wert		$\geq 6,5 - \leq 9,5$	7,71
Härtebereich			mittel
Gesamthärte*	°dH	-	12,2
Gesamthärte*	mmol/l	-	2,2
Karbonathärte	°d	-	6,7
Karbonathärte	mmol/l	-	1,2
Calcium	mg/l	-	78
Magnesium	mg/l	-	5,9
Eisen gesamt	mg/l	0,200	< 0,02
Mangan	mg/l	0,050	> 0,01
Ammonium	mg/l	0,50	< 0,07
Nitrat	mg/l	50	2,1
Chlorid	mg/l	250	47
Sulfat	mg/l	250	96
Phosphat	mg/l	-	0,3

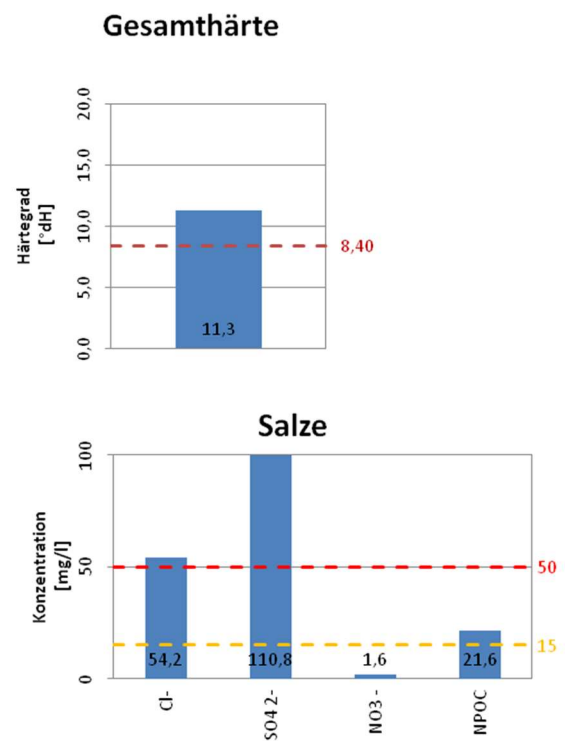


Abb. 28: Als Füllwasser wurde unbehandeltes Leitungswasser verwendet, Nachspeisung vermutlich mit enthärtetem Wasser

2.3.6 Mikrobiologie

Abb. 29 zeigt die häufigsten in den Systemen gefundenen Bakteriengattungen und entsprechend bedeutende Stoffwechselprozesse. Stickstofffixierer konnten in allen Anlagen gefunden werden. Sie wandeln molekularen Stickstoff in (je nach Füllwasser) nach Zehrung knappes bioverfügbares Nitrat um. Korrosionstechnisch relevant sind sie, da bei der Oxidation von Ammonium der pH-Wert gesenkt wird. Ebenso werden oft Biofilmbildner gefunden, heterotrophe, (mikro-)aerobe Organismen, die organischen Kohlenstoff und geringe Mengen Sauerstoff benötigen und durch die Exkretion von extrazellulärer Substanz schützende Schichten bilden, in denen sich Organismengesellschaften ansiedeln können. Gemeinschaften mit hohen Anteilen von Biofilmbildnern, Stickstofffixierern und verschiedenen anderen heterotrophen Organismen (Fermentierer, Säurebildner) werden oft in Anlagen mit Sauerstoffkonzentrationen $> 60 \mu\text{g/L}$ und Gehalten organischen Kohlenstoffs $> 15 \text{ mg/L}$ gefunden. Sie können eine gute Alkalisierung des Wassers verhindern ohne jedoch zu starken Korrosionserscheinungen zu führen.

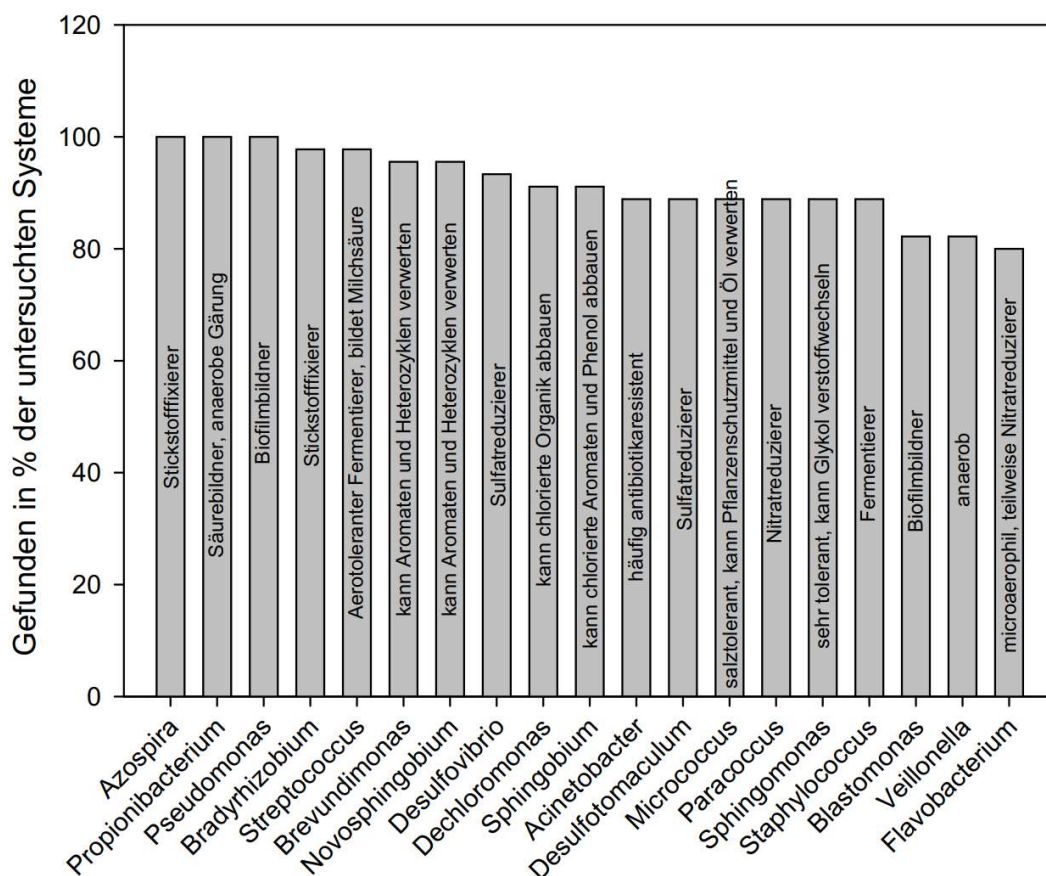


Abb. 29: Häufigkeit von Gattungen untersuchter Systeme

Bekanntermaßen korrosionsfördernd sind sulfatreduzierende Spezies. Das Sulfid ist stark reduzierend und greift Schutzschichten an. Die durch sich aus dem Stoffwechselprodukt Sulfid dabei bildenden Polysulfide und elementarer Schwefel wirken als Oxidationsmittel, zur biotischen wie abiotischen Regeneration des Oxidationspotentials kann vorhandenes und deponiertes Eisen(III) genutzt werden, die Folge ist starke Korrosion und ein starker pH-Wert-Abfall. Der Schwefel wird dabei nicht verbraucht sondern ist katalytisch wirksam, was zu anhaltender Korrosion führt. Entsprechend sollte möglichst wenig Sulfat im Füllwasser vorhanden sein.

Neben Gattungen, die diese direkt korrosionstechnisch relevanten Prozesse ermöglichen finden sich viele Spezialisten, die schwer bioverfügbaren Kohlenstoff, unter anderem auch aus Inhibitoren stammende und aus Kunststoffen austretende Verbindungen, metabolisieren und für andere Organismen verfügbar machen können. Eisenreduzierende Spezies können ebenfalls Schutzschichten angreifen und insgesamt korrosive Prozesse fördern.

Die aktuelle Forschung thematisiert insbesondere die oftmals unklare Indikation mikrobiologischer Korrosion. So bedeutet ein Vorhandensein von Sulfatreduzierern nicht, dass hierdurch verstärkte Korrosion auftritt, sondern lediglich, dass entsprechende Bedingungen vorherrschen, unter denen diese Gattungen leben können. Oft kann dann jedoch auch mikrobiologische Korrosion auftreten. Weiterhin gibt es Hinweise darauf, dass eine eher diverse mikrobiologische Community auf „gesunde“ Anlagen hinweist, während in MIC-geschädigten Anlagen eher einzelne Gattungen dominieren. Diese müssen dann nicht, können aber korrosionstechnisch relevante Prozesse befördern, die Dominanz weniger Arten weist dann auf eine entsprechende relevante Quantität hin, die sich bspw. durch Zellzahlbestimmung nicht eindeutig feststellen lässt.

2.3.7 Korrosionssensor

Zur Untersuchung der Matrixabhängigkeit und Linearität der Berechnung der Fe(II)-Aktivität aus den gemessenen Vor-Ort-Parametern wurden diese im Rahmen der Feldstudie Phase I mit gemessenen Werten verglichen. Um die sich zwischen den untersuchten Systemen um mehrere Größenordnungen unterscheidenden Konzentrationen und berechneten Werte darstellbar zu machen, wurde die Auftragung logarithmiert. Abb. 30 und 31 zeigen die jeweils ähnlichen Responses in Heiz- und Kühlsystemen mit $A = 16$ und $B = 0$, d.h. bezüglich der Eisenkonzentration unkalibrierter Sensor. Durch die Sauerstoffkorrektur ergibt sich ein unbekannter Offset, ansonsten wird die Eisen(II)-Ionenaktivität gemessen.

Bei recht großer Streuung, die auch aufgrund der langsamen Einstellung der Redoxelektrode auf die unterschiedlich stark reduzierten Füllwasser zustände kommt, ist eine deutliche Korrelation mit leicht sigmoidalem Verlauf erkennbar. Die Werte liegen ohne Kalibration jedoch um etwa 1-2 Größenordnungen unter den gemessenen Konzentrationen und damit auch deutlich unter den zu erwartenden Aktivitäten.

Verglichen mit den analytischen Messwerten erscheint der Sensorresponse empfindlicher: Es ergeben sich Messwertepaare, bei denen der analytisch bestimmte Wert an der Nachweisgrenze liegt aber dennoch ein (sehr geringer) Sensorresponse feststellbar ist. Unterhalb eines Response von $\log(\alpha \text{ Fe}^{2+}) = -4 \text{ mg/L}$ wurden in den Heizsystemen nur noch technisch irrelevante Konzentrationen $< 0,05 \text{ mg/L Fe}^{2+}$ festgestellt, höhere Werte ab $\log(\alpha \text{ Fe}^{2+}) = -3 \text{ mg/L}$ ließen auf technisch relevante, aktive Korrosion indizierende Konzentrationen gelösten Fe^{2+} schließen.

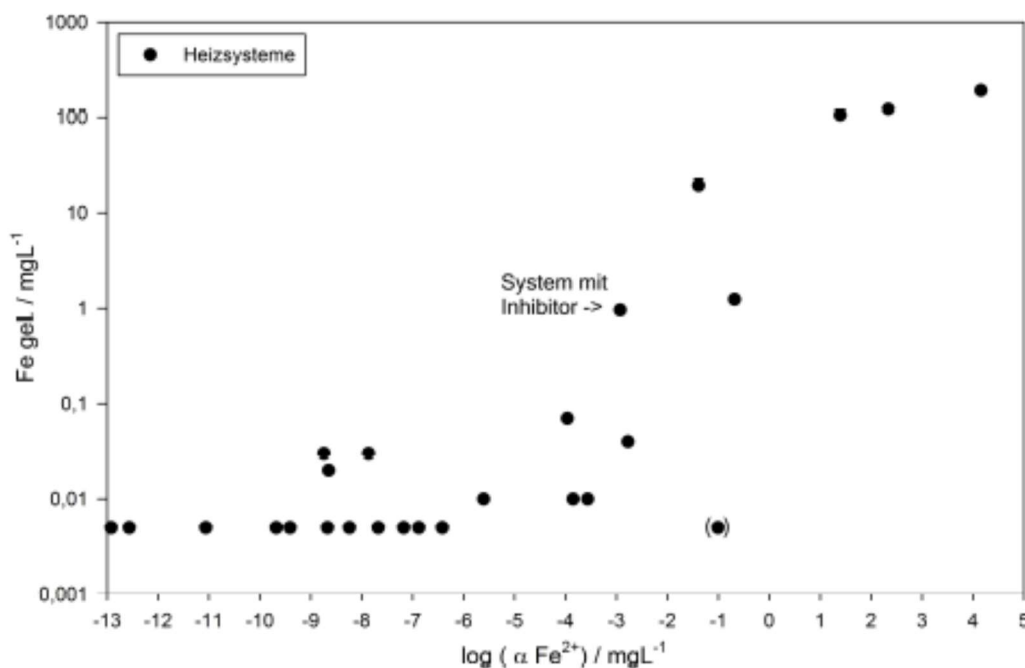


Abb. 30: Auftragung der analytisch bestimmten Gelöseisenkonzentrationen mit Sensorwerten (nicht kalibriert) in Heizsystemen (Feldstudie Phase I)

In den Kühlsystemen zeigte sich ein ähnlicher aber linearerer Response mit einer Grenze bei $\log(\alpha \text{ Fe}^{2+}) = -6$ für Fe^{2+} -Konzentrationen $< 0,05 \text{ mg/L}$. Da letztlich auch die Referenzmessung in diesen Konzentrationsbereichen nicht nur durch die Analytik, sondern insbesondere durch die Probenahme (Entnahme aus der Anlage mit anschließender Filtration $0,22 \mu\text{m}$, wobei innerhalb von Sekundenbruchteilen eine Reaktion des im Wasser gelösten Eisen(II) mit zutretendem Luftsauerstoff erfolgt) stark fehlerbehaftet ist, scheint ein Einfluß der höheren Wassertemperatur auf die Reaktionsgeschwindigkeit der Oxidationsreaktion bei der Pro-

benahme insbesondere aus den Heizkreisen plausibel, die zu falsch negativen analytischen Werten im unteren Konzentrationsbereich führen und den unterschiedlichen Response in diesem Konzentrationsbereich erklären können.

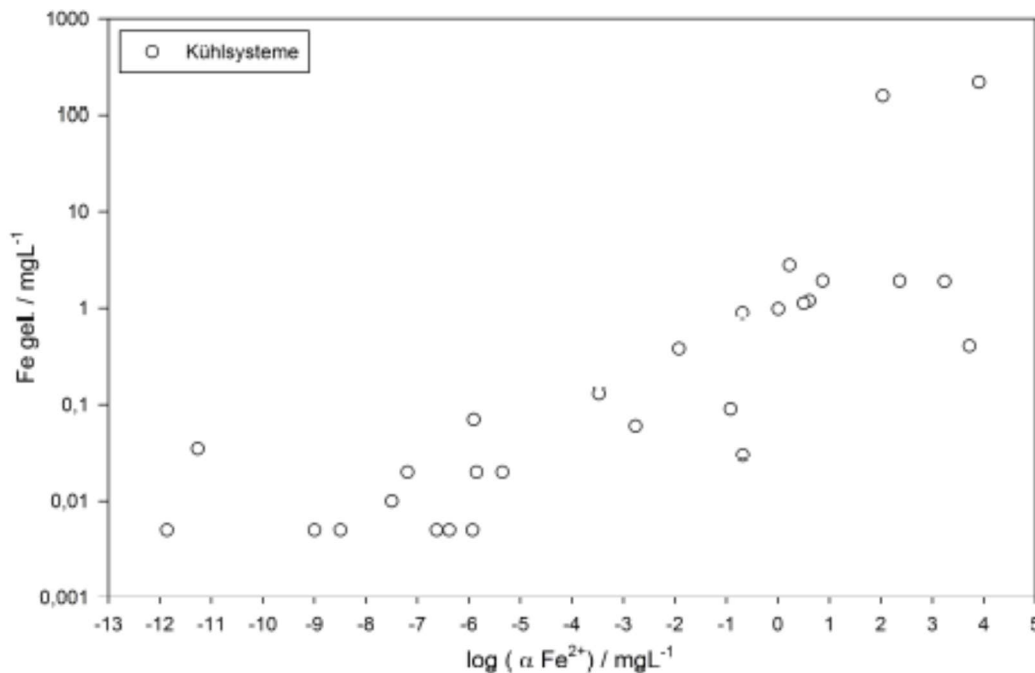


Abb. 31: Auftragung der analytisch bestimmten Gelöseisenkonzentrationen mit Sensorwerten (nicht kalibriert) in Kühlsystemen (Feldstudie Phase I)

2.4 AP3: Schadens- und Potentialanalyse

In diesem Arbeitspaket ging es um die Schärfung des Wissens zum Ausmaß der Schäden aus energetischer sowie Nutzersicht und den damit verbundenen energetischen und wirtschaftlichen Einbußen sowie Verlusten an Nutzungskomfort des Gebäudes. Die Einschätzung erfolgt auf Basis einer Literaturstudie (2.4.1), der Befragung (2.4.2) und Bestandsaufnahmen (Begehung, Kennzahlauswertung, nass- und feststoffanalytisch, 2.4.3). Gesondert eingegangen wird auf Kupferlegierungen (2.4.4), bevor wirtschaftliche (2.4.5) und energetische Betrachtungen (2.4.6) angestellt werden.



2.4.1 Literaturstudie zum Schadenspotential

Es besteht die Gefahr, dass, wie sich bereits in einer wachsenden Anzahl von Gebäuden zeigt [Mietzker 2012], die Betriebssicherheit und Performance durch Belag- und Feststoffbildungs- sowie Korrosionsprozesse stark beeinträchtigt wird. Zum konkreten Ausmaß der technisch-wirtschaftlichen Probleme durch Korrosion und Belagbildung in TGA-Systemen war vor der Durchführung dieser Studie wenig an belastbaren Zahlen verfügbar. Das Institut für Schadensverhütung und Schadensforschung der öffentlichen Versicherer e.V. führt seit 2003 eine Schadensdatenbank mit rund 4.800 Einträgen, in der die schadenauslösenden Bauteile in wasserführenden Anlagen nach Typ, Kategorie und Schadenursache klassifiziert sind. In den herausgegebenen Veröffentlichungen zu den Schäden wird jedoch nicht nach Trinkwasser- und Heiz-/Kühlinstallationen entschieden: die am IFS hinsichtlich ihrer Schadenursache untersuchten Asservate stammen zum Teil aus Heizkreissystemen, Feuerlöschanlagen und Brauereitanks. Bei den Leckagen an wasserführenden Installationen entfallen 18 % auf Heizinstallationen [IFS 2017].

Die Untersuchungen des IFS beziehen sich generell auf die jeweilige schadhafte Stelle, nicht auf Fehler im Gesamtkonzept des wasserführenden Systems. Aus diesen Gründen sind die gewonnenen Erkenntnisse nur begrenzt für TGA-Anlagen verallgemeinerbar, liefern jedoch Ansatzpunkte.

Ein am IFS festgestellter Schadensanstieg wird der heute höheren Installationsdichte der wasserführenden Komponenten innerhalb der Gebäude und der modernen Komplexität der Ausführung zugeschrieben. Zudem wird auf die „zunehmend rascheren Abläufe im modernen Baustellenbetrieb“ verwiesen, welche der Entstehung eines Fehlers zuspielen [Schadenprisma 2018]. Fast 40 % aller untersuchten Schäden sind auf Installations- oder Montagefehler zurückzuführen. Weitere Schadenursachen sind Planungs- und Materialfehler sowie betriebliche Bedingungen.

Die schadenursächlichen Komponenten gehören mit jeweils 26 % zu den beiden Kategorien „Bauteile, Geräte und Anlagen“ (z.B. Pumpen, Filter, Heizkörper, Wärmetauscher) sowie „Verbindungen“ (darunter vorrangig Pressverbinder). 20 % der Komponenten gehören zur Kategorie „Rohre“, 17 % in die Kategorie „Armaturen“ und ca. 11 % der Schäden fällt in die Kategorie „Schläuche“.

Beim Schadensschwerpunkt „Verbindungen“ werden vor allem mangelhafte Pressverbindungen ausgemacht, die fast immer auf einen Installationsmangel (falsches Werkzeug, zu geringe Einschubtiefe) zurückzuführen sind [IFS 2016, IFS 2018].

Bezüglich der Rohre traten bis weit in die 1990er Jahre verstärkt Schäden durch Lochkorrosion von innen in Kupferinstallationen auf, die auf fehlerhafter Inbetriebnahmen oder

einer ungeeigneten Kombination aus Werkstoff und Wasser zurückzuführen waren (bei dieser Angabe ist die fehlende Unterteilung der Statistik in Heiz- und Trinkwasserinstallationen zu beachten). Neben den Kupferrohren werden verzinkte Stahlrohre als zweitgrößte Schadensgruppe innerhalb der Rohre ausgemacht. Dabei werden jedoch vorrangig Schadensursachen durch äußere Feuchtigkeitseinwirkung (Außenkorrosion) in Heizkreissystemen verbauten Rohren genannt. Bei den Armaturen geht es um vollkommen bauartverschiedene Absperrventile. Eckventile bilden von der Schadenanzahl den größten Anteil der Einzelkomponenten. Die Quelle verweist auf die frühere Ausführung von Gewindeanschlüssen der Eckventile mit Faser-dichtmitteln, wogegen heute „selbstdichtende“ Anschlusstypen Einsatz finden. Die Voraussetzung für die Dichtwirkung dieser Ventilanschlüsse mittels Dichtringes aus einem Teflonwerkstoff innerhalb eines Nuteinschnittes im Gewinde ist jedoch die Beachtung der Herstellervorgaben zur Eindrehtiefe und die Vermeidung weiterer unnötiger Gewindedichtmittel.

Bei den genannten Schadensstatistiken ist generell von einer hohen Dunkelziffer auszugehen. Bevor versicherungstechnisch relevante Schäden auftreten, kommt es bereits zu energetischen Einbußen.

- [IFS 2016] Voigtländer, R., Nahrwold, F (2016): Merkblatt Leitungswasserschäden, Schadenursache: Pressverbindungen an Kunststoffleitungen, Institut für Schadenverhütung und Schadenforschung der öffentlichen Versicherer e.V. (IFS), Kiel, URL: https://www.ifs-ev.org/wp-content/uploads/2016/12/pressverbindungen_kunststoff.pdf.
- [IFS 2017] Institut für Schadenverhütung und Schadenforschung der öffentlichen Versicherer e.V. (IFS) (2017): Leistungswasserschäden 2017. Institut für Schadenverhütung und Schadenforschung der öffentlichen Versicherer e.V. (IFS), Kiel, URL: https://www.ifs-ev.org/wp-content/uploads/2018/05/ifs_leitungswasserstatistik_2017.pdf.
- [IFS 2018] Nahrwold, F., Voigtländer, R. (2018): Merkblatt Leitungswasserschäden, Schadenursache: Pressverbindungen an metallischen Leitungen, Institut für Schadenverhütung und Schadenforschung der öffentlichen Versicherer e.V. (IFS), Kiel, URL: https://www.ifs-ev.org/archiv/literatur/pressverbindungen_metall.pdf.
- [Schadenprisma 2018] Nahrwold, F., Pfullmann, T., Knab, M. (2018): Die Chart Show der Leitungswasserschäden. Institut für Schadenverhütung und Schadenforschung der öffentlichen Versicherer e.V. (IFS), Kiel, URL:



<https://www.schadenprisma.de/archiv/artikel/die-chart-show-der-leitungswasserschaden/>.

2.4.2 Befragung zum Schadenspotential

Nach der Befragung ist das Schadenspotential als „hoch“ einzustufen. Potenzielle finanzielle Schäden werden von einem Drittel der Befragten als „hoch“ oder „sehr hoch“ eingeschätzt. Die meisten Befragten halten potenziell alle Bauteile für von Korrosion betroffen und erwarten überwiegend erhebliche Schäden bei nur leichten Nutzungseinschränkungen.

2.4.3 Bestandsaufnahme

Durch die Vernetzung mit unterschiedlichen Stakeholdern (darunter Gebäudebetreibende und Firmen, die Wasserbehandlungen für betroffene Anlagen anbieten) wurden zahlreiche Erfahrungsberichte gesammelt, sodass bei größeren Gebäuden durch Vermeidung von:

- erhöhten Energieverbräuchen
- Fehlfunktionen und
- Totalausfällen

von ökonomischen Einsparpotentialen bis in den Millionenbereich (in Euro) auszugehen ist (Näheres unter 2.4.5). Wenn der hydraulische Abgleich aufgrund von massiven Mengen an Schlämmen nicht mehr stimmt, kommt es zu einem unerwünschten Anstieg der Rücklauf-temperaturen und die Brennwertnutzung ist nur eingeschränkt möglich. Die Verluste steigen bis auf 30 %. Im Folgenden wird das Problem bildlich dargestellt (Abb. 32 u. Abb. 33).



Abb. 32: Längsschliff eines ausgefallenen Ventils nach einjährigem Betrieb. Stufen 1-3 sind nicht mehr einstellbar. D. Malinowsky.



Abb. 33: Ausgefallene Umwälzpumpe aus einem Gebäudekühlkreis mit Kühldecken. D. Malinowsky.

Neben den Vor-Ort-Beprobungen im Rahmen der Feldstudie wurden Besichtigungen von Sanierungsarbeiten an weiteren geschädigten Systemen vorgenommen und Schadenspotentiale in der Branche mit vor Ort Anwesenden diskutiert. Zu diesen Terminen gehören:

- 01.11.2016: Besichtigung „Lobster“-Teststand-Gebäude (Laboratory for Occupant Behaviour Satisfaction Thermal comfort and Environmental Research, Karlsruher Institut für Technologie (KIT))
- 04.04.2018: Besichtigung Neubaus eines Logistik- Centers in Hamburg (dort waren noch vor der Inbetriebnahme massive Korrosionsschäden festzustellen)

Zu den Besichtigungen lagen gebäudetechnische Daten vor, die insbesondere starke Diskrepanzen zwischen Planung und Ausführung (z.B. Systemvolumen) und einen Mangel an Spülvorrichtungen belegen.

Bewertung des Schadenspotentials aufgrund der Eisengehalte

Neben Schäden, die offenkundig zutage getreten sind, wie klemmende Ventile oder Durchrostungen (Abb. 34), kann der Gehalt an Eisen als Indikator für die bestehenden oder drohenden Schäden herangezogen werden. Ein hoher Gehalt an partikulärem Eisen im Umlaufwasser birgt die Gefahr von Ablagerungen und daraus resultierend von Verstopfungen oder eingeschränkten Ventilfunktionen. Wenn sich durch Stillstandzeiten oder Bereichen mit geringer Durchströmungsgeschwindigkeit bereits partikuläres Eisen abgelagert hat, ist dieser jedoch nicht mehr im Umlaufwasser nachweisbar. Daher wird auch der Gehalt an gelöstem Eisen betrachtet. Ein hoher Gehalt an gelöstem Eisen birgt zum einen die Gefahr, dass es

bei Sauerstoffzutritt ausfällt und sich ablagert, zum anderen ist er ein Indikator für einen erheblichen Materialabtrag, der zwangsläufig auch zu Durchrostungen führt.



Abb. 34: Zugeseetzte Durchflussanzeige (links) und klemmende Ventile (rechts) aus dem System 11.1.

Im Rahmen der Feldstudie ergaben sich im Umlaufwasser Gesamt-Eisengehalte von bis zu 225 mg/L mit entsprechender Trübung des Wassers. Während die Darstellungen für Gesamt-Eisen und partikulärem Eisen (Abb. 35 und Abb. 36) eher fließende Grenzen zwischen mäßiger und massiver Korrosion aufweisen, lässt sich bei der Darstellung für gelöstes Eisen (Abb. 37) eine deutliche Unterscheidung treffen. So sind keine Systeme mit Gehalten an gelöstem Eisen zwischen 5 mg/L und 20 mg/L vorgefunden worden, wohingegen über 20 mg/L wieder eine Häufung auftritt. Es handelt sich hierbei um 7 Systeme, die alle Durchrostungen und zum Teil klemmende Ventile aufwiesen, siehe Tab. 5. Alle anderen Systeme wiesen zum Zeitpunkt der Untersuchung keine Schäden auf. Bei einem System ist eine Pumpe korrosionsbedingt ausgefallen. Es handelt sich um 7 von 62 Systemen, das entspricht einem Anteil von 11 %.

Bezüglich der Repräsentativität ist anzumerken, dass auf der einen Seite von den Gebäudebetreibern Systeme für die Untersuchung prädestiniert wurden, die bekanntermaßen problematisch sind, weil bereits Schäden aufgetreten sind. Auf der anderen Seite wurden Systeme in die Untersuchung aufgenommen, bei denen Korrosionsprobleme vermutet wurden, die dann aber doch nicht relevant waren. Insofern ist von einer gewissen Repräsentativität der Auswahl auszugehen.

Nebenbei zeigt sich, dass der Gehalt an gelöstem Eisen einen maßgeblichen Indikator für eine bestehende oder drohende Schädigung des Systems darstellt. Der Gehalt an partikulärem Eisen unterliegt zu vielen Quereinflüssen und ist daher von eingeschränkter Aussagekraft. So können die Probenahmestelle, die aktuelle Durchströmungsgeschwindigkeit und vorangegangene Absetzzeiten den Gehalt an partikulärem Eisen wesentlich beeinflussen.

Tab. 5 Systeme der Feldstudie mit korrosionsbedingten Schäden

Systembezeichnung	Gelöstes Eisen [mg/L]	Schäden
12.1; 12.2; 12.4; 12.7	27 - 159	Verstopfte Kapillarmatten, klemmende Ventile, Durchrostungen, Pumpendefekt
9.1; 9.4	194 - 220	Durchrostungen
3.9	19	Klemmende Ventile

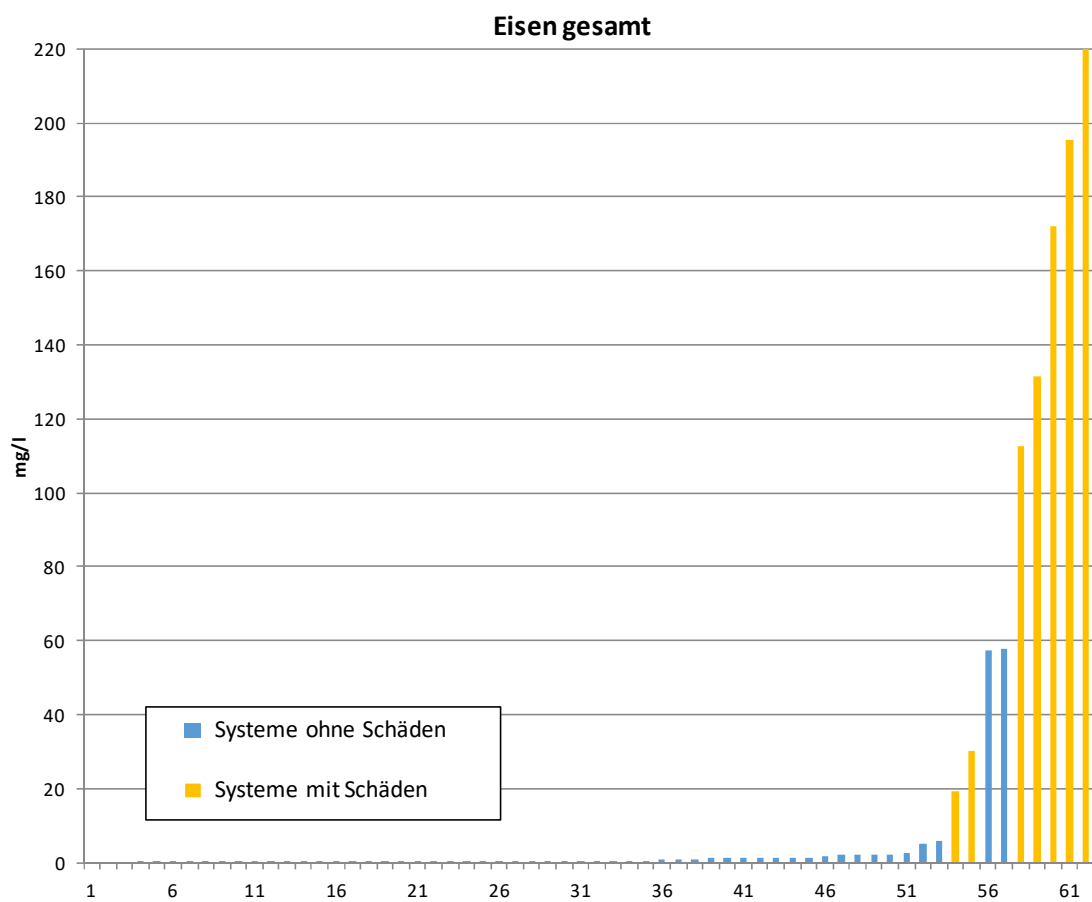


Abb. 35: Verteilung der Gehalte an Gesamt-Eisen (partikulär und gelöst)

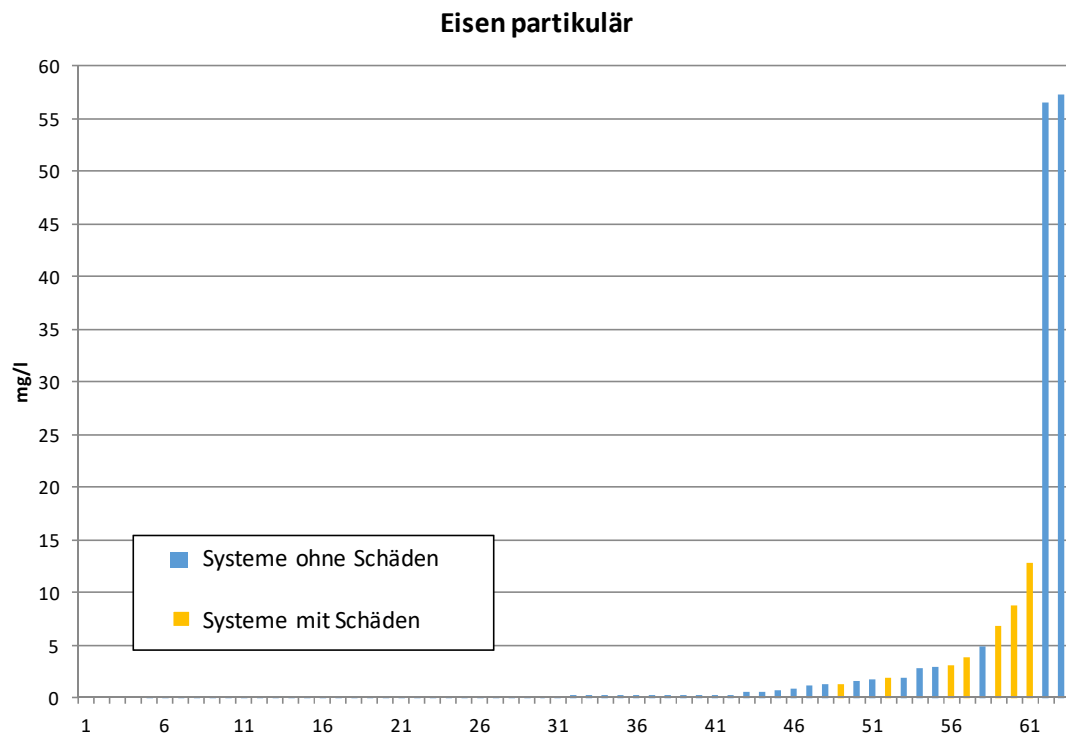


Abb. 36: Verteilung der Gehalte an partikulärem Eisen

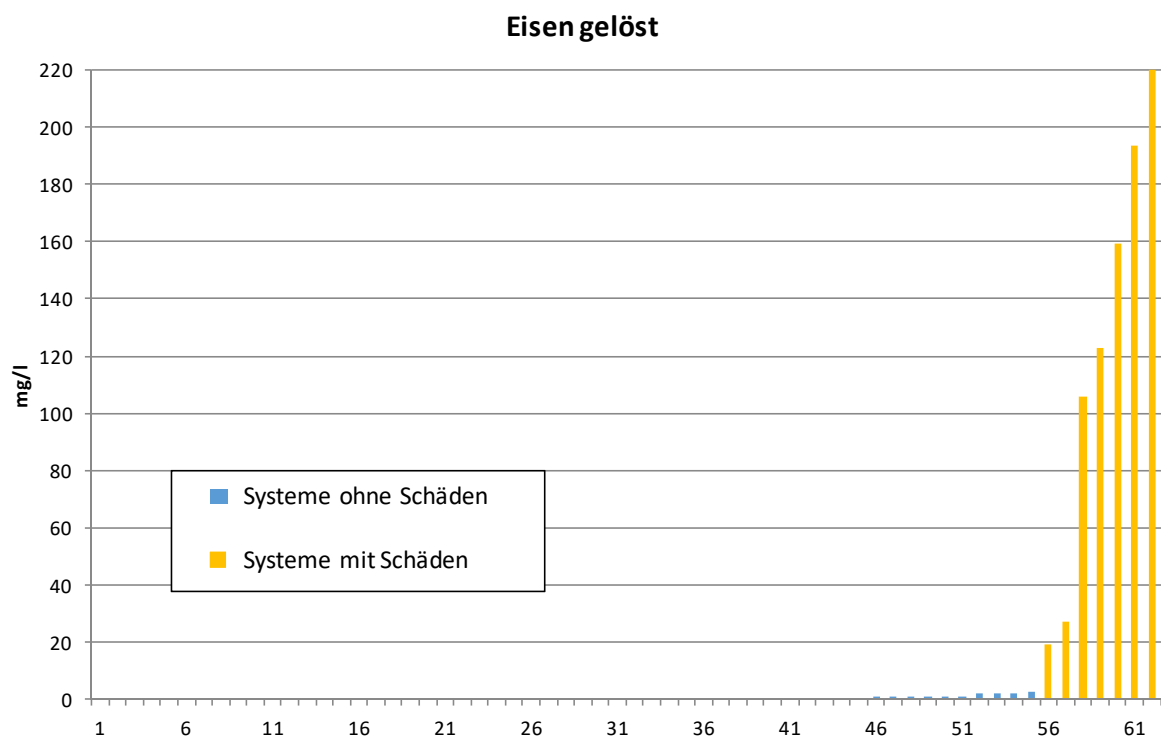


Abb. 37: Verteilung der Gehalte an gelöstem Eisen

Das SIZ e+ hat ein Berichtsformat entwickelt und mit den Betreibenden rückgekoppelt, wodurch ein substantiiertes Auswertungssystem geschaffen wurde, auf dessen Basis Schadenspotentialabschätzungen und Ursachenanalysen stattgefunden haben.

2.4.4 Entzinkung und Spannungsrisskorrosion bei Kupferlegierungen

Fittings, Ventile und sonstige Anschlussstücke sind häufig aus Kupferlegierungen gefertigt. In einigen Kreisläufen wurden Schäden durch Entzinkung festgestellt. In 22 von 64 Proben der Feldstudie wurde Zink nachgewiesen. Dabei wird Zink selektiv aus dem Metallgefüge herausgelöst und es verbleibt ein poröses Kupfergerüst. Häufig werden durch die entstehenden Korrosionsprodukte des Zinks Ventile blockiert. Seltener kommt es durch eine Materialschwächung zu Leckagen oder Abriss von Bauteilen. Bei der Spannungsrisskorrosion versprödet unter Spannung stehendes Material unter dem Einfluss von Ammonium, so dass es zu Rissbildung kommt. Die Spannung kommt entweder in Form der Eigenspannung infolge des Produktionsprozesses oder durch die Montage des Bauteils zustande (z.B. Gewinde zu fest angezogen).

Ursachen

Legierungen mit einem Zinkanteil über 15 % sind besonders durch die Spannungsrisskorrosion gefährdet, Legierungen mit über 20 % Zink zusätzlich durch die Entzinkung. Durch den Zusatz von Arsen bei Messinglegierungen kann die Entzinkungsneigung reduziert werden. Zinnbronze-Legierungen sind beständiger hinsichtlich der Entzinkungsneigung und der Spannungsrisskorrosion. Für sauerstoffreiche Wässer bestimmt das Verhältnis zwischen Härtebildnern und dem Chloridgehalt den Einfluss des Wassers auf die Entzinkung.

Die Spannungsrisskorrosion wird bei empfindlichen Legierungen durch die Anwesenheit von Ammonium ausgelöst. Quellen für Ammonium sind Flussmittel, die nach der Montage im Rohr verbleiben oder mikrobiologisch erzeugte Stoffwechselprodukte aus dem im Umlaufwasser gelöstem Stickstoff. Weiterhin können Nitratinhibitoren mikrobiologisch in Ammonium umgewandelt werden.

Materialien

Für Fittings zum Löt-, Klemmen- oder Anschließen von Kunststoffschläuchen werden in der DIN EN 1254-1...3 zum Teil Materialien vorgeschlagen, die nach dem Deutschen Kupferinstitut nicht entzinkungsbeständig sind. Eine Übersicht über die zur Verfügung stehenden Materialien sind Tab. 6 zu entnehmen.



Wässer

Die Anwesenheit von Ammonium ist für die Ausbildung einer der Spannungsrisskorrosion verantwortlich, während Chlorid die Entzinkung fördert. Durch die Anwesenheit von Härtebildnern kann der Einfluss des Chlorids teilweise kompensiert werden. Die Kombination von einem hohen Chloridgehalt mit einer niedrigen Härte fördert die Entzinkung. Dieser Zusammenhang wird im Turner-Diagramm beschrieben. Das Turner Diagramm gilt spezifisch für jede einzelne Legierung und eigentlich für sauerstoffgesättigte Wässer. Jedoch finden sich durchaus geschlossene Kreisläufe mit hohen Sauerstoffgehalten in denen Entzinkung beobachtet wird. [41]

Tab. 6 Kupferlegierungen und Entzinkungsbeständigkeit

Werkstoffbezeichnung (ehem.)	Werkstoffnummer (ehem.)	Handelsbezeichnung	Beständigkeit gegen Entzinkung	Beständigkeit gegen Spannungs- rissbildung	Quelle
CuZn40Pb2	CW617N (2.0402)	Messing	-	-	DKI
CuZn36Pb2As	CW602N (CC491K n. DIN)	Messing	+	+	DKI; DIN EN 1254-1...3
CuSn3Zn8Pb5-C	CC490K	Guss- Zinnbronze, Rotguss	+	+	DKI
CuSn5Zn5Pb5-C (G-CuSn5ZnPb)	CC491K (2.1096.01)	” Kurzzeichen: Rg	+	+	DKI; DIN EN 1254-1...3
CuZn39Pb3	CW614N	Messing	-	-	Empfohlen nach DIN EN 1254-1, nach DKI nicht entzinkungsbeständig
CuZn33Pb2-C	CC750S	Messing	-	-	Empfohlen nach DIN EN 1254-1...3, nach DKI nicht entzinkungsbeständig
CuZn15As-C	CC760S	Messing	-	-	Empfohlen nach DIN EN 1254-1...3
Cu-DHP (SF-Cu)	(2.0090)	Kupfer	+	+	Empfohlen nach DIN EN 1254-1...3 Nach DKI entzinkungsbeständig

2.4.5 Wirtschaftliche Betrachtungen

Neben korrosionsbedingten energetischen Einschränkungen (Siehe 2.4.6) sind weitere wirtschaftliche Schäden zu erwarten. Dazu zählen:

- Nutzer/Mieter-Unzufriedenheit aufgrund Komfortbeeinträchtigungen oder Nutzungsausfall infolge eingeschränkter Heiz- oder Kühlleistungen und daraus folgender Ausfall der Mietzahlungen und Kosten für Rechtsstreitigkeiten
- Nutzungsausfall bei Reparaturen im Aufenthaltsbereich
- Austausch von Bauteilen (Pumpen, Ventile, Wärmetauscher)
- Chemisch-Mechanische Spülung der betroffenen Systeme

Anhand zweier Beispiele wird das Ausmaß eines Korrosionsschadens im Folgenden beleuchtet. Außerdem wird auf dieser Basis ein korrosionsbedingtes Schadensrisiko abgeschätzt.

Beispiel 1: Verstopfte Kapillarmatten infolge Korrosionsablagerungen

Ein Bürogebäude mit Baukosten von 142 Mio. EUR¹ (KG 300 + 400, nach [BKI]) und einer Nutzfläche 40.000 m² verfügt über eine Klimatisierung und thermisch aktivierten Decken mit eingeputzten Kapillarrohrmatten (20.000 m²). Die Kapillarrohrmatten sind aus diffusionsoffenem Polyethylen und es wurde unbehandeltes Standortwasser mit einem Chloridgehalt von ca. 50 mg/L als Füllwasser verwendet. Bereits wenige Monate nach Inbetriebnahme setzte heftige Korrosion der im System ebenfalls vorhandenen Schwarzstahl-Rohre ein mit Durchrostungen und teilweiser Verstopfung der Kapillarrohrmatten. Betroffen waren ca. 30 % der thermisch aktivierten Deckenflächen. Zur Sanierung stehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten zur Verfügung:

- a. Chemisch-Mechanische Spülung der Systeme
- b. Austausch der verstopften Kapillarrohrmatten

Für die Option a. hat ein Unternehmen für die Systemreinigung und Wasserbehandlung ein Angebot über rund 1 Mio. EUR vorgelegt. Dies schließt die Anwendung eines Korrosionsschutzmittels zur Neubefüllung ein.

¹ Alle Kosten in diesem Abschnitt verstehen sich brutto inkl. 19 % Mehrwertsteuer.



Für die Option b. sind 6000 m² Kapillarrohrmatten und Deckenputz zu ersetzen. Hinzu kommen Nutzungsausfallzeiten. Die Kosten summieren sich wie folgt, siehe Tab. 7. Nicht eingerechnet ist der Ersatz der Rohre aus Schwarzstahl durch Edelstahlrohre.

Tab. 7 Sanierungskosten nach [BKI], brutto

Kostenart	Einzelpreis	Summe
Deckenputz abschlagen	22 €/m ² (6000m ²)	132.000 €
Kapillarrohrmatte ersetzen, Kalk-Zementputz auftragen	100 €/m ² (6000 m ²)	600.000 €
Wände und Decke neu streichen	9 €/m ² (22.200 m ²)	198.000 €
Nutzungsausfall	10 €/(m ² *Monat) (1 Monat)	60.000 €
Gesamtkosten		990.000 €

In beiden Fällen sind rund 1 Mio. EUR Schadenskosten anzusetzen. Im Verhältnis zu den Baukosten macht dies einen Anteil von 0,7 % aus.

Beispiel 2: Klemmende Ventile der abgehängten Kühl- und Heizdecken

In einem hochwertigen Bürogebäude mit 20000 m² Nutzfläche und Baukosten von 71 Mio. EUR (KG 300 + 400, nach [BKI]) begannen die Drei-Wege Ventile der abgehängten Heiz- und Kühldecken zu blockieren und mussten regelmäßig ausgetauscht werden. Der Mieter drohte mit Mietminderung aufgrund von Komforteinbußen und Reparaturarbeiten im Mietbereich. Ursächlich für den Ventilschaden war der versehentliche Einbau diffusionsoffener Anschlusschläuche der Kühldecken in Verbindung mit einem enthärteten Füllwasser dessen Chloridgehalt 80 mg/L betrug. Der hohe Sauerstoffgehalt förderte die Kupfer-, Zink- und Eisenkorrosion. Die Korrosionsprodukte lagerten sich auf den Ventilen ab und führten zur Blockade. Da jede Kühldecke einzeln geregelt wird, waren 300 Ventile betroffen. Ein Ventil kostet ca. 30 EUR. Hinzu kommt, dass vor dem Austausch das Füllwasser abgelassen und neu aufgefüllt werden muss. Weil die Arbeiten in sensiblen Mietbereichen stattfinden sind besondere Vorkehrungen an Sauberkeit und zeitlicher Flexibilität zu treffen. Pro Ventil ist rund eine Stunde bei dem Einsatz von zwei Montagekräften anzusetzen. Insgesamt summieren sich die Kosten wie folgt (

Tab. 8).

Tab. 8 Sanierungskosten

Kostenart	Einzelpreis	Summe
Materialkosten (Ventil)	30 €/Ventil	9.000 €
Arbeitskosten (60 €/h*Monteur)	120 €/Ventil	36.000 €
Füllwasser ablassen, auffüllen	8 h*Monteur /System, 30 Systeme	14.400 €
Gesamtkosten		59.400 €

Nicht eingerechnet sind drohende Mietausfälle und Rechtsstreitigkeiten. Die monatliche Miete beträgt ohne Betriebskosten 30.000 EUR. Eine 50 %ige Kürzung aufgrund einer eingeschränkten thermischen Behaglichkeit bedeutet einen monatlichen Ausfall von 15.000 EUR. Bezogen auf die Baukosten betragen die Schadenskosten (59.400 €) 0,1 %. Unter Einbeziehung einer halbjährigen Mietminderung ergeben sich 0,2 % Schadenskosten bezogen auf die Baukosten.

Zusammenfassung

Bei 11 % aller untersuchten Systeme sind korrosionsbedingte Schäden zu verzeichnen. Es wurden zwei Beispiele für die Schadenskosten aufgeführt, wobei das erste Beispiel (verstopfte eingeputzte Kapillarmatten) den „Worst Case“ darstellt wohingegen Beispiel zwei (klemmende Ventile der Kühldecken) einen häufigen Schadensfall mit geringerem Schadensausmaß darstellt. Die Schadenskosten betragen demnach 0,1 bis 0,7 % der Baukosten (Kostengruppen 300 + 400). Setzt man konservativ den häufigen Fall mit den geringeren Schadensausmaß an und multipliziert diesen mit der Schadenshäufigkeit von 11 %, so ergibt sich ein Schadensrisiko durch Korrosion von 0,011 % der Baukosten. Im „Worst Case“-Fall beträgt das Schadensrisiko 0,077 % der Baukosten. Diese Werte gelten für das erstmalige Auftreten eines Schadens nach Inbetriebnahme. Erfahrungsgemäß zeigen sich erste korrosionsbedingte Schäden kurz oder spätestens nach 5 Jahren nach Inbetriebnahme. Der weitere Schadensverlauf und die daraus resultierenden Kosten hängen zu sehr von den individuellen Maßnahmen ab, als dass hier eine allgemeingültige Prognose möglich wäre.



2.4.6 Energetischen Betrachtungen

Der Einfluss korrosionsbedingter Schäden oder Ablagerungen auf den Energieverbrauch soll durch den Vergleich der Energieverbräuche vor und nach einer Sanierung betrachtet werden. Als Sanierungsbeispiele dienen die Systeme 9 und 11. Beim Objekt 10 konnte die Sanierung seitens des Trägers nicht im Projektverlauf abgeschlossen werden. Trotzdem werden die Energieverbräuche während der Monitoringphase (Phase II der Feldstudie) hier dargestellt. Objekt 11 wurde im Jahr 2014 durch eine Firma mechanisch-chemisch gespült. Entsprechend werden die Verbräuche der Jahre 2013 und 2015 gegenübergestellt. Objekt 9 (Systeme 9.1) wurden im Jahr 2017 mechanisch gespült und neu befüllt. Hier werden die Verbräuche der Jahre 2016 und 2018 gegenübergestellt (Abb. 38). Die Verbrauchswerte werden nach VDI 3807 – Gradtagszahl witterungsbereinigt (Abb. 39). In allen Fällen wird eine Raumtemperatur von 20 °C und eine Heizgrenztemperatur von 15 °C zugrunde gelegt.

Objekt 9

Das Heizsystem dieses Objektes (System 9.1) war bei der Beprobung in der Phase I außerordentlich korrodiert. Das Umlaufwasser wies sehr hohe Eisengehalte auf, so dass von Ablagerungen in Wärmetauschern und den Konvektoren auszugehen war. Als Wärmeerzeuger dienen ein Blockheizkraftwerk und ein Gaskessel. Theoretisch besteht die Möglichkeit einer Effizienzsteigerung der Wärmeerzeuger, wenn die Rücklauftemperaturen infolge einer besseren Wärmeabgabe der Konvektoren durch die Spülung niedriger ausfallen. Die Spülung erfolgte im Herbst 2017. Die Verbrauchswerte werden in Abb. 38 und Abb. 39 dargestellt. Die Verbrauchswerte basieren auf dem gesamten Gasverbrauch für das Blockheizkraftwerk und die Gaskessel.

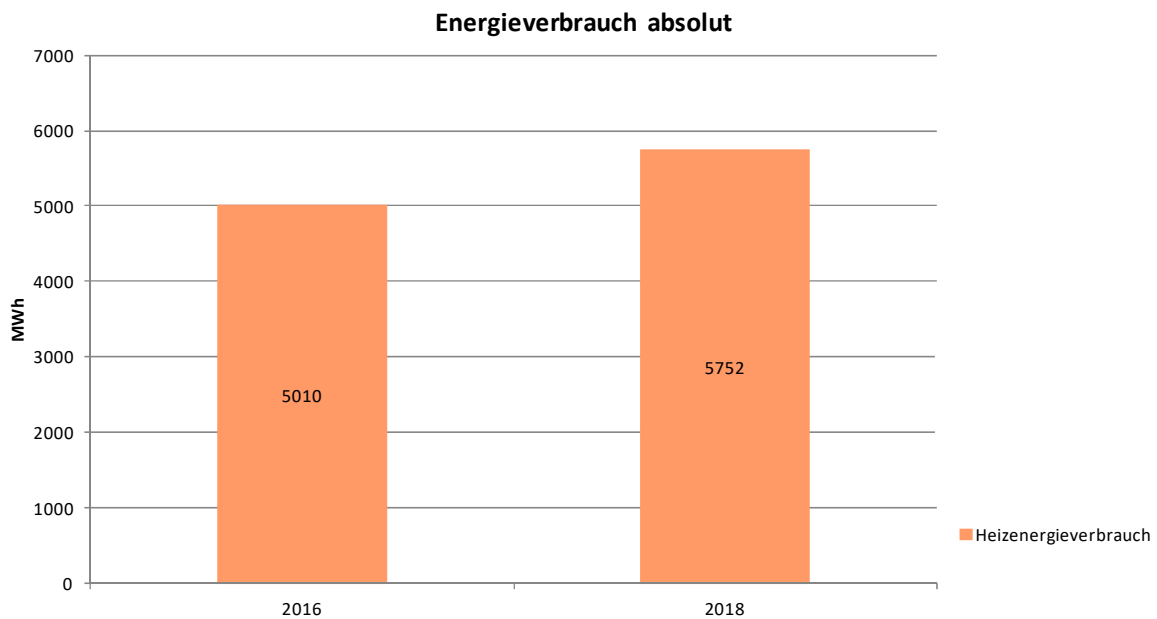


Abb. 38: Heizenergieverbrauch unbereinigt der Jahre 2016 und 2018, Objekt 9

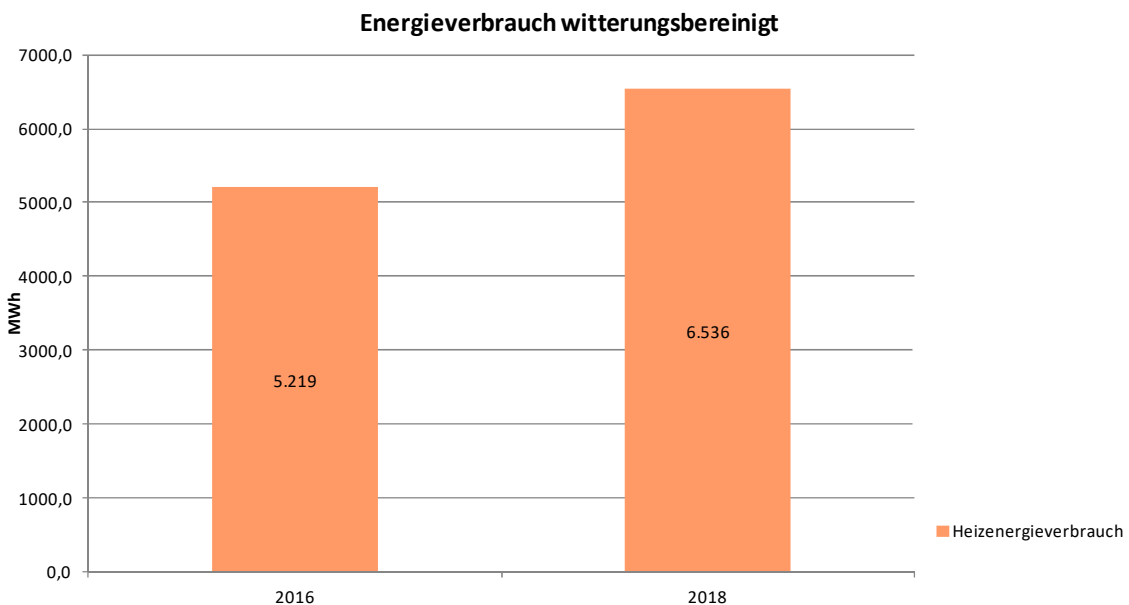


Abb. 39: Heizenergieverbrauch witterungsbereinigt der Jahre 2016 und 2018, Objekt 9

Entgegen der Erwartung hat sich der Heizenergieverbrauch nach der Spülung erhöht. Da die Konvektoren zum Teil mit nicht thermostatgesteuerten Regelventilen ausgestattet sind, ist es denkbar, dass sich die Wärmeabgabe der Konvektoren nach der Spülung erhöht hat. Die verbesserte Wärmeabgabe wurde nicht durch Thermostatventile kompensiert, sondern führte zu höheren Raumtemperaturen.



Objekt 10

In diesem Objekt bestanden im Kühlsystem mikrobiologisch bedingte Korrosionserscheinungen, während das Heizsystem unauffällig war. Das Umlaufwasser des Kühlsystems war bei der Erstbeprobung im Jahr 2016 trübe und wies relevante Eisengehalte auf. Unter energetischen Gesichtspunkten ist anzumerken, dass Gasansammlungen sowohl in den Heiz- als auch den Kühlflächen in den Wänden die Durchströmung behinderten. Im Monitoringzeitraum wurden die Wandsysteme mittels erhöhter Volumenströme entlüftet. Ein Entgaser wurde wie empfohlen beschafft aber im Projektzeitraum nicht mehr verbaut.

Objekt 11

Ein System des Objektes wurde vor Projektstart im Jahr 2014 saniert und später in das Monitoring aufgenommen. Es handelt sich um das System 11.1 mit Heiz- und Kühldecken, die über diffusionsoffene Kapillarmatten verfügen. Durch den eindringenden Sauerstoff kam es zu erheblichen Korrosionserscheinungen. Die Ablagerungen bewirkten unter anderem ein Festsitzen der Ventile. Es erfolgte eine intensive mechanisch-chemische Spülung. Anschließend wurde das System mit Korrosionsschutzmitteln versehen. Aus energetischer Sicht sind Effizienzeinbußen infolge verstopfter Kapillarmatten und einer fehlerhaften Regelung durch die festsitzenden Ventile zu erwarten gewesen. So ist es z.B. möglich, dass die Decke heizt oder kühlt, während die Raumluftkonditionierung einen konträren Betrieb fährt.

2.4.7 Simulationsstudie zur Auswirkung von Belägen auf die Energieeffizienz von Heiz- und Kühlsystemen

Methodik

Zur Bewertung einer die Wärmeübertragungseigenschaften eines Wärmeübertragers beeinflussenden Verschmutzung, z. B. durch einen Biofilm auf den wärmeübertragenden Flächen, wurden Simulationen mit dem numerischen Simulationsprogram TRNSYS, Programmversion 17 durchgeführt. Bei der Erstellung der benötigten TRNSYS-Steuerdateien sowie zur Bedienung des Programms fand das zum Programmpaket TRNSYS gehörende Simulation Studio in der Version 5.4.0.0 Anwendung. Die Beschreibung des Bürogebäudes in einem für TRNSYS nutzbaren Format erfolgte mit Hilfe des im Programmpaket von TRNSYS 17 enthaltene Zusatzprogramms TRNBuild 2.0. Die mittels TRNBuild erzeugte Gebäudebeschreibung wird von der TRNSYS-Steuerdatei eingelesen.

(Quelle: Trnsys TRaNsient SYstem Simulation Program: TRNSYS 17, TRaNsient SYstem Simulationprogramm, Version 17.02.0004, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison.)

Die Plausibilität des mittels des Simulation Studios modellierten Gesamtsystems inkl. sämtlicher Anlagentechnik und Zusatzkomponenten, z. B. zur Ergebnisausgabe, wurde mittels Bilanzierung von Energieströmen sowie der Überprüfung von Temperaturverläufen auf Sinnhaftigkeit und Schlüssigkeit vorgenommen.

Bei der Berechnung der notwendigen Energieströme zur Beheizung und/oder Kühlung des betrachteten Büros wurden Wärmeübertragungsvorgänge als „ideal“, d. h. ohne Verluste sowie ohne kapazitive Effekte der wärmeübertragenden Bauteile angenommen.

Die Simulationsschrittschrittweite wurde für alle Simulationen auf 6 Minuten festgelegt. Das heißt, die Zustände einer jeden Systemkomponente wurden in konsekutiven Zeitintervallen von 6 Minuten vorlaufend berechnet.

Der simulierte Zeitraum und die zugehörigen Auswertungen umfassen 12 Monate (ein Jahr). Die Beeinträchtigung des Wärmeübergangs durch Beläge wird durch die Variation des Faktors $k \cdot A$ (Wärmedurchgangswiderstand $\cdot$ Fläche) ausgedrückt. Beläge können sowohl den Wärmedurchgang als auch die verfügbare Übertragungsfläche beeinträchtigen. Bezogen auf die Wärmeübertragungsleistung wird aus der Praxis von einer Leistungsminderung von bis 50 % berichtet.

Randbedingungen

Stoffwerte

Luft: Vorgeschlagene und gewählte Werte aus dem Programmpaket von TRNSYS 17.

- $cp_{Luft} = 1.012 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
- $\rho_{Luft} = 1.204 \text{ kg}/\text{m}^3$

Wasser: Mittelwerte über den Bereich der Wassererwärmung in modernen Heizungsanlagen

(10°C bis 60°C).

- $cp_{H_2O} = 4,181 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
- $\rho_{H_2O} = 992,42 \text{ kg}/\text{m}^3$



Kriterium	Randbedingungen	
Nutzungszeit	(Montag – Freitag 7:00 Uhr – 18:00 Uhr)	
Klimaregion	TRY Zone 4 (Potsdam)	
Interne Wärmeeinträge	Personenbelegung (mittel)	5 W/m ² ; 6 h/d
	Arbeitshilfen (mittel)	7,1 W/m ² ; 6 h/d
	9:00-12:00 Uhr und 15:00-18:00 Uhr	
	Beleuchtung 15 W/m ²	
	8:00 – 10:00 und 16:00 -18:00 von Okt. bis März	
Soll Raumtemperatur	21°C (Heizung)	
	24°C (Kühlung)	
	5:00 – 18:00 Uhr	
	Sonstige Zeiträume:	
	16°C	
Luftwechsel (mechanisch, Wärmerückgewinnung, Wärmerückgewinnungsgrad 79 %)	n = 2 h ⁻¹	
	5:00 – 18:00 Uhr	
Sonnenschutz	Einstrahlungsabhängig	
Beleuchtung	Zielwert der Beleuchtungsstärke	500 lx;
	Höhe der Nutzebene	0,8 m

Kunstlicht wird automatisch am Tageslichtangebot angepasst

Außenwand (Süd)

U-Wert 0,1 W/m²;

Alle anderen Wände, Decke, Boden adiabat;

Fenster:

Interpane IPASOL natura 6634 6/16/4;

Window ID : 14006

u-Wert: 1.0 W/(m²K)

g-Wert: 0.328

T-Sol: 0.3

RF-Sol: 0.356

Tau: 0.657

Geometrie

Gruppenbüro 100 m², 10*10*3 m

Raumheizung

- Standort Potsdam
- Normaußentemperatur -14°C
- Heizgrenze des simulierten Bürogebäudes: 14°C
- Solltemperatur des Büroraumes bei aktivierter Raumheizung: 21°C
- Vorlauftemperatur in die Raumkühlflächen bei Außentemperatur 14°C: 28°C
- Vorlauftemperatur in die Raumheizflächen bei Außentemperatur -14°C: 35°C
- Rücklauftemperatur aus den Raumheizflächen bei Außentemperatur -14°C: 25°C

Raumkühlung

- Standort Potsdam
- Solltemperatur des Büroraumes bei aktivierter Raumkühlung: 24°C
- Vorlauftemperatur in die Raumkühlflächen bei Außentemperatur 24°C: 20°C
- Vorlauftemperatur in die Raumkühlflächen bei Außentemperatur 35°C: 16°C
- Rücklauftemperatur aus den Raumkühlflächen bei Außentemperatur 35°C: 26°C

Ergebnisse

Auf Grundlage der dokumentierten Eintritts- und Austrittstemperaturen des Heizmediums als auch des Kühlmediums können keine eindeutigen Zusammenhänge zwischen Eintrittstemperaturen und zugehörigen Austrittstemperaturen identifiziert werden. Dies gilt gleichermaßen für die Raumheizung (Abb. 40) als auch für die Raumkühlung (Abb. 41)

Der Grund liegt in der streng außentemperaturabhängigen Eintrittstemperatur (Zulauftemperatur) des Heiz- und Kühlmediums, der stochastischen Verteilung von solaren Gewinnen des Büroraumes und den zeitlich variablen internen Wärmelasten durch Personen, Arbeitshilfen und Beleuchtung sowie den zeit- und wochentagabhängigen Sollraumtemperaturen für Heizung und Kühlung.

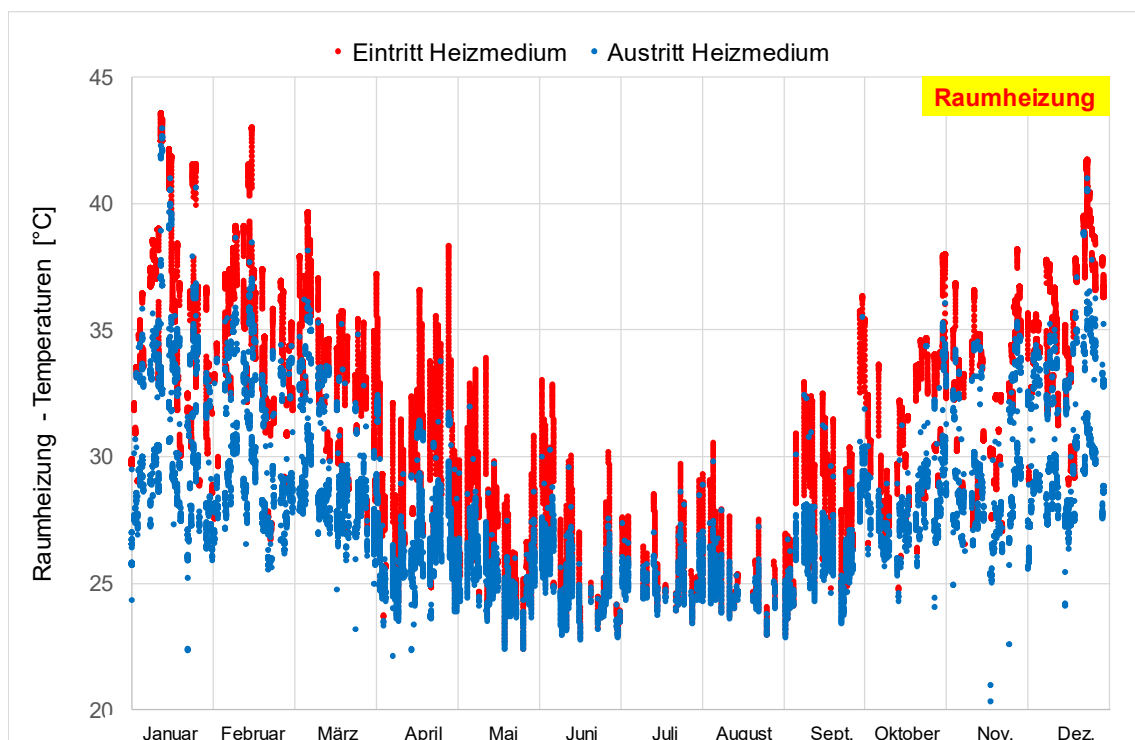


Abb. 40: Vor- und Rücklauftemperaturen des Heizmediums im unbeeinträchtigten System

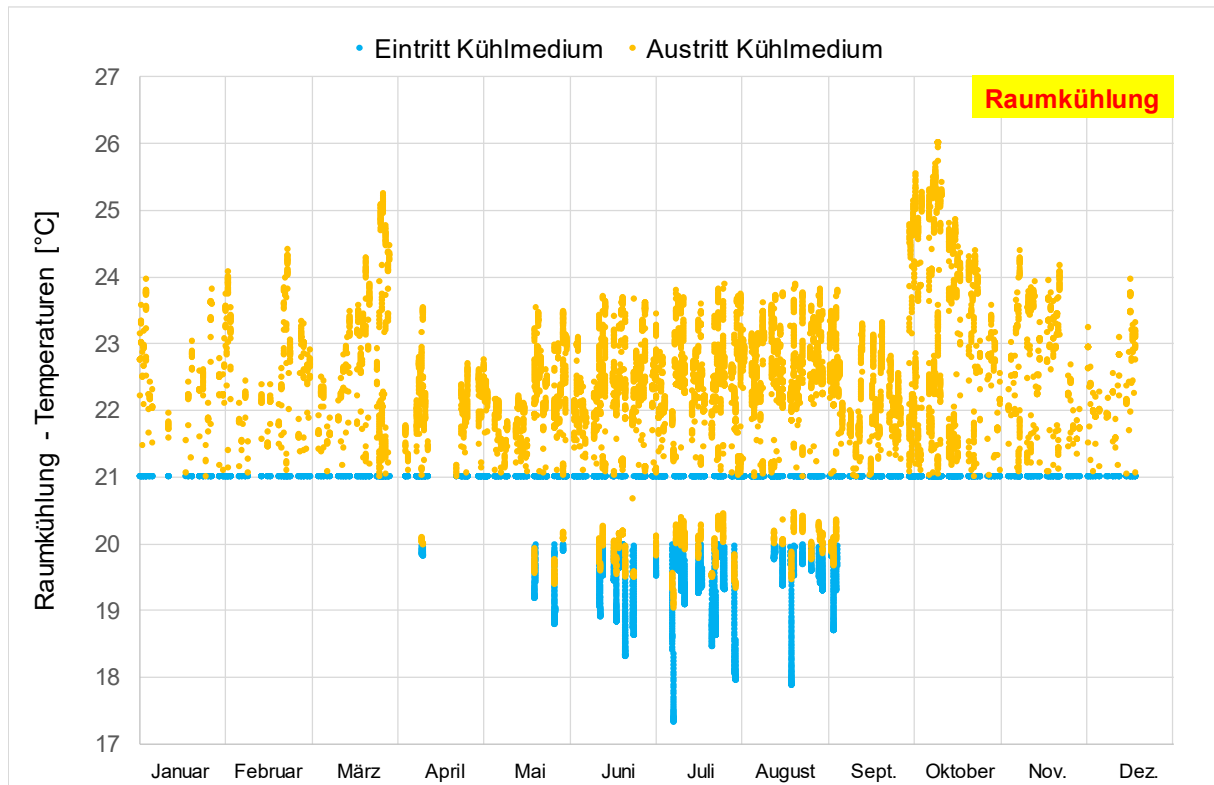


Abb. 41: Vor- und Rücklauftemperaturen des Kühlmediums im unbeeinträchtigten System

Bei wärmeübertragenden Flächen, denen geringe treibende Temperaturdifferenzen zugrunde liegen, z. B. eine Auslegungstemperaturdifferenz von nur 1 K, wirken sich durch Fouling (z. B. infolge Biofilm) reduzierte Wärmedurchgangswerte in absolut größere Zahlenwerte der Reduzierung des Wärmedurchgangs aus. Bezogen auf den Anfangszustand mit unverschmutzten Wärmeübertragungsflächen ist die Reduzierung unabhängig von der Auslegungstemperaturdifferenz gleich, siehe Abb. 42.

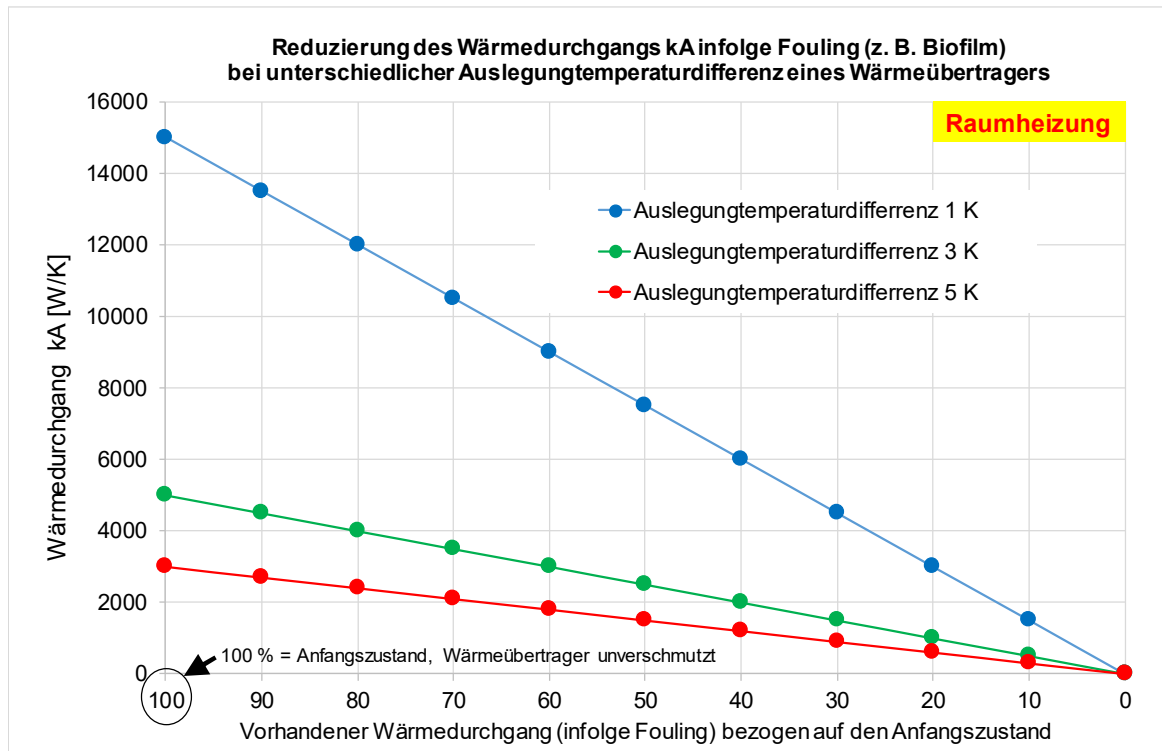


Abb. 42: Abhängigkeit der Wärmeübertragungsleistung von dem Wärmedurchgang kA [W/K]

Bei wärmeübertragenden Flächen, denen geringe treibende Temperaturdifferenzen zugrunde liegen, z. B. eine Auslegungstemperaturdifferenz von nur 1 K, wirken sich durch Fouling (z. B. infolge Biofilm) reduzierte Wärmedurchgangswerte in absolut größere Zahlenwerte der Reduzierung des Wärmedurchgangs aus. Bezogen auf den Anfangszustand mit unverschmutzten Wärmeübertragungsflächen ist die Reduzierung unabhängig von der Auslegungstemperaturdifferenz gleich, siehe Abb. 43.

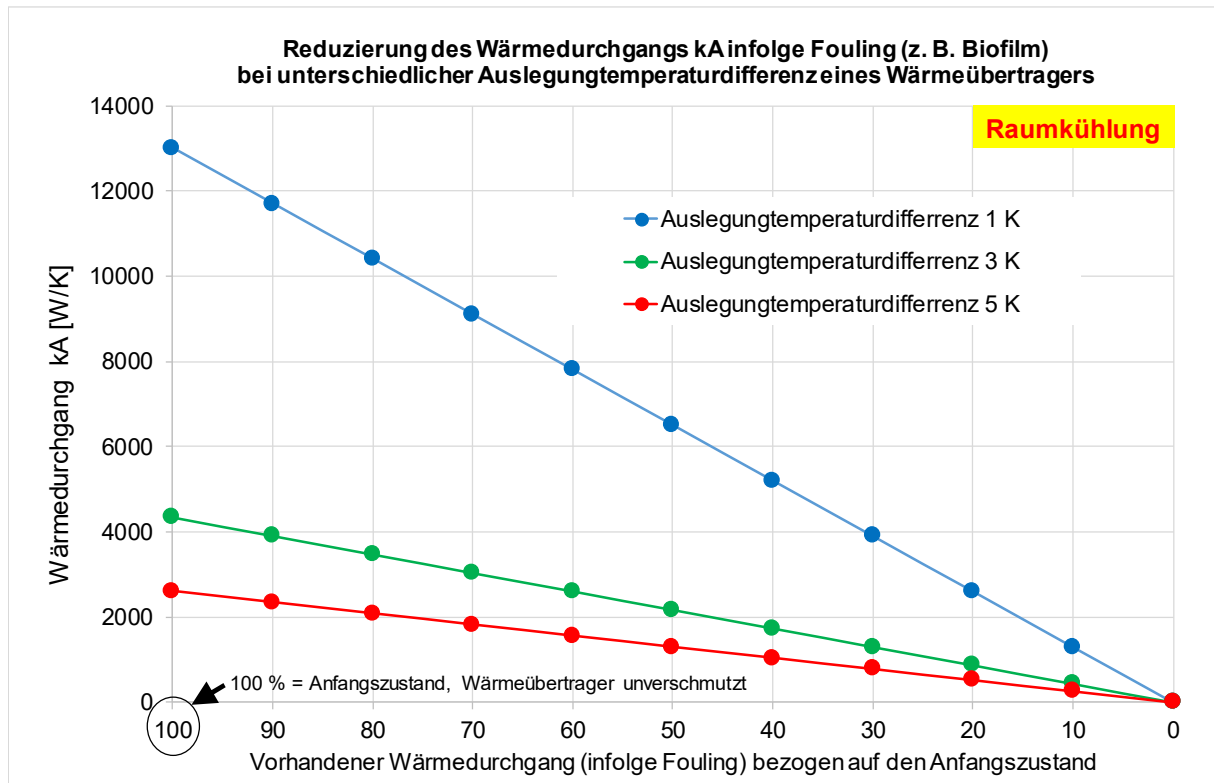


Abb. 43: Abhängigkeit der Wärmeübertragungsleistung von dem Wärmedurchgang kA [W/K] (Heizsystem)

Wie in Abb. 44 zu sehen ist, ist neben dem Wärmedurchgangswert kA die *treibende Temperaturdifferenzen* bei der Wärmeübertragung ein entscheidender Parameter. Bei der Berechnung von Wärmeübertragern wird üblicherweise mit der sog. *mittleren logarithmischen Temperaturdifferenz* ($\Delta T_{ln, \text{mittel}}$) operiert. Dabei wird die Temperaturdifferenz $\Delta T_{ln, \text{mittel}}$ als *treibende Temperaturdifferenz* angesetzt.

Abb. 44 verdeutlicht, dass die Auslegungstemperaturdifferenz für eine Wärmeübertragung einen signifikanten Einfluss auf die notwendige Erhöhung der treibenden Temperaturdifferenz infolge Fouling zur Erzielung derselben Übertragungsleistung wie bei einem unverschmutzten Wärmeübertrager hat. In technischen Maßstäben kann man die notwendige Temperaturerhöhung bei einer Reduzierung der vorhandenen Leistung auf ca. 30 % der Ausgangsleistung und einer Auslegungstemperaturdifferenz von 1 K (blaue Kurve) als gering, bei einer Auslegungstemperaturdifferenz von 3 K (grüne Kurve) als moderat und bei einer solchen von 5 K (rote Kurve) als signifikant bezeichnen.

Eine Erhöhung der treibenden Temperaturdifferenz wird bei technischen Anwendungen zu Beheizung von Räumen üblicherweise durch eine Anhebung der Zulauftemperatur auf der Quellenseite der Wärmeübertragung (Primärseite), zu Kühlzwecken von Räumen gewöhnlich durch eine Absenkung der Zulauftemperatur auf der Quellenseite der Wärmeübertragung (Primärseite) realisiert.

Wird die treibende Temperaturdifferenz hingegen nicht an eine reduzierte Übertragungsleistung angepasst, verringert sich die übertragene Leistung und damit die übertragene Energie (Abb. 46 und Abb. 47)

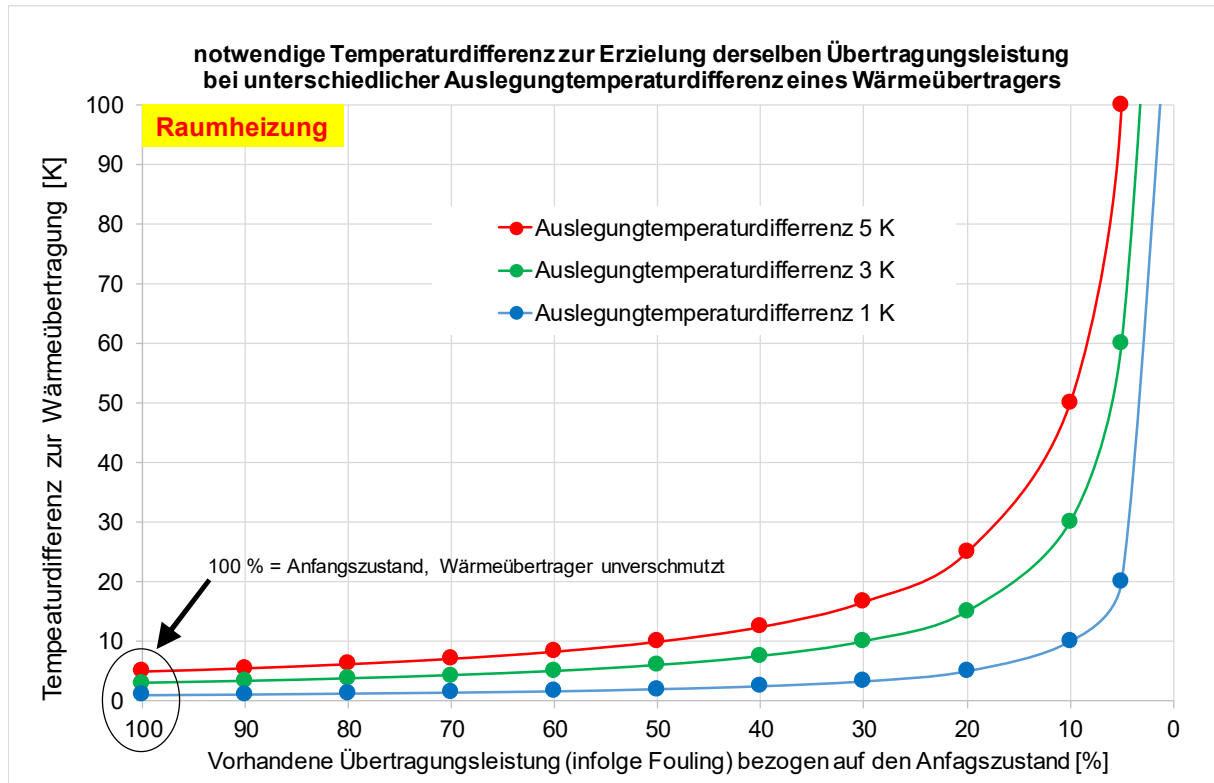


Abb. 44: Abhängigkeit der erforderlichen Temperaturdifferenz von dem Wärmedurchgang $k \cdot A$ [W/K] (Heizsystem)

Bei einer Verringerung der übertragenen Leistung und damit Energie wird ein bestehender Bedarf nicht mehr gedeckt. Bei der Beheizung und Kühlung des untersuchten Bürogebäudes bedeutet dies, dass die Solltemperatur im Heizfall bzw. die max. Raumtemperatur im Kühlfall nicht eingehalten werden.

Effizienzeinbußen, die sich infolge eines reduzierten Wärmeübergang, in diesem Zusammenhang durch erhöhte Rücklauftemperaturen z. B. in ein Gasbrennwertgerät oder niedrigere Zulauftemperaturen (Rücklauftemperaturen) in einen Kälteerzeuger ergeben, sind vom jeweiligen Wärme- bzw. Kälteerzeuger abhängig und können nicht pauschal beziffert werden, siehe Abb. 45.

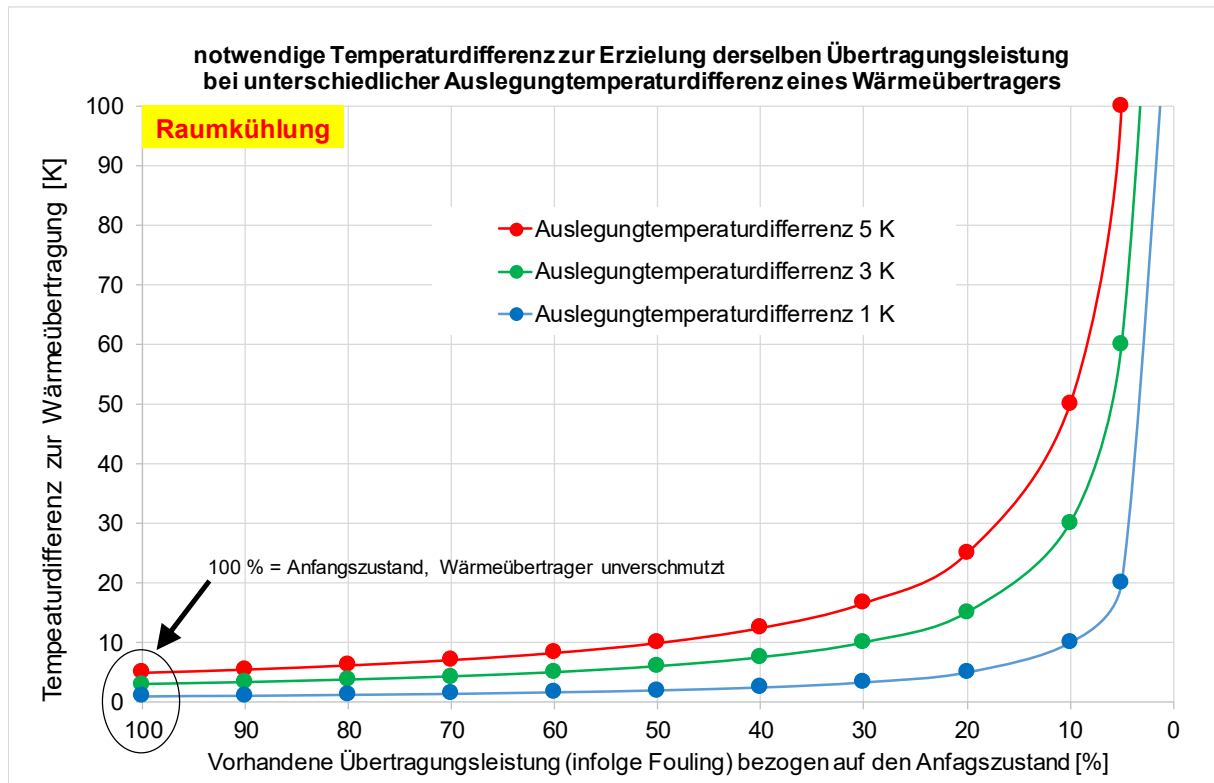


Abb. 45: Abhängigkeit der erforderlichen Temperaturdifferenz von dem Wärmedurchgang $k \cdot A$ [W/K] (Kühlsystem)

Bei einer Verringerung der übertragenen Leistung und damit Energie wird ein bestehender Bedarf nicht mehr gedeckt. Bei der Beheizung und Kühlung des untersuchten Bürogebäudes bedeutet dies, dass die Solltemperatur im Heizfall bzw. die max. Raumtemperatur im Kühlfall nicht eingehalten werden.

Effizienzeinbußen, die sich infolge eines reduzierten Wärmeübergangs, in diesem Zusammenhang durch erhöhte Rücklauftemperaturen z. B. in ein Gasbrennwertgerät oder niedrigere Zulauftemperaturen (Rücklauftemperaturen) in einen Kälteerzeuger ergeben, sind vom jeweiligen Wärme- bzw. Kälteerzeuger abhängig und können nicht pauschal beziffert werden, siehe Abb. 46.

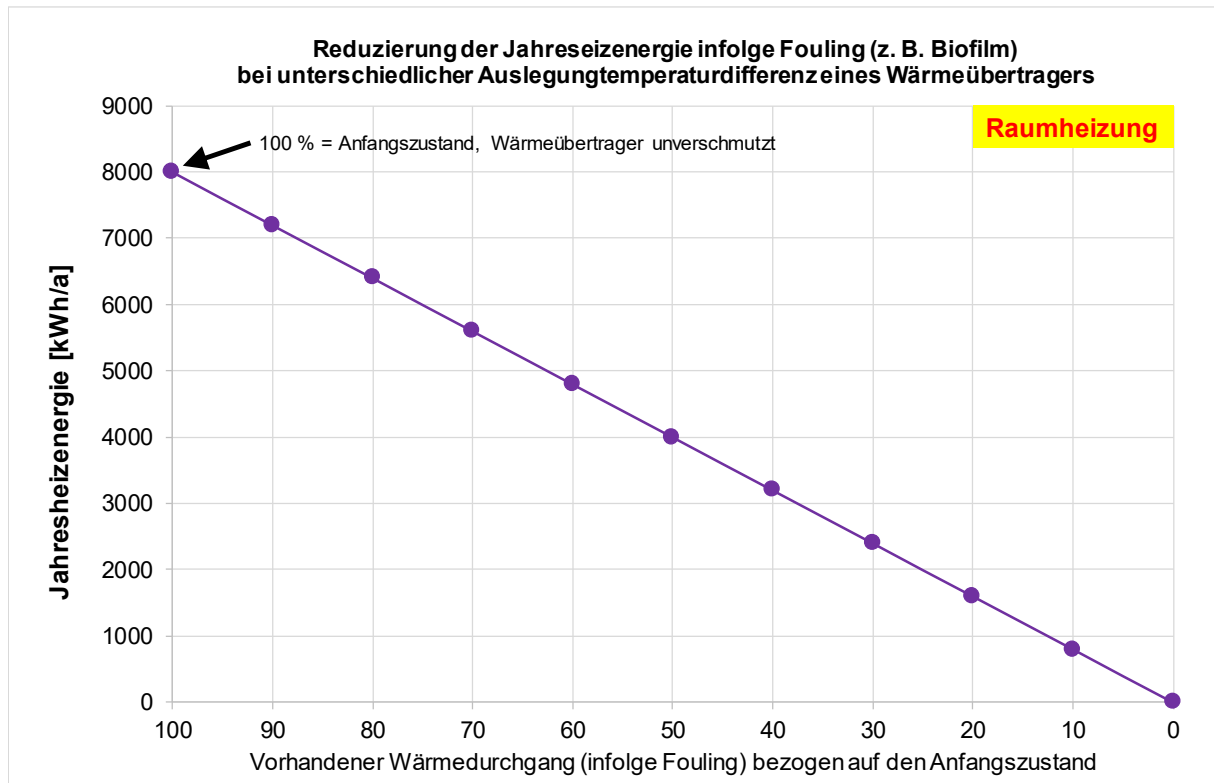


Abb. 46: Reduzierung der Jahresheizenergie infolge Belagbildung bei verringertem Wärmedurchgang (Heizsystem)

Bei einer Verringerung der übertragenen Leistung und damit Energie wird ein bestehender Bedarf nicht mehr gedeckt. Bei der Beheizung und Kühlung des untersuchten Bürogebäudes bedeutet dies, dass die Solltemperatur im Heizfall bzw. die max. Raumtemperatur im Kühlfall nicht eingehalten werden, siehe Abb. 47.

Effizienzeinbußen, die sich infolge eines reduzierten Wärmeübergangs, in diesem Zusammenhang durch erhöhte Rücklauftemperaturen z. B. in ein Gasbrennwertgerät oder niedrigere Zulauftemperaturen (Rücklauftemperaturen) in einen Kälteerzeuger ergeben, sind vom jeweiligen Wärme- bzw. Kälteerzeuger abhängig und können nicht pauschal beziffert werden.

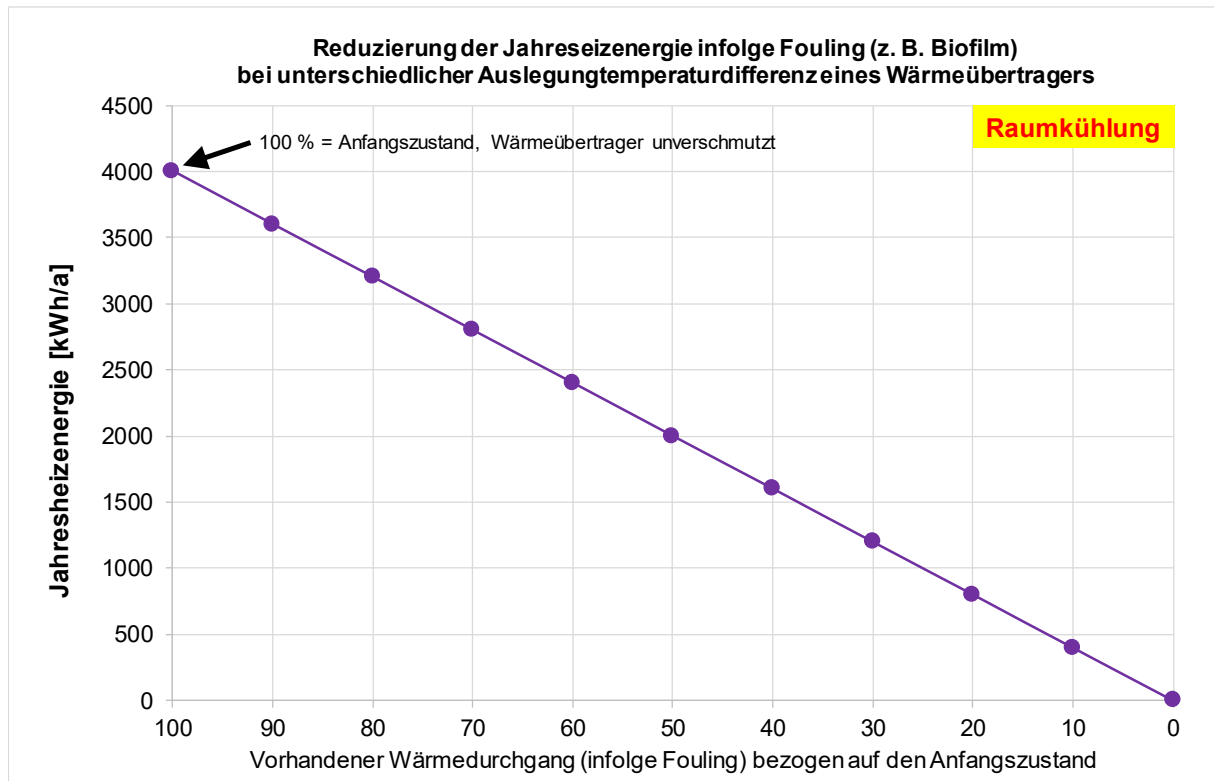


Abb. 47: Reduzierung der Jahreseizenergie infolge Belagbildung bei verringertem Wärmedurchgang (Kühlsystem)

Bei einer konstant gehaltenen Eintrittstemperatur in einen Wärmeübertrager steigt bei geforderter, konstanter Leistung und zu übertragender Energie mit Verringerung des KA-Wertes die Austrittstemperatur am Wärmeübertrager an, siehe Abb. 48.

Effizienzeinbußen, die sich infolge der erhöhten Rücklauftemperaturen z. B. in einen Gasbrennwertgerät ergeben, sind vom jeweiligen Wärmeerzeuger abhängig und nicht pauschal zu beziffern.

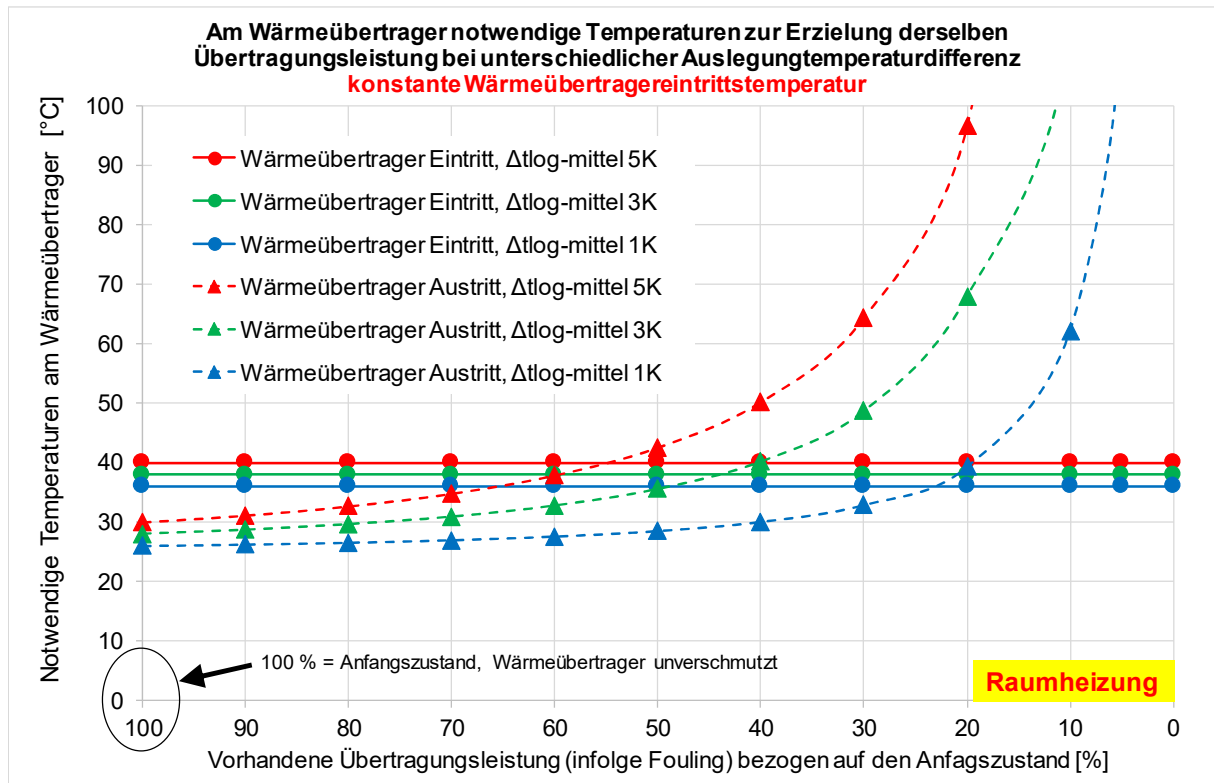


Abb. 48: Abhängigkeit der Rücklauftemperatur bei vermindertem Wärmedurchgang und konstanter Vorlauftemperatur (Heizsystem)

Bei einer konstant gehaltenen Wärmeübertrageraustrittstemperatur und konstant geforderter Leistung sowie der zu übertragenden Energie, muss mit Verringerung des kA -Wertes die Eintrittstemperatur in den Wärmeübertrager angehoben werden, siehe Abb. 49.

Sich daraus ergebende Einflüsse auf die Effizienz eines Wärmeerzeugers sind vom jeweiligen Wärmeerzeuger abhängig und können nicht pauschal beziffert werden.

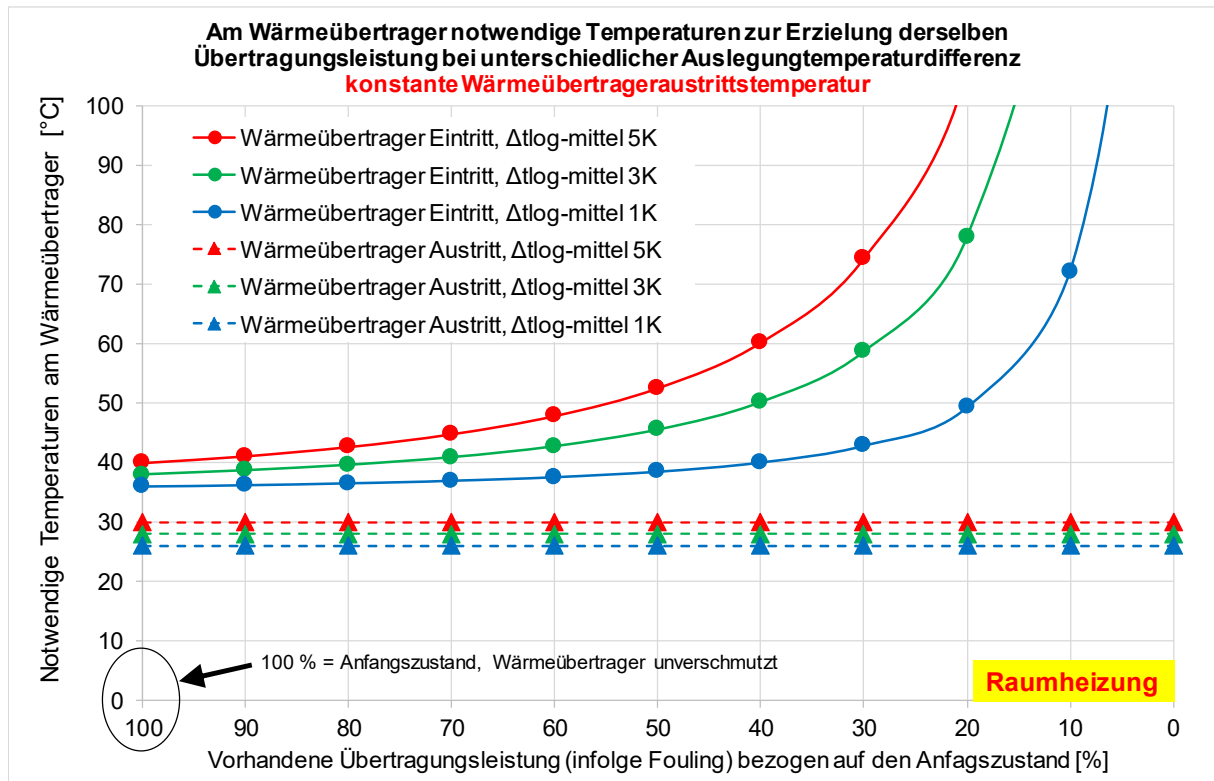


Abb. 49: Abhängigkeit der Rücklauftemperatur bei vermindertem Wärmedurchgang und konstanter Vorlauftemperatur (Heizsystem)

Bei einer konstant gehaltenen Spreizung zwischen Eintritts- und Austrittstemperatur in bzw. aus einem Wärmeübertrager steigt bei geforderter, konstanter Leistung und zu übertragender Energie mit Verringerung des KA-Wertes das notwendige Temperaturniveau an, siehe Abb. 50.

Effizienzeinbußen, die sich infolge des erhöhten Temperaturniveaus, z. B. für ein Gasbrennwertgerät ergeben, sind vom jeweiligen Wärmeerzeuger abhängig und nicht pauschal zu beziffern.

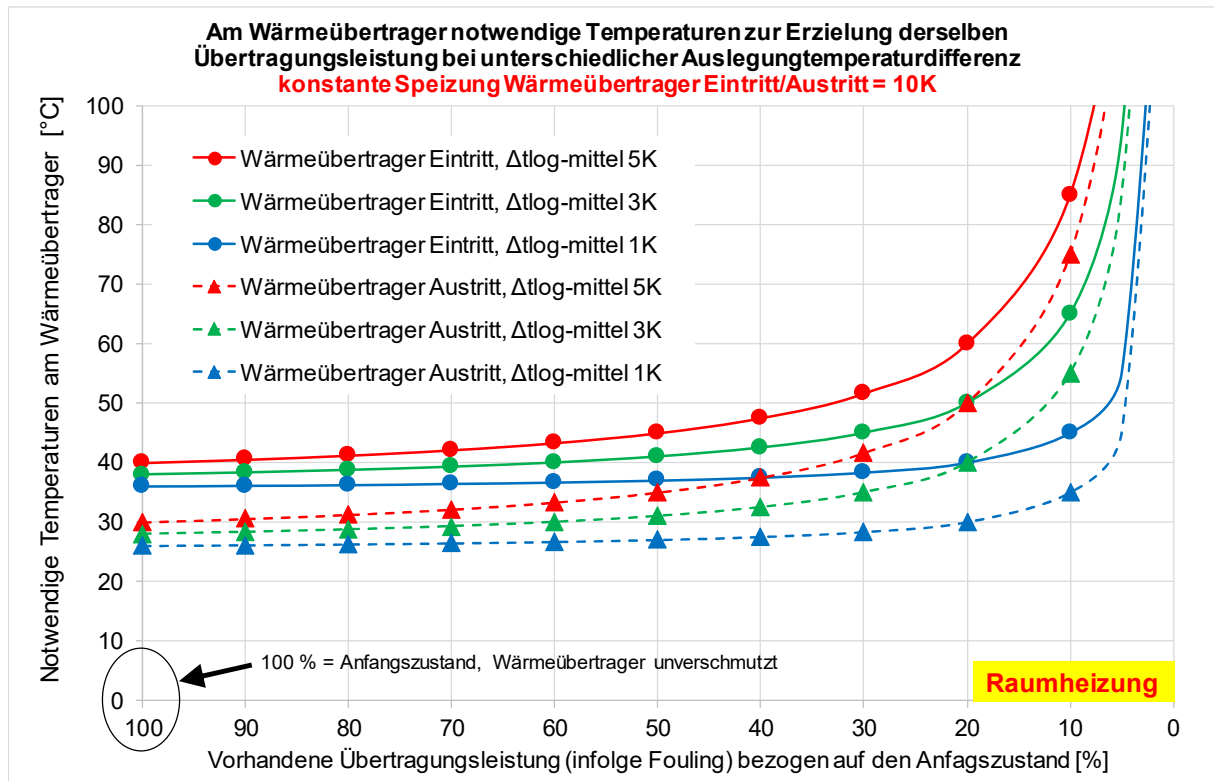


Abb. 50: Erforderliche gemittelte Temperatur am Wärmeübertrager bei verminderten Wärmedurchgang und konstanter Temperaturspeisung (Heizsystem)

Bei einer konstant gehaltenen Eintrittstemperatur in einen Wärmeübertrager sinkt bei geforderter, konstanter Leistung und zu übertragender Energie mit Verringerung des KA-Wertes die Austrittstemperatur am Wärmeübertrager ab, siehe Abb. 51.

Effizienzeinbußen, die sich infolge der erhöhten Rücklauftemperaturen, z. B. in einen Kälteerzeuger ergeben, sind vom jeweiligen Gerät abhängig und nicht pauschal zu beziffern.

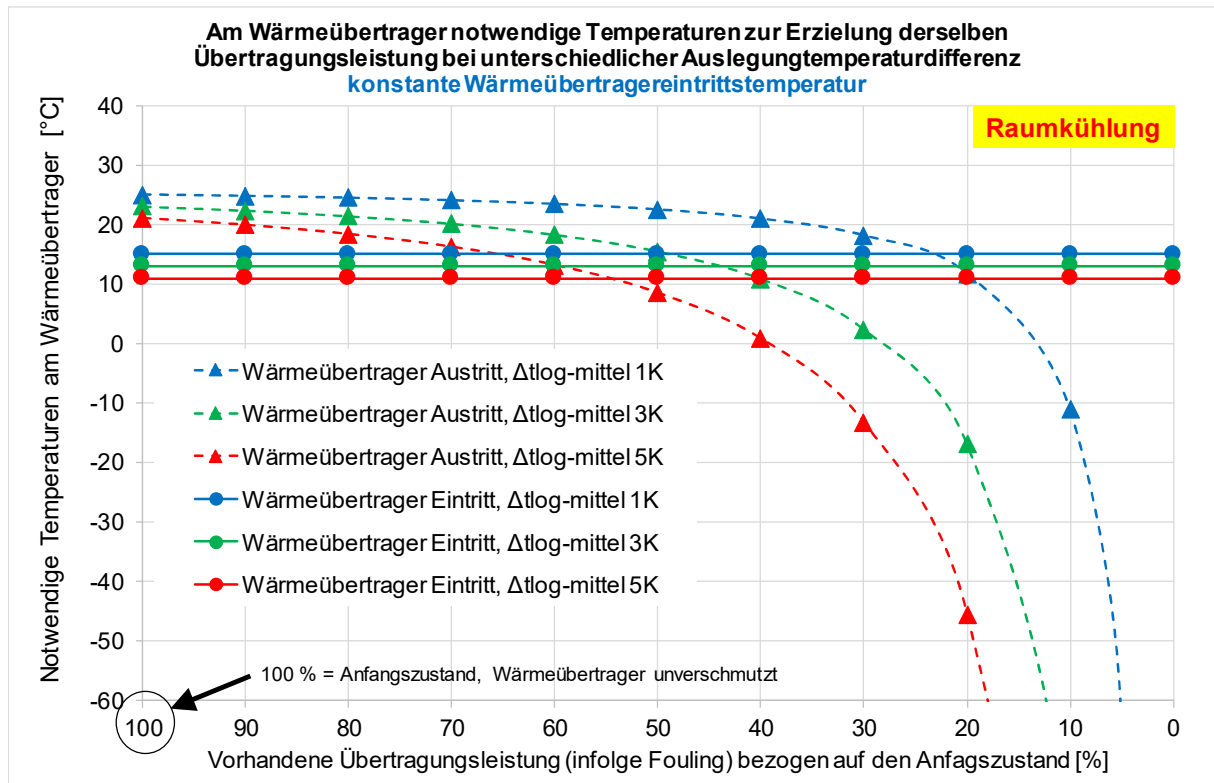


Abb. 51: Erforderliche gemittelte Temperatur am Wärmeübertrager bei verminderten Wärmedurchgang und konstanter Temperaturspreizung (Kühlsystem)

Bei einer konstant gehaltenen Wärmeübertrageraustrittstemperatur und konstant geforderter Leistung sowie der zu übertragenden Energie muss mit Verringerung des KA-Wertes die Eintrittstemperatur in den Wärmeübertrager abgesenkt werden, siehe Abb. 52.

Sich daraus ergebende Einflüsse auf die Effizienz eines Kälteerzeugers sind vom jeweiligen Gerät abhängig und können nicht pauschal beziffert werden.

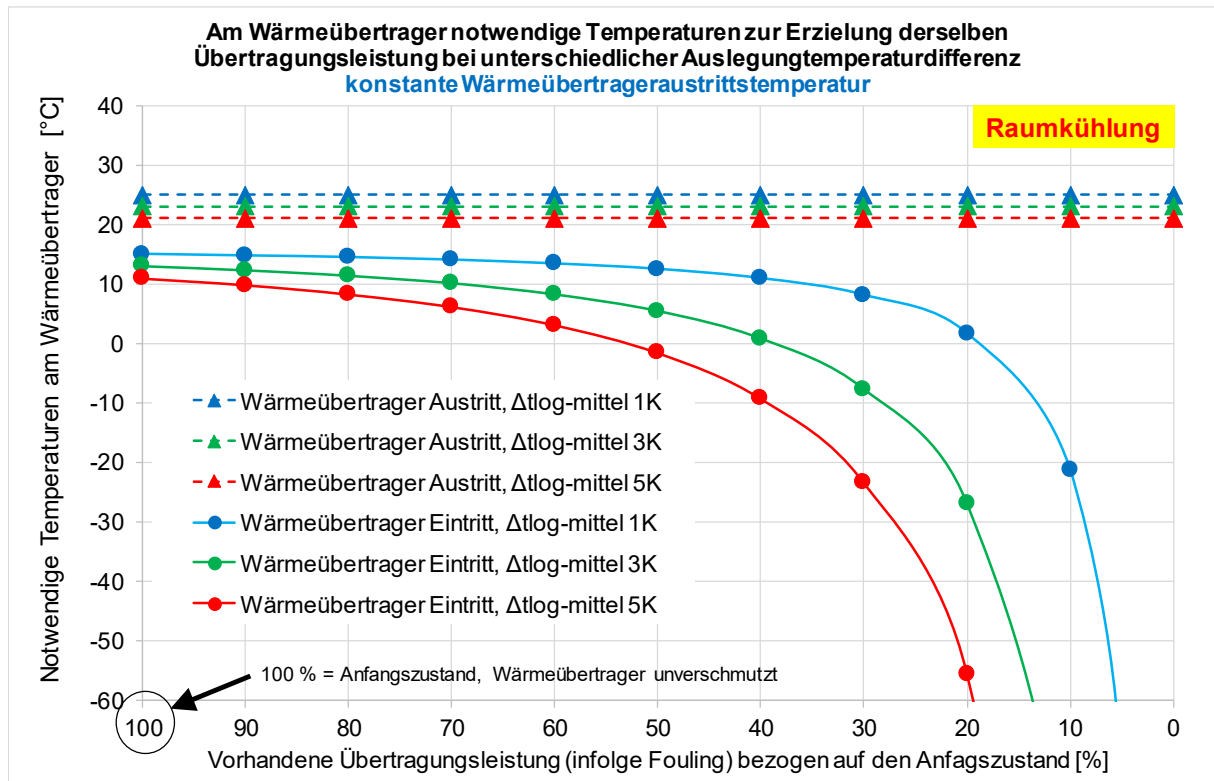


Abb. 52: Erforderliche Rücklauftemperatur am Wärmeübertrager bei verminderten Wärmedurchgang und unterschiedlicher Temperaturspreizung (Kühlsystem)

Bei einer konstant gehaltenen Spreizung zwischen Eintritts- und Austrittstemperatur in bzw. aus einem Wärmeübertrager sinkt bei geforderter, konstanter Leistung und zu übertragender Energie mit Verringerung des KA-Wertes das notwendige Temperaturniveau ab, siehe Abb. 53.

Effizienzeinbußen, die sich infolge des absinkenden Temperaturniveaus, z. B. für einen Kälteerzeuger ergeben, sind vom jeweiligen Gerät abhängig und nicht pauschal zu beziffern.

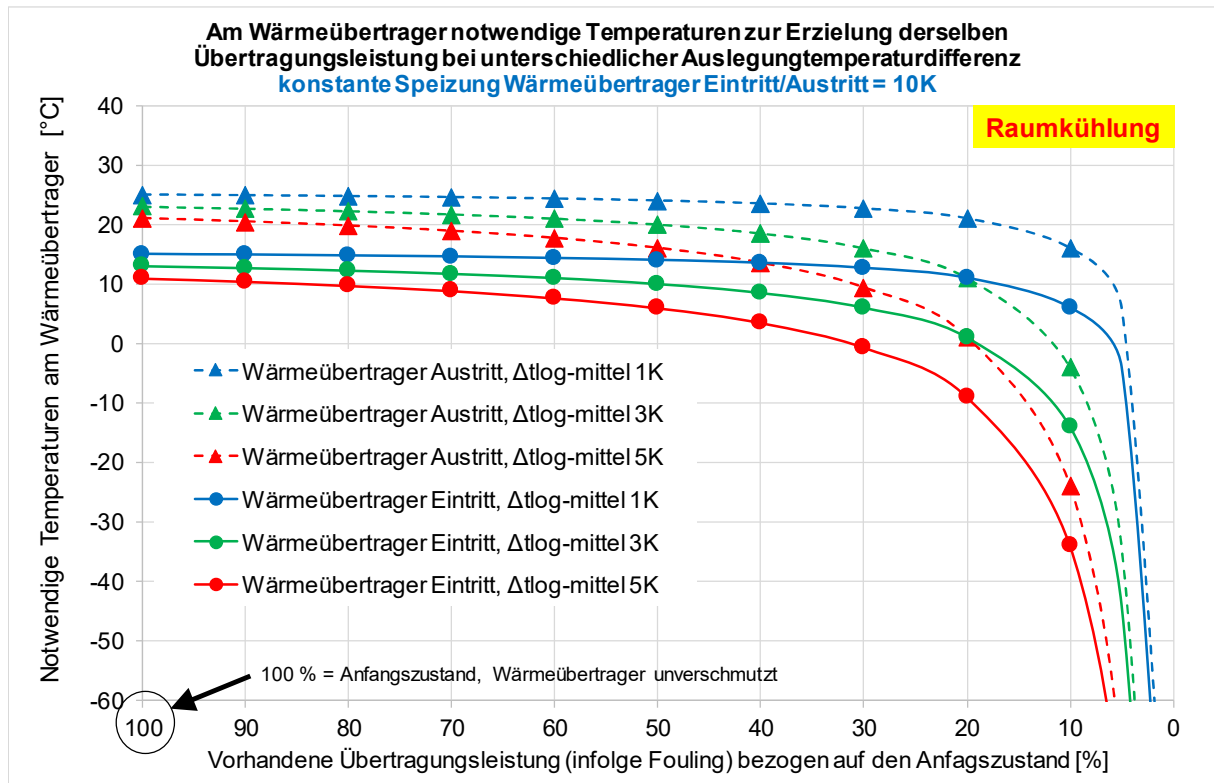


Abb. 53: Erforderliche mittlere Temperatur am Wärmeübertrager bei unterschiedlicher Auslegungstemperaturdifferenz (Kühlsystem)

Bewertung

Durch eine Verringerung der Übertragungsleistung infolge einer Belagbildung kommt es zunächst zu einer Leistungsverminderung mit einhergehenden Komfortbeeinträchtigungen und einem reduzierten Energieverbrauch, wenn man die resultierenden Effizienzeinbußen der Kälte- und Wärmeerzeuger unberücksichtigt lässt. Berücksichtigt man jedoch die reduzierte Effizienz eines Kälte- oder Wärmeerzeugers infolge erhöhter Rücklauftemperaturen sind Effizienzeinbußen im Gesamtsystem zu erwarten. Ein Brennwertkessel läuft dann nicht mehr im Brennwertbereich und Kälteerzeuger bzw. eine Wärmepumpe arbeiten bei höheren Rücklauftemperaturen mit einem niedrigeren Wirkungsgrad. Beispielhaft werden die Ergebnisse bei einem Brennwertkessel der Fa. Solvis angewendet (Typ SolvisMax SX 356 und baugleiche, 30 kW). Für den Brennwertbereich wird eine Vorlauftemperatur von 50 °C und eine Rücklauftemperatur von 30°C angegeben. In diesem Fall hat der Kessel einen Wirkungsgrad von 106,2 %. Bei einer Vorlauftemperatur von 80°C und einer Rücklauftemperatur von 60°C beträgt der Wirkungsgrad 96,8 %. Für die Betrachtung werden für beide Bereiche die mittleren Temperatur herangezogen und Zwischenwerte geradlinig interpoliert:

- Mittlere Temperatur Brennwertbereich: 40°C – Wirkungsgrad 106,2 %
- Mittlere Temperatur außerhalb Brennwertbereich: 70°C – Wirkungsgrad 96,8 %

Wird eine konstante Rücklauftemperatur und eine erhöhte Vorlauftemperatur unterstellt, die erforderlich ist, um die gleiche Leistung zu gewährleisten sowie einer Auslegungsspreizung von 5 K (gem. Abb. 49), ergibt sich bei geringen Einschränkungen der Wärmeübertragungsleistung bis ca. 40 % keine Beeinflussung der Effizienz des Brennwertkessels, wenn die Abgaswärmeverluste außer Acht gelassen werden. Bei einer Einschränkung der Wärmeübertragungsleistung von 50 % wird der Wirkungsgrad um weniger als 1 % reduziert. Erst bei einer Einschränkung der Wärmeübertragungsleistung um 70 % reduziert sich die Effizienz des Brennwertkessels um knapp 2 % auf 102,4 %.

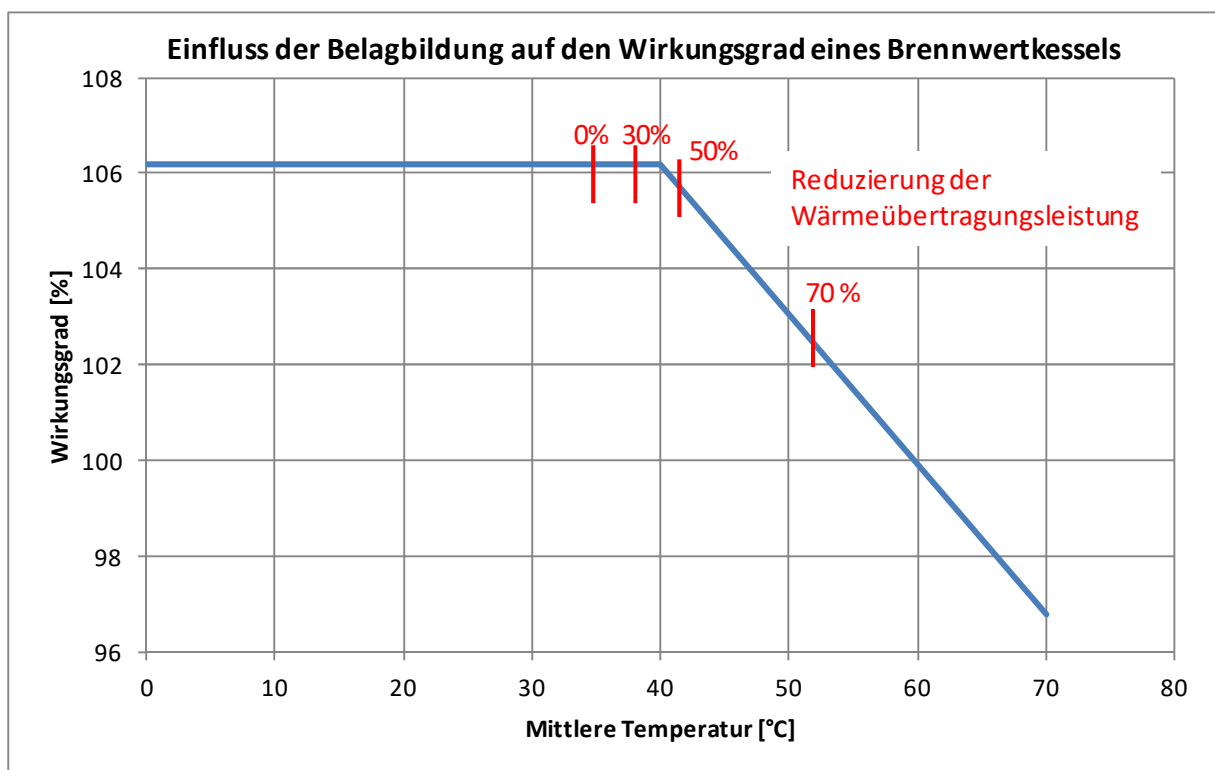


Abb. 54: Einfluss der Belagbildung auf den Wirkungsgrad eines Brennwertkessels

Eine deutlichere Auswirkung auf die Energieeffizienz hat die Belagbildung bei der Anwendung einer Wärmepumpe, wie an folgendem Beispiel dargelegt wird. Ausgehend von dem beschriebenen Zusammenhang zwischen der Belagbildung und der erforderlichen Vorlauftemperatur zur Aufrechterhaltung der notwendigen Übertragungsleistung (gem. Abb. 49) ergibt sich für die Anwendung einer Wärmepumpe des beispielhaften Typs Stiebel Eltron WPL 15 A/ IK-2 / I2 ein Zusammenhang gem. Abb. 55 [42].

Die Sonstigen Randbedingungen der Wärmepumpe lauten:

- Wärmequelle Außenluft
- Quelltemperatur -10°C
- Drehzahl 75 %

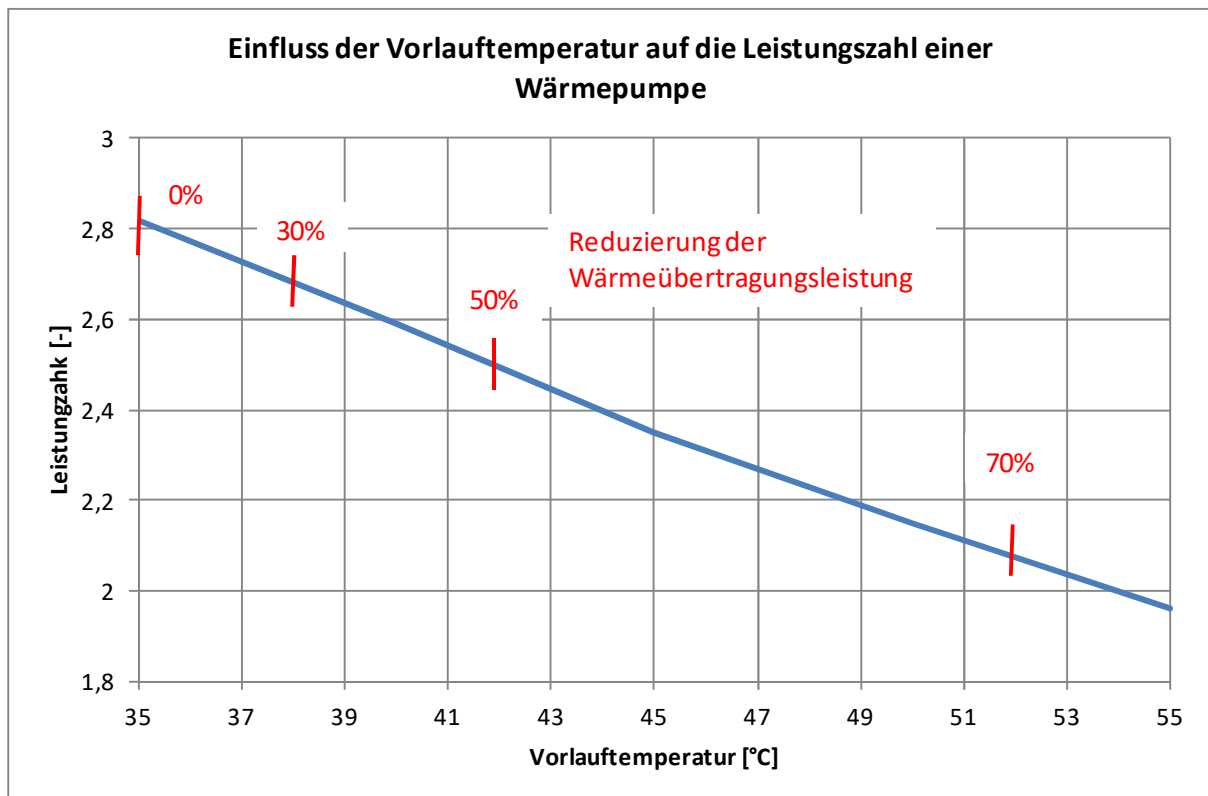


Abb. 55: Auswirkung der Änderung der Vorlauftemperatur auf die Leistungszahl einer Wärmepumpe (Stiebel Eltron WPL 15 A/ IK-2 / I2)

Die Leistungszahl der betrachteten Wärmepumpe beträgt bei einem unbeeinträchtigtem Wärmeübertrager 2,8. Bei einer um 50 % verringerten Wärmeübertragungsleistung sinkt die Leistungszahl auf 2,5, bei 70 % auf 2,1. Das entspricht einer Verringerung der Energieeffizienz von 10 % bei einer um 50 % verringerten Wärmeübertragungsleistung und um 25 % bei einer um 70 % verringerten Wärmeübertragungsleistung.

Zudem besonders relevant sind insbesondere bei Feuerungsanlagen und BHKW die schlechteren Wärmeübergänge von Brennraum und Kesselblock bzw. Abgaswärmetauscher in das Heizungswasser, die direkt proportional zu erhöhten Abgastemperaturen und damit höheren Brennstoffbedarfen führen, da sich bei wärmegeführter Fahrweise längere Laufzeiten ergeben. Bei diesen Anlagen ergeben sich direkt den verringerten Wärmeübergängen entsprechende Mehrverbräuche.

2.4.8 Einfluss von Belägen auf den hydraulischen Abgleich

Wenn der Durchfluss von Wärmeübertragern, wie z.B. einer Heiz- und Kühldecke, eingeschränkt ist, führt dies zu einer Beeinträchtigung des hydraulischen Abgleichs des Gesamt-



systems. In der Folge werden andere Anlagenteile stärker durchströmt als geplant. Bei einer gleichbleibenden Wärmeübertragungsleistung nähert sich die Rücklauftemperatur der Vorlauftemperatur an. Der Effekt ist also der gleiche, wie der in Abschnitt 2.4.7 beschriebene, der durch einen eingeschränkten Wärmeübergang resultiert, und entspricht einer verringerten Wärmeübertragung, die insbesondere bei Kesselfeuerungsanlagen und BHKW infolge der Wärmeverluste über den Abgasstrom, aber auch bei Wärmepumpen durch Verringerung des COP relevant sind. Durch sinkende Raumtemperaturen wird der Durchfluss durch ein Öffnen der Ventile weiter erhöht. Diese Effekte, erhöhter Durchfluss und eingeschränkter Wärmeübergang, können sich überlagern, so dass dann die Beeinträchtigung der Energieeffizienz höher ausfallen kann als in Abschnitt 2.4.7 beschrieben.

2.4.9 Weitere Folgen der Belagbildung in Wärmeübertragern

Es konnte beobachtet werden, dass bei einem beeinträchtigten Wärmeübergang der Flächensysteme alternative Konditionierungsmöglichkeiten forciert wurden. Im vorliegenden Fall (Objekt 11) wurde der Volumenstrom der mechanischen Belüftung verdoppelt, damit die erforderliche Heizleistung erbracht wird. Der Außenluftwechsel erhöhte sich dadurch über das erforderliche Maß. In einer Berechnung mit der Gebäudesimulationssoftware TRNSYSlite (Randbedingungen siehe Abschnitt 2.4.7) wird dieser Fall nachgestellt. Ausgehend von der ersten Variante mit einem Luftwechsel von 2 h^{-1} während der Nutzungszeit wird in der zweiten Variante der Luftwechsel auf 4 h^{-1} verdoppelt. Zunächst ergibt sich für den normalen Luftwechsel ein jährlicher Heizenergieverbrauch von 64 kWh/m^2 . Wenn der Luftwechsel verdoppelt wird beträgt der Heizenergieverbrauch 104 kWh/m^2 . Das entspricht einer Steigerung des Heizenergieverbrauchs um 63 %.

2.4.10 AP4: Monitoring/Evaluation / Sensor-Feldtest und Optimierungskonzepte (Phase II/III)

In diesem AP ging es vor allem um das Web-gestützte Monitoring, den Sensor-Feldtest (2.4.13) und das Monitoring von Abhilfe- bzw. Optimierungsmaßnahmen (2.4.14).

2.4.11 Gebäudeauswahl für die Ausstattung mit Messstrecke

Es werden insgesamt sieben Sensorsysteme in vier Gebäuden verbaut, siehe Tab. 9.

Tab. 9 Übersicht der Gebäude für Phase III

Gebäude	Kreislauf	Ort
9	Heiz	Gelsenkirchen
10	Heiz und Kühl	Berlin
11	Heiz und Kühl	Berlin
19	Heiz und Kühl	Lüneburg

2.4.12 Einbau Messstrecken für kontinuierliche Messungen

Eine Messstrecke besteht aus einer Durchflusszelle mit vier Sensoren, einem Drucksensor und einer Umwälzpumpe. Die Durchflussmesszelle mit den Sensoren für den pH-Wert, der Leitfähigkeit, dem Sauerstoffgehalt und dem Redoxpotential stellen den FeQuan-Sensor dar, aus deren Werten der Eisengehalt berechnet wird. Der Drucksensor dient zur Überwachung des Systemdruckes, die Umwälzpumpe vermeidet die Stagnation des Umlaufwassers für den Fall, dass die Systempumpen ausgestellt werden. Der Anschluss erfolgt vorzugsweise zwischen Hauptsammler und –verteiler oder im Bypass eines Rücklaufs. Die Daten werden 15-minütig erhoben, lokal gespeichert und zusätzlich per UMTS auf einen FTP-Server übertragen. Von dort erfolgt der Datenabruf für das Dashboard von Synavision. Aus den Daten und daraus abgeleitete Größen, Eisengehalt und Korrosionsrate, werden für das Dashboard Diagramme erzeugt, die mit einem Webbrowser in Echtzeit eingesehen werden können.

2.4.13 Feldtest des FeQuan-Sensors

Die Ergebnisse des Feldtests bilden die Basis für die Entwicklung einer technischen Überwachung des Umlaufwassers zur Vermeidung von Korrosion. Das in diesem Projekt untersuchte, neu entwickelte Sensorsystem (FeQuan) zur Früh-Erkennung von Korrosion hat seine Praxistauglichkeit in den bislang untersuchten Systemen unter Beweis gestellt. Die Er-



gebnisse sind im Folgenden im Rahmen der Berichte zu den in Phase II und III untersuchten Objekte dargestellt. Das System stieß bei Praxisakteuren auf reges Interesse. Das Sensorsystem ist geeignet, als mobiles Diagnosegerät Korrosionsprozesse in hydraulischen Anlagen frühzeitig detektieren und Hinweise auf Korrosionsursachen zu liefern, ohne aufwändige Analyse von Wasserproben im Labor. Dies gilt insbesondere für eine Überwachung des Inbetriebnahmeprozesses (Überwachung der Einlaufprozesse wie Alkalisierung, Deckschichtbildung). In Phase III konnte generell eine gute Übereinstimmung der Sensordaten mit analytischen Werten (in Anlagen mit und ohne Korrosionsschutz) bestätigt werden. Im Labor festgestellte, auf mikrobiologische Beeinflussung hinweisende Muster wurden ebenfalls identifiziert und bestätigt.

Das Sensorsystem weist jedoch aktuell noch zu hohe Kosten auf. Im Projekt zeigte sich, dass weiterhin technische Herausforderungen bei der Verwendung des Messsystems zu lösen sind. So besteht insbesondere für höhere Druckstufen, wie sie in hochgeschossigen Nichtwohngebäuden notwendig sind, die Gefahr eines Glasbruchs bei den verwendeten Einstabmessketten mit Glaselektroden (pH und Redoxpotential). In Zukunft sollte die Sensorauswahl für höhere Drücke und eine verbesserte Langzeitstabilität auf druckstabile Industrieprodukte fallen. Alternativ kann eine Druckminderung und anschließende Druckerhöhung zur Wiedereinspeisung in das System verwendet werden, wobei entsprechende, effiziente und robuste, aber preiswerte Pumpentypen zu verwenden sind.

2.4.14 Monitoring und Abhilfe

Im Folgenden werden die in Tab. 9 gelisteten Gebäude vorgestellt.

Objekt 9 (Phase II und III)

Beim Objekt 9 wurden die Phasen II (Installation FeQuan-Sensor) und III (Sanierung) kombiniert. Ursächlich war die hohe Belastung des Umlaufwassers mit gelösten Metallen und Glykol- und Inhibitorrückständen. Diese Inhaltsstoffe hätten den Sensoren schaden können, so dass entschieden wurde, die Messstrecke erst nach der Spülung einzubauen. Anders als bei den Objekten in Berlin und Lüneburg wurde das System nicht kontinuierlich analytisch beprobt, sondern entsprechend der angezielten späteren Verwendung alleine das Sensorsystem zur Überwachung der (erfolgreichen) Sanierung eingesetzt.

Basisdaten

Tab. 10 Gebäude- und TGA-Daten Objekt 9

Gebäudedaten	Objektbezeichnung	██████████
	Nutzungstyp	Büro- / Verwaltungsgebäude
	Fläche	7.624,32 m ²
	Objektanschrift	09 ████████
TGA	Kälteerzeugung	-
	Wärmeerzeugung	Gaskessel, Blockheizkraftwerk
	Nennleistung	n.b.
	Übergabesysteme	Wärmetauscher, Konvektoren
	Filter im Umlaufwasser	nein
	Druckhaltung	Membran-Ausdehnungsgefäße Reflex A200
	Nachspeisung	s.o.
	Nachspeisewasser	Standortwasser
	Temperaturbereich	16 - 80 °C
	Materialien	Schwarzstahl, Kupfer
	Sauerstoff-diffusionsoffene Materialien	nein



Spülung und Erstbefüllung

Das System wurde ursprünglich mit Standortwasser befüllt. Über vorangegangene Spülungen ist nichts bekannt. Nach Korrosionserscheinungen wurde ein Inhibitor eingesetzt, der jedoch keine Wirkung zeigte.

Verwendete Materialien

Es handelt sich um ein weit verzweigtes System, dass mehrere Gebäude verbindet und überwiegend aus Schwarzstahl besteht.

Nachspeisung

Es ist eine automatische Nachspeisung vorhanden. Es wird mit Leitungswasser nachgespeist.

Temperaturen

Die Temperaturen betragen an der Messstelle um 80 °C. In ausgestellten Heizkörpern kann Raumtemperatur erreicht werden.

Ausgangssituation

Das Heizsystem verbindet mehrere Gebäude unterschiedlichen Baujahrs. Die ältesten Gebäude sind ca. 50 Jahre alt, die jüngsten 30 Jahre. Das Füllvolumen beträgt in etwa 10 m³. Die Wärmeerzeugung erfolgt mit zwei Gaskesseln und einem Blockheizkraftwerk. Die Wärmeübergabe erfolgt überwiegend durch Konvektoren und Fassadenheizungen. Bei den Fassadenheizungen werden die Riegel der Fassade mit Heizungswasser durchströmt. Besonders bei den Fassadeheizungen ist es zu Durchrostungen gekommen. Das Umlaufwasser wies bei der Beprobung in Phase I einen Eisengehalt von 193 mg/L (gelöst) auf. Der pH-Wert befand sich mit 6,3 im sauren Bereich. Es fanden sich Überreste von Glykol und/oder Korrosionsschutzinhibitoren, die Keimen als Nahrungsquelle dienen. Die sauren Stoffwechselprodukte der Keime bewirkten die pH-Wert-Absenkung in den sauren Bereich. Der Sauerstoffgehalt war durch den hohen Anteil an gelöstem Eisen mit 0,007 mg/L sehr niedrig. Eindringender Sauerstoff wird durch gelöstes Eisen sofort gezehrt. Das Umlaufwasser war trübe braun, siehe Abb. 56.



Abb. 56: Proben vom Objekt 9. Die Proben des sanierten Systems sind markiert

Probenahme und Erfassung der Feldparameter

Es wurden während der Phase II der Feldstudie folgende Probenahmen durchgeführt, siehe Tab. 11. Die Beprobung nach Sanierung wurde vom Betreiber vorgenommen und nur noch hinsichtlich der Gehalte an Korrosionsprodukten analysiert.



Tab. 11 Probenahmen für die chemischen Analysen in Objekt 9

Probe	Zeitpunkt
Probennahme 1	09.03.2016

Tab. 12 Probenahmeergebnisse Objekt 9

Messtelle	Bezeichnung	pH	T (°C)	Fe (mg/L)	TOC (mg/L)	IC (mg/L)
1	Heiz VL gesamt	5,40	47,5	194,00	32,51	0,70
2	VL Haus 1	7,45	53,0	0,22	2,23	8,30
3	VL Haus 2	7,25	37,0	0,10	3,50	7,30
4	VL Heiz Haus 3	5,73	51,6	176,00	30,60	0,50
5	VL Heiz Haus 3	5,95	43,3	172,00	34,50	0,55
6	VL Kühl Haus 3	5,93	14,9	174,00	31,08	0,63
7	VL Heiz AGG	6,00	50,9	180,00	30,80	0,50
8	VL Heiz Haus 4	6,67	54,0	2,60	11,60	1,00
9	Kälte Haus 4	7,27	13,8	2,60	11,41	1,20
10	VL Heiz Haus 5	5,29	51,4	168,00	33,32	0,62

Die Beprobung (Tab. 12 Probenahmeergebnisse Objekt 9) zeigt deutlich die schlechten Systemzustände (hohe Gehalte an Fe und niedriger pH-Wert) in den Systemen mit erhöhtem TOC (Inhibitor- und Frostschutzrückstände). Die weiteren Einzelergebnisse der Beprobung Heiz VL gesamt sind im Anhang 3.3.1 aufgeführt.

Sanierung und sensorgestütztes Monitoring

Es wurde vorgeschlagen, die Systeme mit einem Disperger zum Lösen von biologischen und metallischen Ablagerungen zu versetzen und anschließend mit Standortwasser zu spülen. Die Neubefüllung soll mit vollentsalztem Wasser erfolgen. Anschließend sollte weiter im Nebenstrom entsalzt und gefiltert werden, weil davon auszugehen war, dass Restwassermengen in den Systemen verbleiben. Die Arbeiten wurden seitens des Gebäudebetreibers ausgeführt. Die einzelnen Schritte sind in Tab. 13 dargestellt. Die Abb. 57 bis Abb. 59 zeigen die gemietete mobile Entsalzung- und Filtereinheiten.



Abb. 57: Mobile Filterung und Osmoseentsalzung



Abb. 58: Gebrauchter Filter

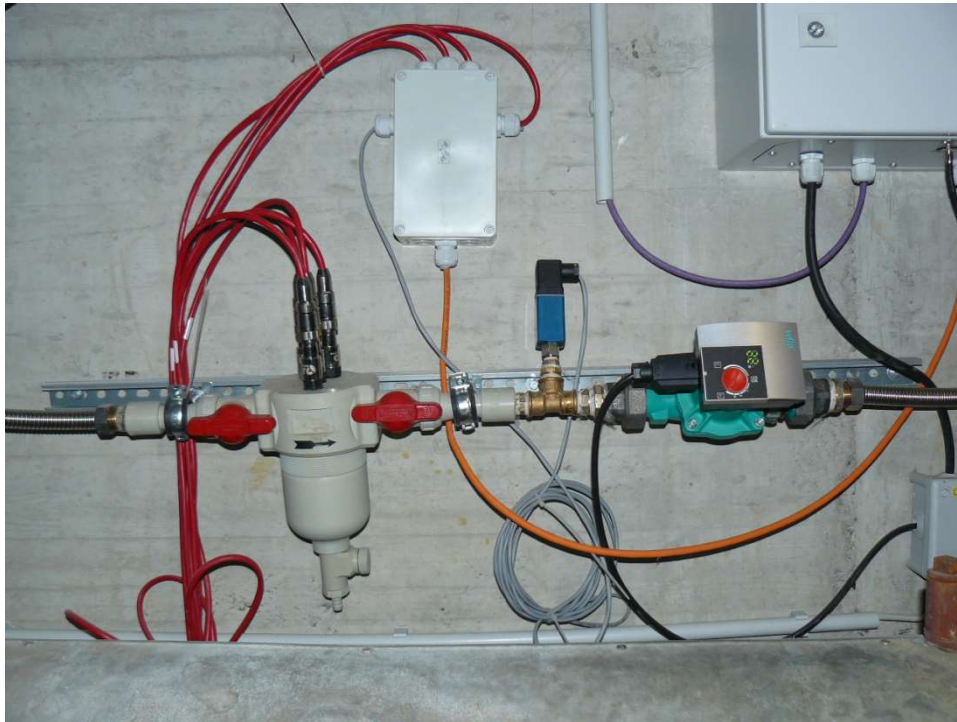


Abb. 59: Montierte Messstrecke

Tab. 13 Einzelmaßnahmen der Sanierung

Datum	Maßnahme
22.08.2017	Impfung des Primärsystems mit Disperger und Biozid (Biozid BZ 400, Dipserger BZ 600, Anbieter: Z&H St. Wendel)
26.08.2017	Spülung des Primärsystems mittels C-Schlauch Zu- und Ablaufseite mit ca. 10 bar Druck. Für den Anschluss wurde eine Pumpe demontiert.
29.08.2017	Impfung des Primärsystems mit Biozid
02.09.2017	Spülung des Primärsystems mittels C-Schlauch Zu- und Ablaufseite mit ca. 10 bar Druck. teilweise Auffüllung des Primärsystems mit VE- Wasser.
04.09.2017	Auffüllung des Primärsystems mit VE-Wasser-
04.09.2017	Impfung des Primärsystems mit Biozid.
	Filterung und Entsalzung im Bypass mit einer mobilen Filter- und Entsalzungseinheit. Filterstärke 5µm.
	Installation FeQuan Sensor
02.2018 – 03.2018	Dreimal Biozid nachdosiert, Entsalzung beendet
05.2018	pH-Wert Anhebung mit Natronlauge

Die Filtration und Entsalzung wurde einige Monate fortgeführt, um die Restmengen im System zu erfassen. Mit der Auffüllung des Systems mit vollentsalztem Wasser wurde die Messstrecke am Hauptverteiler angeschlossen, siehe Abb. 59. Die visualisierten Daten konnten sofort im Dashboard eingesehen werden. Abb. 60 zeigt den Verlauf der berechneten Eisenkonzentration sowie des pH-Wertes und der Leitfähigkeit. Abb. 61 zeigt alle Rohdaten im Beobachtungszeitraum. Bei der Befüllung ist das vollentsalzte Wasser durch die Aufnahme von Kohlendioxyd aus der Luft kohlensauer. Der pH-Wert fällt auf 6,5. Binnen zwei Wochen steigt durch Korrosionsvorgänge der pH-Wert auf 8,2 und verharrt dort für knapp drei Monate. Die Leitfähigkeit steigt durch die Beimischung von Restmengen bis Oktober langsam an. Im Oktober wird wieder die Entsalzung gestartet. Das sprunghafte Abfallen der Leitfähigkeit im November und Dezember erfolgt jedes Mal, wenn die Entsalzungspatrone ausgetauscht wird. Ab Dezember beginnt die der pH-Wert wieder zu fallen. Es wird eine mikrobiologische Neubesiedlung vermutet. Eine Prüfung des Biozid-Gehaltes bestätigt den Verdacht, dass dieser zu niedrig ist. Es folgen mehrere Nachdosierungen, weil der Biozid-Gehalt kontinuierlich sinkt. Später hat sich herausgestellt, dass durch die Entsalzung auch das Biozid entfernt wird. Durch die Biozid-Gaben konnte der pH-Wert-Abfall jedes Mal gestoppt werden. Mit der letzten Biozid-Gabe im Februar und Abschaltung der Entsalzung war wieder ein zögerlicher Anstieg des pH-Wertes zu beobachten. Im März erfolgte dann eine pH-Wert Anhebung mit Natronlauge. Bis zum Jahr 2019 verbleibt der pH-Wert um 8,5 bei sehr niedrigen Eisengehalten $< 0,1 \text{ mg/L}$, was auf eine geglückte Sanierung hinweist.

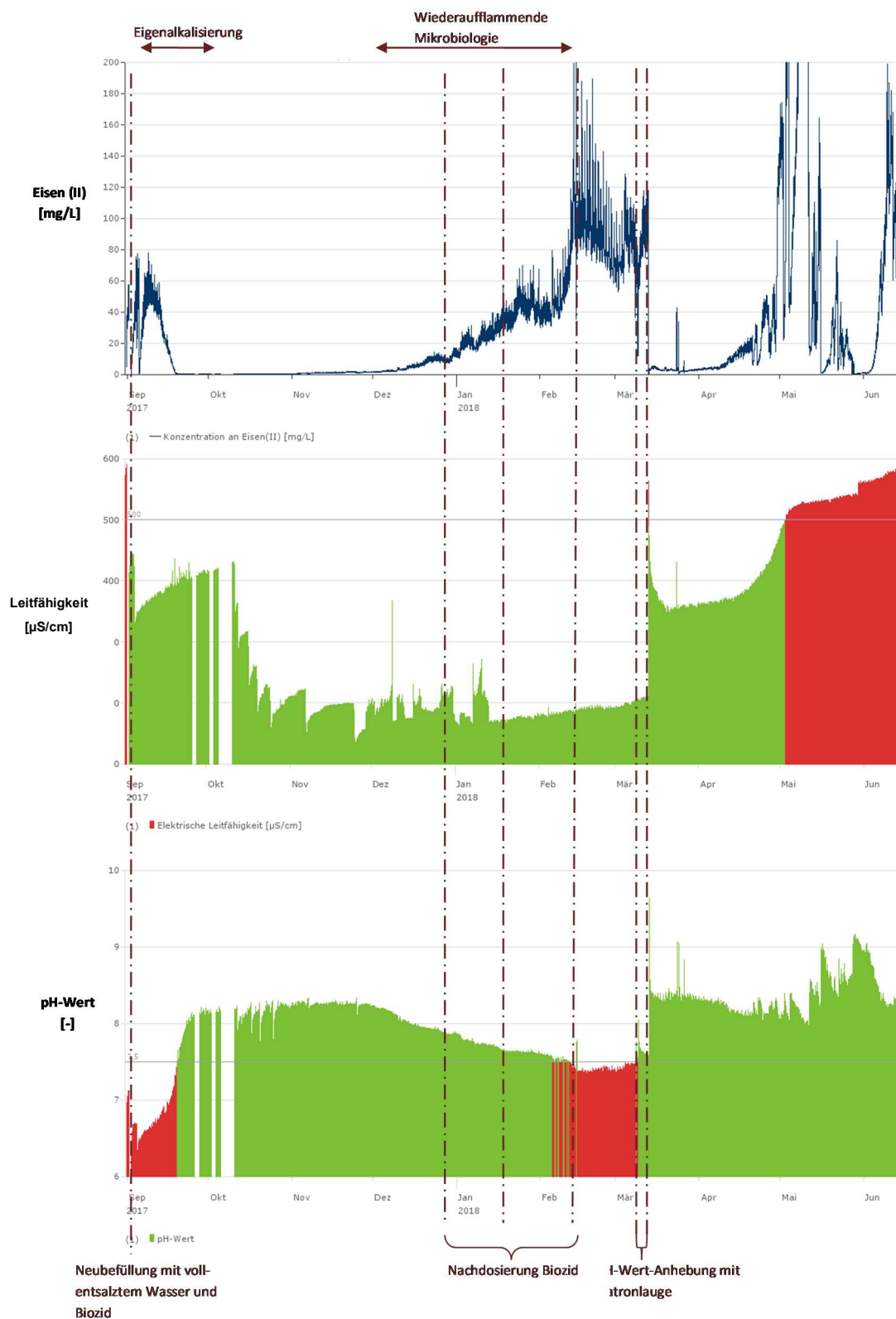


Abb. 60: Verlauf des berechneten Eisengehaltes (oben) und des pH-Wertes (unten)

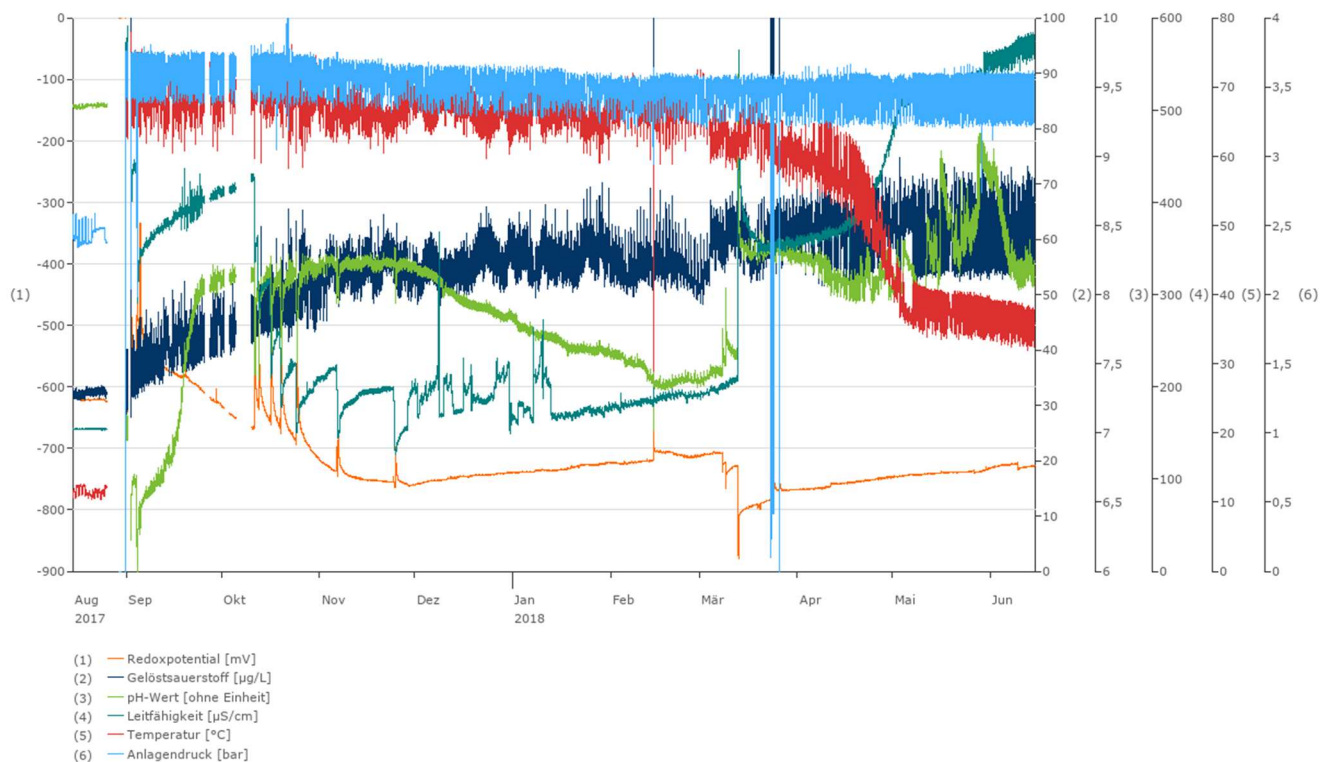


Abb. 61: Rohdaten der Messstrecke

Mikrobiologie

Mikrobiologische Analysen erfolgten vor (Heiz- und Kühlsystem) und nach der Sanierung (Heizsystem). Vor der Sanierung wiesen die Systeme hohe Anteile an Stickstofffixierern und Nitratreduzierern neben Sulfatreduzierern, Eisen- und Schwefeloxidierern und insbesondere zum Abbau komplexer Organik fähige Mikroorganismen auf, die die in den Systemen für die Korrosion ursächlichen Inhibitor-, Frostschutz- und andere Reste von Additiven abbauen. Nach Spülung, Neubefüllung und Biozidbehandlung stellt sich die mikrobiologische Gemeinschaft deutlich reduziert dar, insbesondere fehlen Stickstofffixierende, Nitratreduzierende sowie Sulfatreduzierer und Eisenoxidierer. Die Analyse sind in (Tab. 14) sowie die Ergebnisse in Abschnitt zusammengefasst:

Tab. 14 die mikrobielle Sequenzierung in Objekt 9

Probenahme	Zeitpunkt
Probenahme 1	09.03.2016
Probenahme 2	07.12.2017

Die Einzelergebnisse der mikrobiologischen Analysen sind im Anhang 3.3.1 aufgeführt.



Objekt 10 (Heizsystem)

Tab. 15 Gebäude- und TGA-Daten für Objekt 10, Heizsystem

Gebäudedaten	Objektbezeichnung	10 [REDACTED]
	Nutzungstyp	Büro- / Verwaltungsgebäude
	Fläche	1245 m ² BGF
	Objektanschrift	D-123 [REDACTED] Berlin
TGA	Wärmeversorgung	Wasser-Wasser Wärmepumpe / Solarthermie
	Nennleistung	23,5 kW (thermisch)
	Übergabesysteme	Wandheizflächen (Kunststoffrohre, Polybutylen 8x1 mm, sauerstoffdicht nach DIN 4726)
	Filter im Umlaufwasser	Ja, aber nicht gewartet
	Druckhaltung	Membran-Ausdehnungsgefäß
	Nachspeisung	Manuell
	Nachspeisewasser	Vollentsalzt (Kartusche) (nicht immer eingehalten)
	Temperaturbereich	20-40 °C (Stillstandzeiten berücksichtigt)
	Materialien	Schwarzstahl (Rohre), Kupfer (Wärmetauscher), Buntmetalle, verzinkte Rohre, Edelstahl
	Sauerstoffdiffusionsoffene Materialien	Nein

Spülung und Erstbefüllung

Das System wurde mit Leitungswasser gespült und anschließend mit enthärtetem Wasser befüllt. Bei der ersten Beprobung im September 2013 wurde eine Leitfähigkeit von 205 µS/cm festgestellt. Kurz darauf wurde das Füllwasser durch vollentsalztes Osmosewasser ersetzt. Die Leitfähigkeit betrug dann 112 µS/cm im März 2014, 6 Monate später 113 µS/cm und 121 µS/cm im März 2015. Im Monitoringzeitraumes blieb die Leitfähigkeit in diesem Bereich und ist nicht zu beanstanden.

Verwendete Materialien

In dem System wurden verschiedene Materialien verbaut: Kupfer, Buntmetalle, Stahl, verzinkter Stahl, vermutlich Edelstahl und Leitungen der Wandheizflächen mit einer Diffusionsperrschicht aus Butylkautschuk. Diese sind nach DIN 4726 Sauerstoff-diffusionsdicht. Das schließt jedoch eine geringe Gas-Diffusion nicht aus.

Es wurde -wie im Kältesystem- bei jeder Probe eine geringe Menge Aluminium vorgefunden. Üblicherweise findet sich Aluminium nur in dem Wärmetauscher eines Brennkessels, der

aber in diesem System nicht vorhanden ist. Als Ursache für die Aluminium-Gehalte können zulässige Beimengen der Legierungen der Buntmetallfittings sein. Aluminium ist empfindlich gegenüber einem zu hohen pH-Wert, der ansonsten hinsichtlich der Korrosionsverhütung anderer Materialien wünschenswert ist. Jedoch ging Aluminium in Lösung, weil der pH-Wert für Aluminium-Legierungen meistens zu hoch war (oberer Grenzwert für bestimmte Aluminium-Legierungen pH 8,5). Der Aluminium-Gehalt ist jedoch mit ca. 0,1 mg/L sehr gering und unbedenklich.

Die Kombination von Kupfer und Eisen ist kritisch, weil es potentiell das Korrosionsrisiko bei der Materialien erhöht. Bei einem ausreichend hohen pH-Wert und geringem Sauerstoffgehalt, Bedingungen die hier gegeben sind, besteht kein erhöhtes Korrosionsrisiko.

Druckhaltung

Das Membran-Ausgleichs-Gefäß ist für die Anlage unterdimensioniert. Geringe Wasserentnahmen führen zu einem starken Druckabfall. Es wurde empfohlen einen größeren Ausgleichsbehälter zu installieren. Dies ist nicht erfolgt.

Nachspeisung

Die Nachspeisung erfolgt manuell über eine Entsalzungspatrone. Das ist vorteilhaft hinsichtlich einer erzwungenen Kontrolle der Nachspeisemenge, die auf mögliche Lecks hindeuten kann. Nachteilig ist, dass bei Wasserverlust der Druck soweit fallen kann, dass Sauerstoffeintritt erfolgt. Im Beobachtungszeitraum war der Druck immer im Sollbereich, so dass ein Sauerstoffeintritt durch Druckmangel im Beobachtungszeitraum ausgeschlossen wird.

Temperaturen

Die Temperaturen im Heizsystem betragen zwischen 20 °C und 45 °C. Lokal, in der Wärmepumpe oder an den Wärmetauschern, können auch höhere Temperaturen auftreten. Es wurden thermophile Bakterien nachgewiesen, die korrosionstechnisch unproblematisch sind.

Probenahme und Erfassung der Feldparameter

Es wurden während der Phase II der Feldstudie folgende Probeentnahmen durchgeführt, siehe Tab. 16.

Tab. 16 Probenahmen für die chemischen Analysen in Objekt 10, Heizsystem

Probenahme	Zeitpunkt
Probenahme 1	16.08.2017
Probenahme 2	04.12.2017
Probenahme 3	27.02.2018
Probenahme 4	02.05.2018

Die Einzelergebnisse sind im Anhang 3.2 aufgeführt.

Sensorgestütztes Monitoring mit FeQuan-Sensor

Der FeQuan-Sensor – System wurde zwischen Vorlauf und Rücklauf des Heizsystems angeschlossen, siehe Abb. 62.



Abb. 62: Montageort des Fequan-Sensors für das Heizsystem. Die Anbindung erfolgte über die Entlüftungsleitungen mit Edelstahlwellrohr.

Verlauf

Relevante Ereignisse im Monitoringzeitraum sind in

Tab. 18 aufgelistet und in Abb. 63 entsprechend markiert. Das System wurde ursprünglich mit enthärtetem Leitungswasser befüllt, welches kurz darauf durch vollentsalztes Wasser ersetzt wurde. In diesem Zuge erfolgte auch die erneute Spülung des Systems mit einem erhöhten Volumenstrom zur Entfernung von Gaspolstern in den Wandheizflächen. Die Wandheizsysteme sind konstruktionsbedingt nicht selbstentlüftend. Es ist auch möglich, dass durch die Kunststoffrohre eindiffundierte Gase der Umgebungsluft die Gasansammlungen begünstigt haben. Während des sensorgestützten Monitorings war der Druck ausreichend hoch. Im März 2017 wurde die Heizung kurzzeitig ausgestellt. Ab diesem Zeitpunkt ist ein leichter Anstieg der Korrosionsrate zu beobachten. Ab Mai 2017 geht die Heizung in den Standbybetrieb ohne Umwälzung. Es erfolgt nur noch eine minimale Umwälzung durch die Pumpe der Messstrecke. Durch den Temperaturabfall steigt der Gehalt an gelösten Sauerstoff. In dieser Zeit steigt der berechnete Eisengehalt infolge des Anstieges des Sauerstoffgehaltes weiter an. Mit Inbetriebnahme der Heizung steigt die Korrosionsrate sprunghaft an, um dann binnen drei Monaten gegen Null zu fallen. Vermutlich hat sich eindiffundierter Sauerstoff in den Kunststoffschläuchen angesammelt, der schlagartig bei Beginn der Heizperiode im System verteilt wurde und somit zu einer kurzfristigen Erhöhung der Korrosionsrate führte. In der darauffolgenden Heizpause und bei Wiederinbetriebnahme im Jahr 2018 ist keine Erhöhung der Korrosionsrate zu beobachten. Da der pH – Wert jedoch deutlich höher liegt als im Vorjahr, hat der gestiegene Sauerstoffgehalt offenbar eine geringere Auswirkung auf die Korrosionsrate. Der pH-Wert ist während des Beobachtungszeitraum von 9,0 auf 10,5 gestiegen. Ein hoher pH-Wert reduziert die Korrosionsneigung und kompensiert andere Risikofaktoren wie den Sauerstoffeintrag.

Insgesamt hat sich das System im Beobachtungszeitraum durch den Anstieg des pH-Wertes weiter stabilisiert. Es konnten zuletzt keine relevanten Korrosionsprozesse nachgewiesen werden.

Die Einzelergebnisse des chemischen Monitorings sind im Anhang 3.2 aufgeführt.

Tab. 17 Historie des Systems vor Monitoring

Zeitpunkt	Maßnahme	Wasserbehandlung
2012	Erstbefüllung	Leitungswasser enthärtet
2013	Entlüftung, Neubefüllung	Vollentsalztes Wasser
2014	Nachbefüllung	Vollentsalztes Wasser



11/2015

Entlüftung, Nachbefüllung

Vollentsalztes Wasser

Tab. 18 Ereignisse während des Monitorings

Ereignis/ Datum	Beschreibung	Bemerkungen
#0 11.12.2016	Inbetriebnahme Monitoring Temperaturabfall auf	Kurzzeitige Außerbetriebnahme der Heizung, Sauerstoffgehalt steigt an infolge Verbesserung der Gaslöslichkeit bei geringeren Temperaturen
#1 15.03.2017	Raumtemperaturniveau, geringer Anstieg der Korrosionsrate	Außerhalb der Heizperiode werden die Umwälzpumpen des Heizsystems ausgestellt. Es erfolgt nur noch eine minimale Umwälzung durch die Pumpe der Messstrecke.
#2 05-09.2017	Standby Heizung, sprunghafter Anstieg der Korrosionsrate bei Inbetriebnahme	
#3 04-10.2018	Standby Heizung, nur noch sehr geringer Anstieg der Korrosionsrate bei Inbetriebnahme	s.o

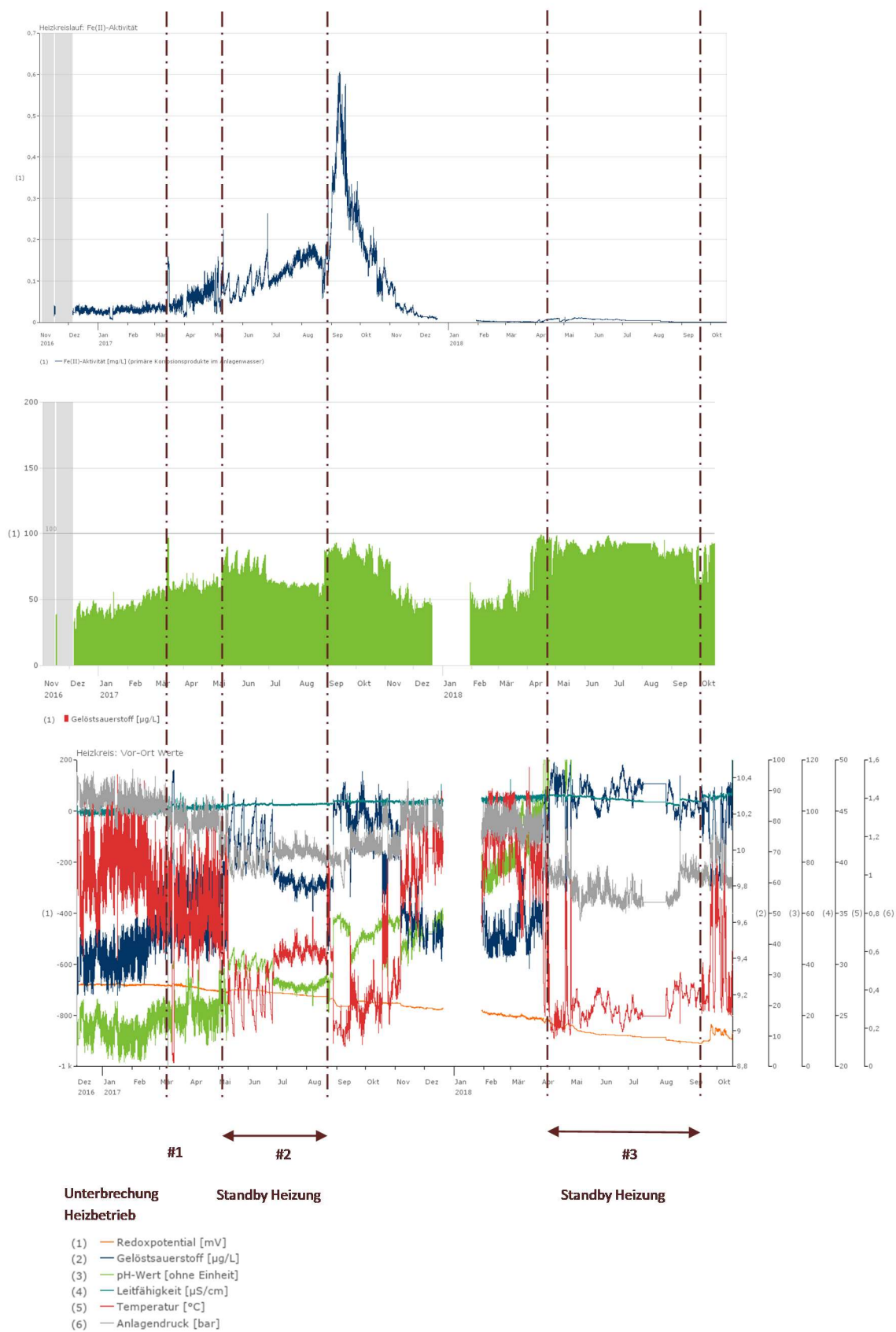


Abb. 63: Zeitreihen der Korrosionsrate, des Sauerstoffgehaltes und der Sensorwerte

Abgleich des Sensorsignals mit den Ergebnissen der Chemischen Analysen

In Abb. 64 ist der zeitliche Verlauf des berechneten und durch chemische Analysen bestimmte Eisengehalt aufgezeigt. Die chemisch nachgewiesenen Eisengehalte stimmen unter stationären Bedingungen gut mit dem Sensorsignal überein. Bei Änderungen des Eisengehaltes hat der Sensor eine erhöhte Sensitivität und neigt dazu den aktuellen Trend zu überzeichnen. Dies gilt sowohl für abnehmende als auch zunehmende Eisengehalte.

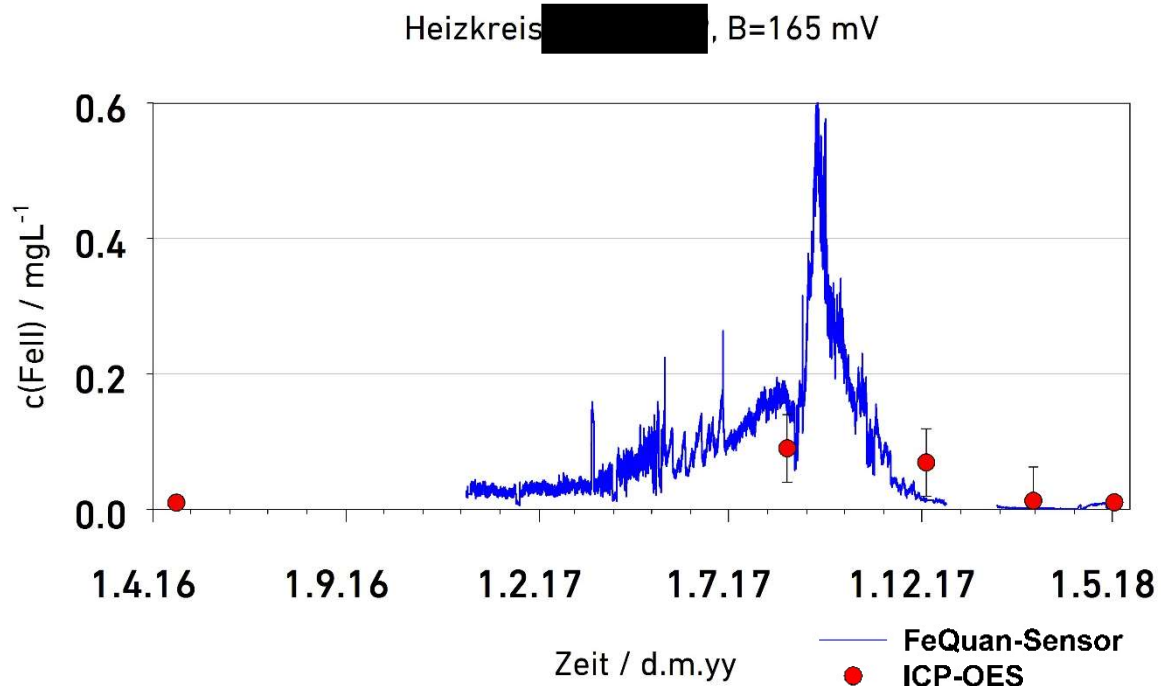


Abb. 64: Berechneter (FeQuan-Sensor) und analytisch (ICP-OES) ermittelter Eisengehalt

Mikrobiologie

Es erfolgten drei mikrobiologische Analysen des Umlaufwassers des Heizkreises. Bei der ersten Beprobung fielen vor allem Bakterien auf, die in der Lage sind komplexe und auch chlorierte Moleküle abzubauen. Diese Bestandteile stammen vermutlich aus den verwendeten Kunststoffen. Bei der darauffolgenden Beprobung vor Spülung der Anlage und Neubefüllung mit vollentsalztem Wasser fanden sich Bakterien, die die Korrosion begünstigen (Sulfat-, Nitrat- und Eisenreduzierer und Stickstofffixierer) sowie thermophile Bakterien. Weiterhin kamen Biofilmbildner hinzu, die korrosionsfördernde Schichten bilden können. Die dritte Probe wurde ca. 1,5 Jahre später während des Monitorings in Phase II in der Heizungs-Stagnationsphase genommen. Die Anteile der vorgefundenen Bakterien haben sich weiter-

hin verändert. Während der Anteil der Bakterien, die komplexe Verbindungen abbauen, zurückging, hat aufgrund der Verwendung vollentsalzten Wassers der Anteil Sulfatreduzierern ab- und insbesondere der Anteil stickstofffixierender Bakterien zugenommen. In diesem Zeitraum konnte eine Zunahme gelöster Korrosionsprodukte im Umlaufwasser beobachtet werden (Abb. 64). Die festgestellten Korrosionserscheinungen blieben jedoch auf unkritischem Niveau. Da durch die Verwendung von vollentsalztem Wasser die Nährstoffverfügbarkeit für Keime stark reduziert ist, dürfte das Keimwachstum begrenzt sein. Es wurden folgende Probenahmen für die mikrobielle Sequenzierung durchgeführt (Tab. 19):

Tab. 19 Probenahmen für die mikrobielle Sequenzierung in Objekt 10, Heizsystem

Probenahme	Zeitpunkt
Probennahme 1	17.07.2014
Probennahme 2	17.11.2015
Probennahme 3	16.08.2017

Die Einzelergebnisse der mikrobiologischen Analysen sind im Anhang 3.2 aufgeführt.

Zusammenfassung und Bewertung

Für das Gebäude 10 wurde seit dem Jahr 2014 das Heizsystem korrosionstechnisch überwacht. Dies geschah sowohl mit chemischen als auch mikrobiologischen Analysen des Umlaufwassers und ab September 2016 in kontinuierlicher Messung mit dem FeQuan-Sensorsystem. Nach anfänglichen starken Korrosionserscheinungen nach der Inbetriebnahme im Jahr 2013 hat sich der Systemzustand stabilisiert, obwohl die Ausgangssituation nicht optimal war: Es wurden Kupfer- und Stahlmaterialien kombiniert und die Sauerstoffdichtigkeit der Flächensysteme ist grenzwertig. Die Druckhaltung erwies sich als unterdimensioniert. Nach dieser Einlaufphase ist die Korrosion weitestgehend zurückgegangen. Lediglich am zum der Heizperiode 2017/2018 konnte in der Stagnationsphase ein leichter Anstieg der berechneten Korrosionsraten und analytisch gemessenen Werte verzeichnet werden, der mit einem verstärkten Auftreten potentiell korrosiv wirkender Mikroorganismen einherging und vom Sensorsystem korrekt detektiert wurde. In den Folgejahren ist dies nicht mehr aufgetreten. Der Zustand war bei Abschluss des Monitorings 2019 ist gut und stabil.



Objekt 10 (Kühlsystem)

Tab. 20 Gebäude- und TGA-Daten für Objekt 10, Kühlsystem

Gebäudedaten	Objektbezeichnung	10
	Nutzungstyp	Büro- / Verwaltungsgebäude
	Fläche	1245 m ² BGF
	Objektanschrift	D-123 Berlin
TGA	Kälteversorgung	Wasser-Wasser Wärmepumpe Geothermie (Grundwasser)
	Nennleistung	48kW (thermisch)
	Übergabesysteme	Flächenkühlsysteme (Kunststoffrohre, Polybutylen 8x1 mm, sauerstoffdicht nach DIN 4726)
	Filter im Umlaufwasser	Ja, aber nicht gewartet
	Druckhaltung	Membran-Ausdehnungsgefäß (nachgerüstet)
	Nachspeisung	Manuell
	Nachspeisewasser	Vollentsalzt (Kartusche) (nicht immer eingehalten)
	Temperaturbereich	12-26 °C (Stillstandzeiten berücksichtigt)
	Materialien	Schwarzstahl (Rohre), Kupfer (Wärmetauscher), Buntmetalle, Butylkautschuk, Edelstahl; vermutlich innen verzinkte Rohre
	Sauerstoffdiffusionsoffene Materialien	Nein

Spülung und Erstbefüllung

Das System wurde mit Leitungswasser gespült und anschließend mit unbehandeltem Wasser befüllt. Bei der ersten Beprobung im September 2013 wurde eine Leitfähigkeit von 500 µS/cm festgestellt. Kurz darauf wurde das Füllwasser durch vollentsalztes Osmosewasser ersetzt. Die Leitfähigkeit betrug 373 µS/cm im März 2014, 6 Monate später 356 µS/cm und 242 µS/cm im Jahr 2015. Im Gegensatz zum Heizsystem verblieb die Leitfähigkeit nach Befüllung mit Osmosewasser auf einem höheren Niveau. Dies ist auf Leitungswasserreste im System zurück zu führen. Im Monitoringzeitraum wurde eine Leitfähigkeit im Bereich um 180 µS/cm beobachtet. Aufgrund der Leckage wurde wiederholt mit entsalztem Wasser nachgespeist, so dass die Leitfähigkeit weiter fiel. Nur einmal wurde im Beobachtungszeitraum unbehandeltes Leitungswasser nachgespeist, siehe Abschnitt 0. Dadurch stieg die Leitfähigkeit wieder auf 250 µS/cm an.

Verwendete Materialien

In dem System wurden verschiedene Materialien verbaut: Kupfer, Buntmetalle, Stahl, verzinkter Stahl, vermutlich Edelstahl und Leitungen der Wandkühlflächen mit einer Diffusions-sperrschicht aus Butylkautschuk. Diese sind nach DIN 4726 Sauerstoff-diffusionsdicht. Das schließt jedoch eine geringe Gas-Diffusion nicht aus.

Es wurde -wie im Heizsystem- bei jeder Probe eine geringe Menge Aluminium vorgefunden. Üblicherweise findet sich Aluminium nur in dem Wärmetauscher eines Brennkessels, der aber in diesem System nicht vorhanden ist. Als Ursache für die Aluminium-Gehalte können zulässige Beimengen der Legierungen der Buntmetallfittings sein. Aluminium ist empfindlich gegenüber einem zu hohen pH-Wert, der ansonsten hinsichtlich der Korrosionsverhütung anderer Materialien wünschenswert ist. Jedoch ging Aluminium in Lösung, weil der pH-Wert für Aluminium-Legierungen meistens zu hoch war (oberer Grenzwert für bestimmte Aluminium-Legierungen pH 8,5). Der Aluminium-Gehalt ist jedoch mit ca. 0,1 mg/L sehr gering und unbedenklich.

Die Kombination von Kupfer und Eisen ist kritisch, weil es potentiell das Korrosionsrisiko bei-der Materialien erhöht.

Druckhaltung

Es war anfänglich keine Druckhaltung installiert, wodurch es zur Ausbildung von Gaspolstern und Gaseinträgen kam. Als erste Abhilfemaßnahme wurde ein Membran-Ausgleichs-Gefäß nachgerüstet.

Nachspeisung

Die Nachspeisung erfolgt manuell über eine Entsalzungspatrone. Das ist vorteilhaft hinsichtlich einer erzwungenen Kontrolle der Nachspeisemenge, die auf mögliche Lecks hindeuten kann. Nachteilig ist, dass bei Wasserverlust der Druck soweit fallen kann, dass Sauerstoff-eintritt erfolgt. Im Beobachtungszeitraum war der Druck immer im Sollbereich, so dass ein Sauerstoffeintritt durch Druckmangel ausgeschlossen wird. In der Historie der Anlage wurde jedoch selten auch unaufbereitetes Wasser nachgespeist.

Temperaturen

Die Temperaturen im Kühlsystem betragen zwischen 12 °C bis 26 °C. Lokal an dem Wärme-tauscher, können auch niedrigere Temperaturen auftreten.



Probenahme und Erfassung der Feldparameter

Es wurden während der Phase II der Feldstudie folgende Probeentnahmen durchgeführt, siehe Tab. 21.

Tab. 21 Probenahmen für die chemischen Analysen in Objekt 10, Kühlsystem

Probe	Zeitpunkt
Probennahme 1	16.08.2017
Probennahme 2	04.12.2017
Probennahme 3	27.02.2018
Probennahme 4	02.05.2018

Sensorgestütztes Monitoring mit FeQuan-Sensor

Der FeQuan-Sensor stellt eine kompakte Version der anfänglich verwendeten mobilen Messeinheit dar. Aufgrund eines neu entwickelten Mess- und Auswerteverfahrens ist es möglich, mit diesem Sensor Korrosionsprozesse zu erkennen, bevor partikuläre Korrosionsprodukte ausfallen und Schäden verursachen. Der FeQuan-Sensor befindet sich in der Entwicklung. Als Teil eines ganzheitlichen Energie- und Qualitätsmanagements ist zukünftig mit Hilfe des FeQuan-Sensors die automatisierte und kontinuierliche Überwachung des Umlaufwassers zur Schadensvermeidung absehbar.

Verlauf

Relevante Ereignisse im Monitoringzeitraum sind in Tab. 23 aufgelistet und in Abb. 65 entsprechend markiert. Das System wurde ursprünglich mit unbehandeltem Leitungswasser befüllt, welches kurz darauf durch vollentsalztes Wasser ersetzt wurde, siehe Tab. 22 Historie des Systems vor Monitoring. In diesem Zuge erfolgte auch die Spülung des Systems mit einem erhöhten Volumenstrom zur Entfernung von Gaspolstern in den Wandkühlflächen. Die Flächenkühlsysteme sind konstruktionsbedingt nicht selbstentlüftend. Neben im System verbliebenen Luftpolstern, die nach der Inbetriebnahme nie vollständig entfernt wurden, ist es auch möglich, dass durch die Kunststoffrohre Gase der Umgebungsluft eindiffundiert sind. Im Jahr 2017 offenbarte das Monitoring einen kontinuierlichen Druckverlust, der auf eine Leckage hindeutete. Dabei hat sich auch herausgestellt, dass das Kühlsystem über keinen Druckausgleich verfügte. Daraufhin wurde ein Membran-Ausgleichsgefäß nachgerüstet. In der Folge war weiterhin ein Druckverlust zu beobachten, im Juni 2018 erfolgte wieder eine Druckanhebung infolge einer Nachspeisung mit Leitungswasser, erkennbar an einem An-

stieg der Leitfähigkeit. Bei einer Druck- und Dichtigkeitsprüfung im August/ September 2019 wurden weitere Leckagen aufgedeckt, die beseitigt wurden. Seitdem ist der Druck stabil. Ende der Kühlperiode im Mai 2018 beginnt der pH-Wert zu fallen. Erst mit der Befüllung mit Leitungswasser wurde der Abfall gestoppt und der pH-Wert begann wieder zu steigen. Ein paar Monate später hat sich der pH-Wert bei 8,6 eingependelt. Ein hoher pH-Wert von mindestens 8,2 ist zur Vermeidung von Korrosionsprozessen wünschenswert.

Ein pH-Wert-Abfall erfolgt unter anderem durch eine mikrobiologisch bedingte Versäuerung. Dies wäre erklärlich durch den Temperaturanstieg im System infolge der Beendigung der Kühlperiode, der die Aktivität der Keime begünstigt. Nach Neubefüllung ist der pH-Wert durch Verdünnung der gebildeten Säuren und die erneute Eigenalkalisierung des Wassers wieder angestiegen.

Tab. 22 Historie des Systems vor Monitoring

Zeitpunkt	Maßnahme	Wasserbehandlung
2012	Erstbefüllung	Leitungswasser enthärtet
2013	Entlüftung, Neubefüllung	Vollentsalztes Wasser
2014	Nachbefüllung	Vollentsalztes Wasser
11/2015	Entlüftung, Nachbefüllung	Vollentsalztes Wasser



Tab. 23 Ereignisse während des Monitorings

Ereignis/ Datum	Beschreibung	Bemerkungen
#0 11.12.2016	Inbetriebnahme Monitoring	pH-Sensor fehlerhaft, Austausch
#1 24.03.2017	Leckage gefunden und behoben	Durch das Monitoring konnte zuvor ein kontinuierlicher Druckabfall beobachtet werden, der auf eine Leckage hindeutet
#2 03.2017	Nachrüstung Ausgleichsbehälter	Kein Ausgleichsbehälter vorhanden gewesen, daher Druckverlust
#3 06.2018	pH-Wert Abfall, Nachspeisung mit Leitungswasser	Erkennbar am Anstieg der Leitfähigkeit
#4 08/09.2018	Druck- und Dichtigkeitsprüfungen	Weitere Leckage wurde aufgedeckt. Erneute Nachspeisung einer geringen Menge Leitungswasser

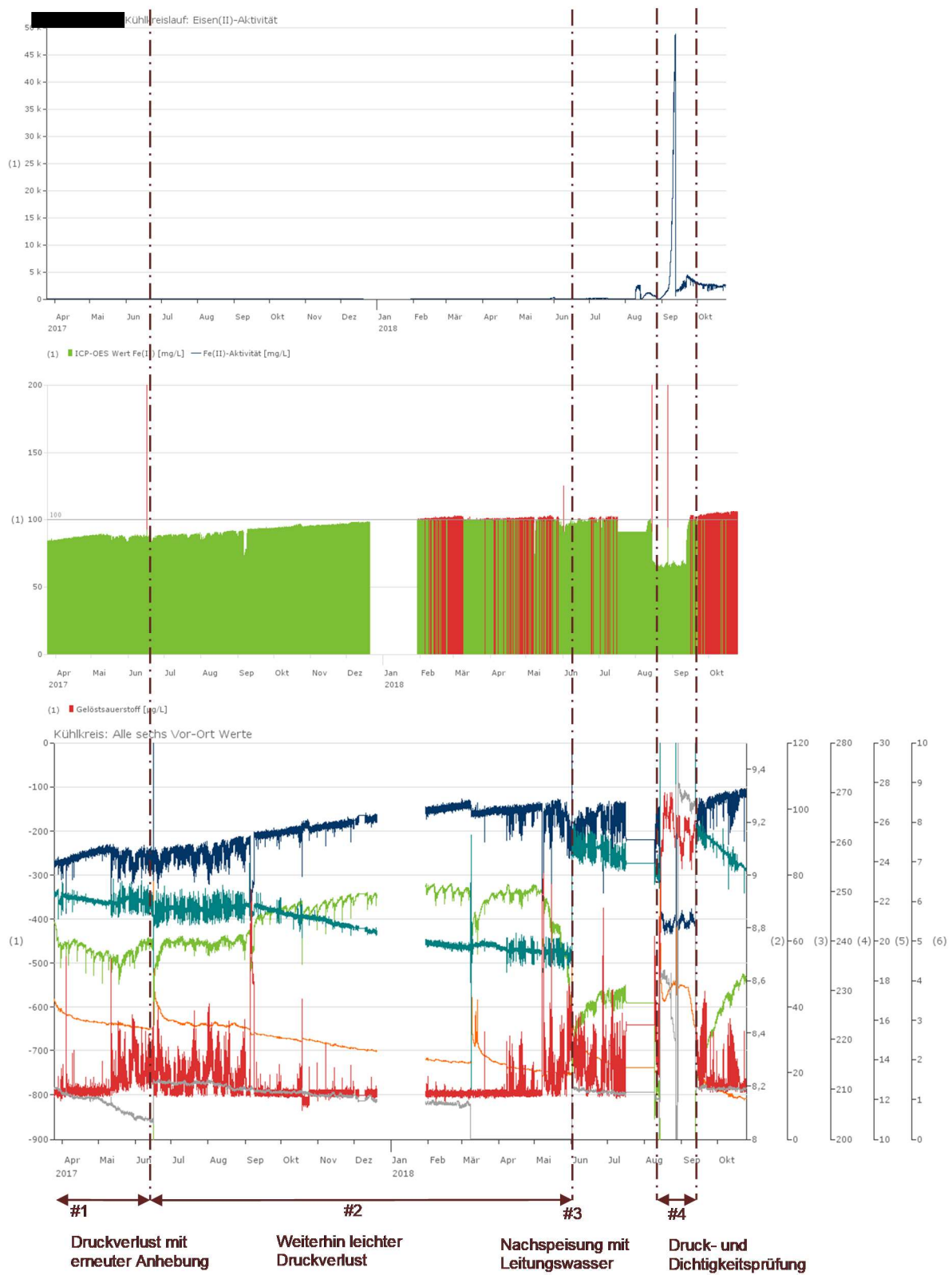


Abb. 65: Zeitreihen der Korrosionsrate, des Sauerstoffgehaltes und der Sensorwerte

Abgleich des Sensorsignals mit den Ergebnissen der chemischen Analysen

In Abb. 64 ist der zeitliche Verlauf des berechneten und durch chemische Analysen bestimmte Eisengehalt aufgezeigt. Die chemisch nachgewiesenen Eisengehalte stimmten unter den anfänglich stationären Bedingungen gut mit dem Sensorsignal überein. Im weiteren Verlauf zeigen die Sensorwerte einen starken Anstieg an, der in den analytischen Werten nur als leichter Trend auftritt. Ursächlich für den starken Anstieg des Sensorsignals ist ein abnehmendes Redoxpotential bei weniger stark zunehmendem pH-Wert. Es besteht die Möglichkeit, dass die Alkalisierung der Anlage durch die Stoffwechseltätigkeit von Mikroorganismen durch die Nachspeisung von Leitungswasser überlagert und verringert wurde und gleichzeitig anhaltende Korrosionsprozesse stattfinden. Hierzu trägt auch der grenzwertige Sauerstoffgehalt bei.

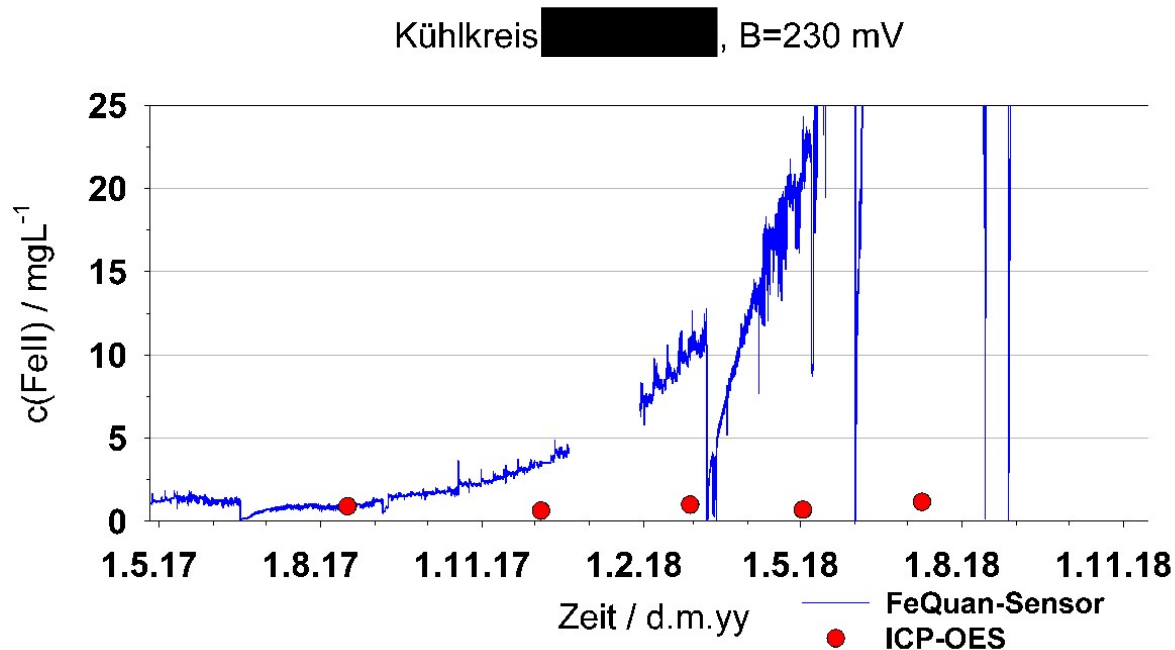


Abb. 66 Berechneter (FeQuan-Sensor) und analytisch ermittelter Eisengehalt (ICP-OES)

Mikrobiologie

Es erfolgten drei mikrobiologische Analysen des Umlaufwassers des Kühlkreises. In der ersten Probe aus dem Jahr 2014 dominierten Eisenoxidierer und Sulfatreduzierer sowie Bakterien, die in der Lage sind, halogenierte und komplexe Verbindungen abzubauen. Im darauffolgenden Jahr ist der Anteil der Eisenoxidierer stark reduziert. Dagegen haben sich Nitratreduzierer und Biofilmbildner neben stark korrosionsfördernden Sulfatreduzierern etabliert. Mit etwa 40 mg/L wurden dauerhaft erhöhte Gehalte an gelösten organischen Verbindungen festgestellt, die mit ursächlich für mikrobiologische Probleme sein können.

Sulfatreduzierer bauen im Wasser vorhandenes Sulfat zu elementaren Schwefel und Säuren ab. Sulfat ist in jedem Leitungswasser in unterschiedlichen Anteilen vorhanden. Elementarer Schwefel wirkt hoch korrosiv und die entstandenen Säuren senken den pH-Wert ab. Die pH-Wert-Absenkung erfolgt unter Umständen nur lokal auf den Oberflächen oder unter Rost-Tuberkeln und ist nicht jedem Fall im Umlaufwasser zu erkennen. Nachdem das Sulfat abgebaut wurde etablieren sich regelmäßig Nitratreduzierer in Kombination mit Stickstofffixierern, die das im Wasser vorhandene Nitrat zu Nitrit und folgend in Stickstoff umwandeln, Stickstofffixierer können bei eintretendem Sauerstoff wie in dieser Anlage und ausreichend organischem Kohlenstoff Nitrat nachliefern. Auch hierbei entstehen Säuren. Biofilmbildner entstehen ebenfalls, wenn genügend organisches Material und Sauerstoff vorhanden ist, oft in Gemeinschaften mit Stickstofffixierern. Unter Biofilmen können ganz eigene Milieus entstehen, die die Korrosion begünstigen. Zuletzt etablieren sich Keime, die die Bestandteile von Kunststoffen zehren. Dies können entwichene Weichmacher oder andere flüchtige Inhaltsstoffe sein. Ein Abbau der Kunststoffe auf den Oberflächen ist ebenfalls nicht ausgeschlossen. Die Kunststoffe sind in den Flächenkühlsystem verbaut.

In der letzten Probe dominieren Nitratreduzierer, die auf Nachspeisung von Leitungswasser schließen lassen und Keime, die in der Lage sind komplexe Moleküle abzubauen.

Es wurden folgende Probenahmen für mikrobielle Sequenzierung durchgeführt (Tab. 24). Die Ergebnisse sind im Einzelnen im Anhang dargestellt.

Tab. 24 Probenahmen für die mikrobielle Sequenzierung in Objekt 10, Kühlsystem

Probe	Zeitpunkt
Probennahme 1	17.07.2014
Probennahme 2	17.11.2015
Probennahme 3	16.08.2017

Als Abhilfemaßnahme gegen sich ausbildende Gaspolster wurde eine reflex-Entgasungsanlage beschafft, die jedoch noch nicht installiert wurde. Mit dem Monitoring sollte ein möglicher Einfluss auf die Bakterien des Stickstoffkreislaufs und gegebenenfalls eine Abnahme der säurebildenden Stickstofffixierer durch ein Entfernen des Stickstoffs aus der Anlage erprobt werden.



Objekt 11

Tab. 25 Gebäude- und TGA-Daten Objekt 11

Gebäude- daten	Objektbezeichnung	11 [REDACTED]
	Nutzungstyp	[REDACTED], Passivhaus
	Objektanschrift	Büro- / Verwaltungsgebäude [REDACTED], 101 [REDACTED] Berlin
TGA untersuchter Kreis Primär - Kühl- kreis	Kälteerzeugung	Nahkälte
	Nennleistung	n.b.
	Übergabesysteme	Ventilation, Unterflurkonvektoren, FanCoils, Fußbodenkühlung
	Filter im Umlaufwasser	nein
	Druckhaltung	MAG 25 I
	Nachspeisung	Leitungswasser, manuell über Entsalzungspatrone
	Nachspeisewasser	vollentsalzt (Kartusche)
	Temperaturbereich	8-10 °C (bis zu 25 °C bei Stagnation)
	Materialien	Schwarzstahl (Rohre), Kupfer (Wärmetauscher)
	Sauerstoff- diffusionsoffene Materialien	Nein



Abb. 67: Manuelle Nachspeisung mit Entsalzungskartusche

Spülung und Erstbefüllung

Aufgrund der vorgefundenen Leitfähigkeit ist anzunehmen, dass das System mit Leitungswasser gespült und anschließend mit Osmosewasser befüllt wurde. Vermutlich kam Wasser aus dem Fernwärmenetz zum Einsatz. Dieses ist vollentsalzt und kann gegen Gebühr zur Systembefüllung verwendet werden.

Verwendete Materialien

Im System wurde überwiegend Schwarzstahl verbaut. Einzelne Verbindungen oder Anschlussleitungen bestehen aus Buntmetalllegierungen und Edelstahl. Wärmetauscher sind in der Regel aus Kupfer.

Nachspeisung

Die Nachspeisung erfolgt manuell über eine Entsalzungspatrone. Das ist vorteilhaft hinsichtlich einer erzwungenen Kontrolle der Nachspeisemenge, die auf mögliche Lecks hindeuten kann. Nachteilig ist, dass bei einem unerkannten Wasserverlust der Druck soweit fallen kann, dass ein Sauerstoffeintritt erfolgt. Im Beobachtungszeitraum war der Druck immer im Sollbereich, so dass ein Sauerstoffeintritt durch Druckmangel ausgeschlossen wird. Die



Nachspeisung erfolgt mit Leitungswasser, das über eine Entsalzungspatrone geleitet wird. Im Beobachtungszeitraum erfolgten laut Gebäudebetreiber keine Nachspeisungen.

Temperaturen

Die Temperaturen betragen an der Messstelle um 9 °C. An anderen Stellen mit Stagnation können Raumtemperaturen erreicht werden.

Probenahme und Erfassung der Feldparameter

Es wurden während der Phase II der Feldstudie folgende Probeentnahmen durchgeführt, siehe Tab. 26.

Tab. 26 Probenahmen für die chemischen Analysen in Objekt 11

Probenahme	Zeitpunkt
Probenahme 1	22.03.2017
Probenahme 2	16.08.2017
Probenahme 3	04.12.2017
Probenahme 4	27.02.2018
Probenahme 5	03.04.2018

Die Einzelergebnisse sind im Anhang 3.3.4 aufgeführt.

Sensorgestütztes Monitoring mit FeQuan-Sensor

Der FeQuan-Sensor stellt eine kompakte Version der anfänglich verwendeten mobilen Messeinheit dar. Aufgrund eines neu entwickelten Mess- und Auswerteverfahrens ist es möglich, mit diesem Sensor Korrosionsprozesse zu erkennen, bevor partikuläre Korrosionsprodukte ausfallen und Schäden verursachen. Als Teil eines ganzheitlichen Energie- und Qualitätsmanagements ist zukünftig mit Hilfe des FeQuan-Sensors die automatisierte und kontinuierliche Überwachung des Umlaufwassers zur Schadensvermeidung absehbar.

Verlauf

Relevante Ereignisse im Monitoringzeitraum sind in Tab. 28 aufgelistet und entsprechend in Abb. 68 markiert. Das System wurde wahrscheinlich mit vollentsalztem Wasser befüllt, die Nachspeisung erfolgt ebenfalls mit vollentsalztem Wasser mittels einer Entsalzungskartusche, siehe Abb. 67. Die Erschöpfung der Kartusche ergibt sich aus der durchlaufenden Wassermenge, die mit einem angeschlossenen Wasserzähler erfasst werden kann. Im Beobachtungszeitraum steigt die Leitfähigkeit sprunghaft um wenige $\mu\text{S}/\text{cm}$ an und fällt dann

langsam wieder ab (152 auf 154 $\mu\text{S/cm}$). Die Ursache ist unklar. Allerdings ist der Differenzwert so gering, dass dem keine Bedeutung zugemessen wird. Die Leitfähigkeit des Umlaufwassers weist auf die Verwendung von vollentsalztem Wasser hin, das mit Restwasser aus der Spülung vermischt wurde. Die Leitfähigkeit liegt deutlich unter der des Standortwassers (762 $\mu\text{S/cm}$) [Berliner Wasserbetriebe Versorgungszone 6]. Im März 2018 ist der sprunghafte Abfall des pH-Wertes von 9,4 auf 9,2 zu beobachten. Vier Monate später steigt er wieder auf den Ursprungswert an. Für die Ursache besteht keine Erklärung. Da Temperaturänderungen mit der pH-Wert – Änderung einhergehen, wird vermutete, dass sich die Durchströmungsgeschwindigkeit in der Messstrecke geändert hat. Im gesamten Beobachtungszeitraum steigt der Sauerstoffgehalt von Null beginnend kontinuierlich an. Hier wird ein Sensordefekt vermutet. Infolge des -gemessenen- Abfalls des pH-Wertes steigt die berechnete Eisenkonzentration an, die nicht mit einer tatsächlichen Steigerung des Eisengehaltes zusammenhängt.

Tab. 27 Historie des Systems vor Monitoring

Zeitpunkt	Maßnahme	Wasserbehandlung
2007	Erstbefüllung	Vermutlich vollentsalztes Wasser
	Weitere Ereignisse sind nicht bekannt	

Tab. 28 Ereignisse während des Monitorings

Ereignis/ Datum	Beschreibung	Bemerkungen
#0 / April 2017	Inbetriebnahme Monitoring	
#1 / Juli 2017	Sprunghafter leichter Anstieg der Leitfähigkeit	
#2 / März 2018	Abfall des pH-Wertes von 9,4 auf 9,1	
#3 / April 2018	Sprunghafter leichter Anstieg der Leitfähigkeit	
#4 / Juli 2018	Anstieg des pH-Wertes wieder auf den Ursprungswert	

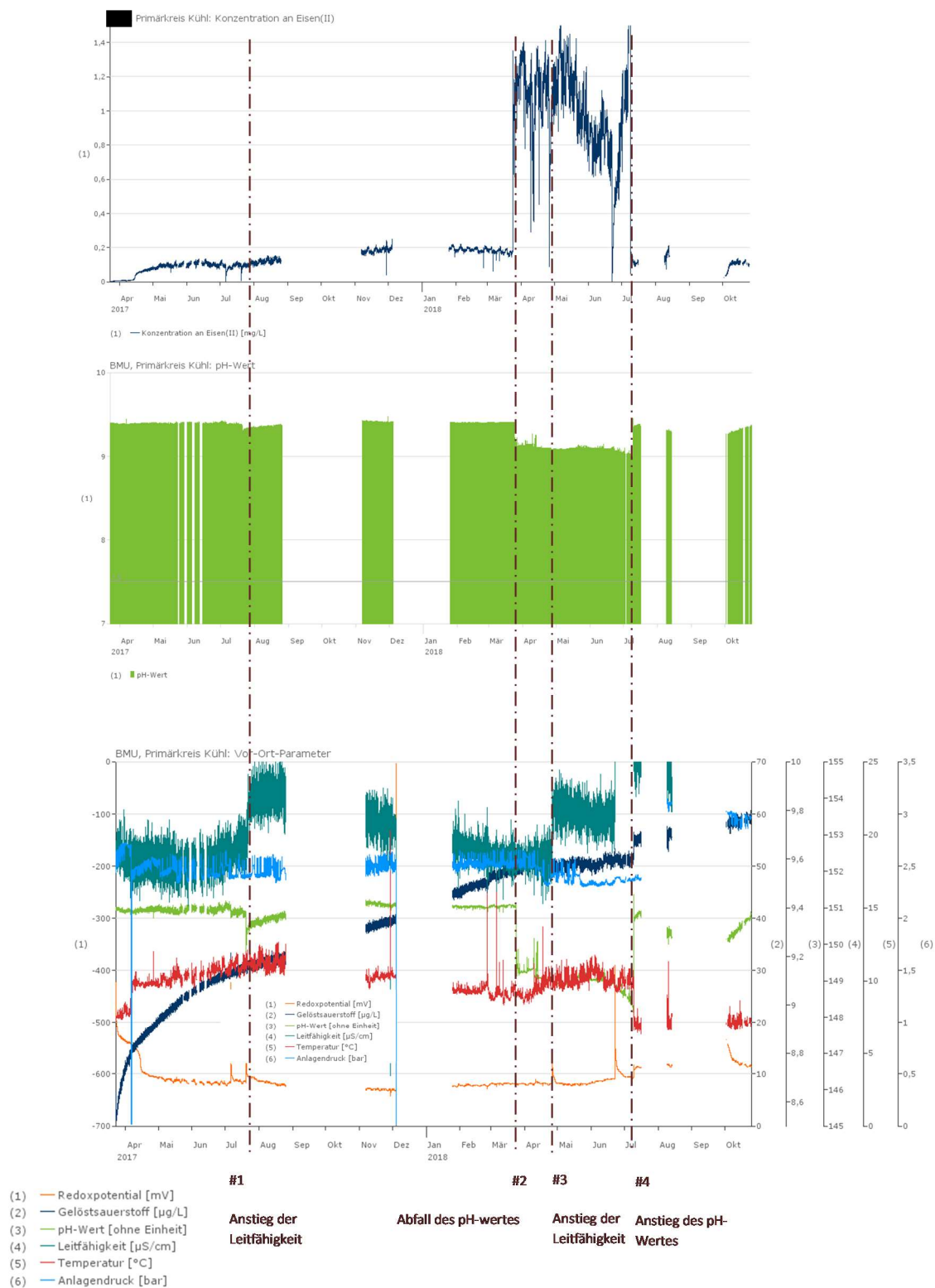


Abb. 68: Zeitreihen der Korrosionsrate, des pH-Wertes und der Sensorwerte

Abgleich des Sensorsignals mit den Ergebnissen der chemischen Analysen

In Abb. 69 ist der zeitliche Verlauf des berechneten und durch chemische Analysen bestimmte Eisengehalt aufgezeigt. Die chemisch nachgewiesenen Eisengehalte stimmen bei sehr geringen Konzentrationen gut mit dem Sensorsignal überein. Die letzten beiden Laboranalysen zeigen die deutlichsten Abweichungen nach unten, wobei ein Einfluss der Probenahme durch Oxidation gelösten Eisens und somit Minderbefunde in der analytisch bestimmten Konzentration wahrscheinlich sind.

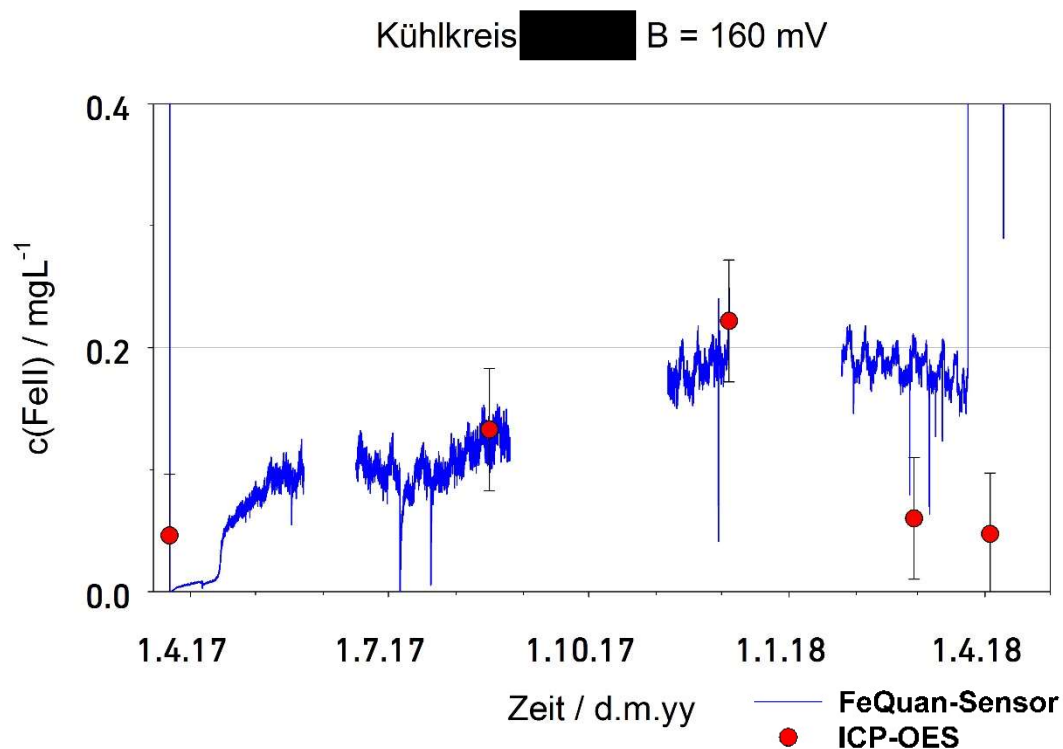


Abb. 69: Berechneter (FeQuan-Sensor) und analytisch (ICP-OES) ermittelter Eisengehalt

Mikrobiologie

Es erfolgten zwei mikrobiologische Analysen des Umlaufwassers, siehe Tab. 29. In der ersten Probe dominieren Sulfat-reduzierende und thermophile Bakterien, sowie Bakterien, die komplexe Verbindungen abbauen können. In der zweiten Probe, 10 Monate später, dominieren Nitratreduzierer, Biofilmbildner und Methanoxidierer. Überraschend ist das Vorkommen thermophiler Bakterien in einem Kältenetz. Sulfat- und Nitratreduzierende Organismen erhöhen wie Stickstofffixierer das Korrosionsrisiko. Biofilmbildner kommen aufgrund der recht hohen Sauerstoffgehalte vor. Die absoluten Keimzahlen dürften aufgrund der Verwendung von vollentsalztem Wasser gering sein, insgesamt ist keine starke Korrosionsneigung zu erkennen.



Tab. 29 Probenahmen für mikrobielle Sequenzierung in Objekt 11

Probenahme	Zeitpunkt
Probenahme 1	20.04.2016
Probenahme 2	16.08.2017

Zusammenfassung und Bewertung

Für das Objekt 11 wird seit April 2017 ein kontinuierliches Monitoring der hydraulischen Systeme der Wärme- und der Kälteversorgung durchgeführt. Weiterhin erfolgten regelmäßige Probenahmen und chemische sowie mikrobiologische Analysen des Umlaufwassers. In diesem Bericht wird das Primärsystem Kälte des Passivhauses behandelt. Die Eisengehalte bleiben im gesamten Beobachtungszeitraum auf niedrigem Niveau. Weitere Metalle wie Kupfer, Zink und Aluminium sind teilweise im geringen Umfang, Kupfer und Zink zeitweise nicht nachweisbar. Diese drei Metalle stammen aus dem Buntmetall der Schraubverbindungen. Kupfer kann zusätzlich aus den Wärmetauschern stammen. Mikrobiologisch wurden Nitrat und Sulfatreduzierer nachgewiesen, die das Korrosionsrisiko erhöhen können. Aufgrund des niedrigen Nährstoffangebotes wird aber von einer niedrigen Keimzahl ausgegangen und auch die geringen Metallgehalte geben keinen Anlass zur Sorge, Abhilfemaßnahmen waren daher nicht erforderlich. Der Druck ist stabil und nicht zu beanstanden. Der Sauerstoffgehalt ist im Monitoringzeitraum kontinuierlich gestiegen, so dass von einem Sensorfehler ausgegangen werden muss. Solange die Korrosion auf dem festgestellten geringen Niveau verharrt, ist sie unbedenklich. Allerdings sollte das System regelmäßig beprobt bzw. kontinuierlich überwacht werden um Systemänderungen rechtzeitig zu entdecken. Die mikrobiologischen Aktivitäten können mit einem Biozid gestoppt werden.

Objekt 19: Leuphana Zentralgebäude

Im Zentralgebäude der Leuphana wurde die Befüllung der Heiz- und Kühlsysteme begleitet und anschließend ein Monitoring durchgeführt. Die Befüllung erfolgte mit salzarmem enthärtetem Wasser und sollte eine geringe Korrosionsneigung aufweisen. Das Heizsystem (Abb. 70, Abb. 71, Abb. 72) wies nachfolgend tatsächlich sehr gute Eigenschaften mit sehr geringen Eisengehalten und einer schnellen Alkalisierung auf. Zudem konnte beispielhaft die Bildung von Magnetit aus intensiv grüngefärbten „Green Rust“-Komplexen beobachtet werden (Abb. 73).

Heizkreis Zentralgebäude Leuphana, B = 40 mV

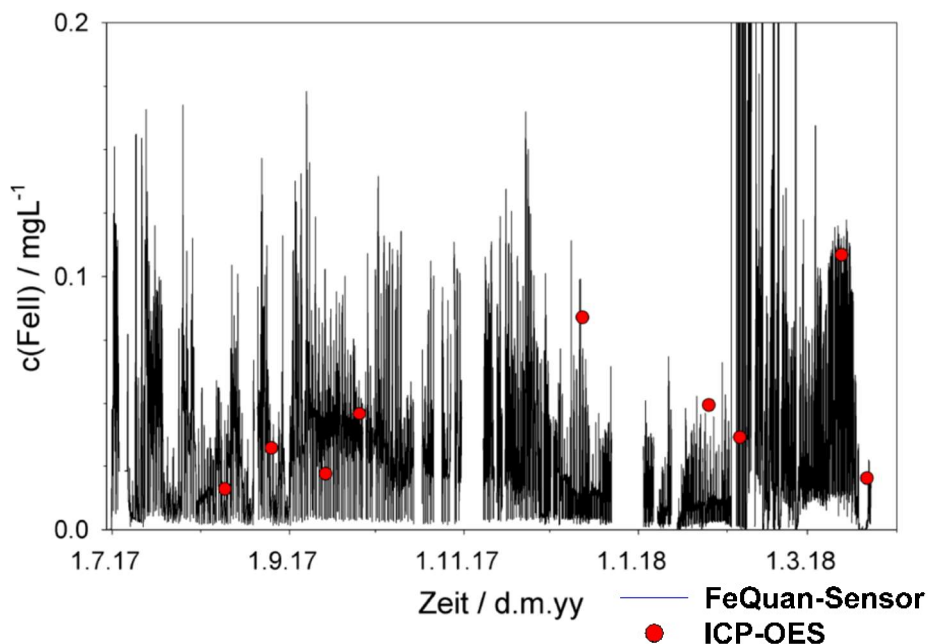


Abb. 70: Heizkreislauf Leuphana Zentralgebäude, Berechneter (FeQuan-Sensor) und analytisch (ICP-OES) ermittelter Eisengehalt

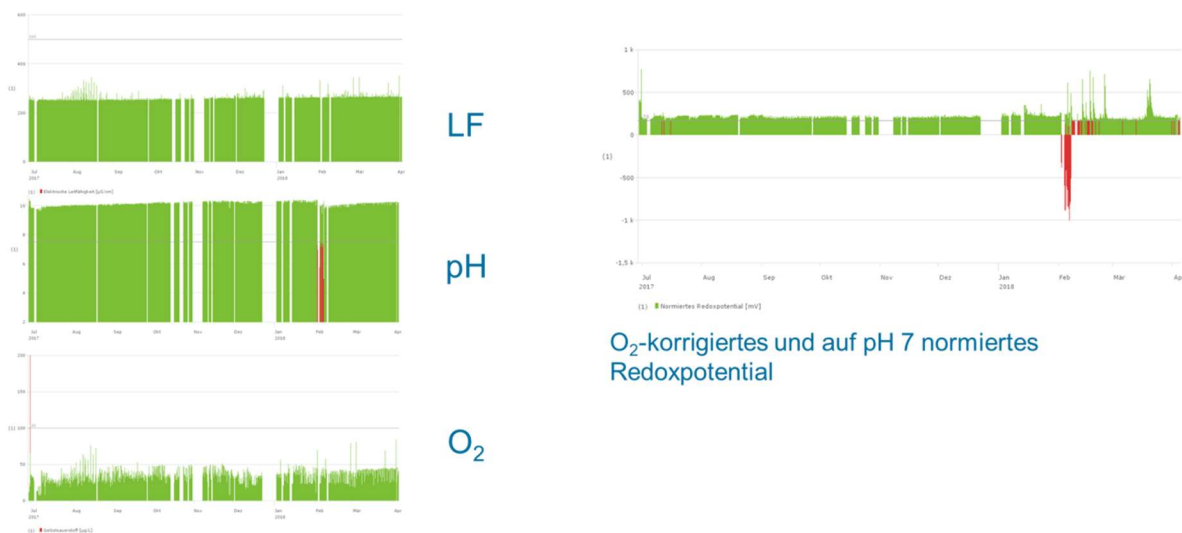


Abb. 71: Heizkreislauf Leuphana Zentralgebäude, Einzelparameter



Abb. 72: Heizkreislauf Leuphana Zentralgebäude, Performancechart

GREEN RUST

Kurz nach Probenahme



Abb. 73: Intensiv grün gefärbter Komplex "Green Rust" als Vorstufe der Magnetitbildung (Heizkreislauf Leuphana Zentralgebäude)

Im Kühlsystem wurden nach Befüllung sehr hohe Magnetitgehalte (20 mg/L) festgestellt. Nach einem Event Anfang August 2017 stiegen auch die Gelösteisengehalte stark an, was von der Sensorstrecke aufgezeichnet wurde (Abb. 74). Als Abhilfemaßnahme wurde die Installation einer Filtration erwogen, ggf. mit Entsalzung. Zur Aufklärung der Prozesse wurden mikrobiologische Untersuchungen und eine Bestimmung organischer Säuren durchgeführt. Es wurden große Mengen (> 100 mg/L) Propioni- und Essigsäure festgestellt (Opel et al. 2019). Die vorherrschenden Bakteriengattungen (Tab. 30) waren *Azospira* (Stickstofffixie-

rung), *Halomonas* (Eisenreduzierer) und *Propionibacterium* (Fermentierer/Säurebildner). In geringem Umfang wurden Sulfatreduzierer festgestellt (Abb. 76).

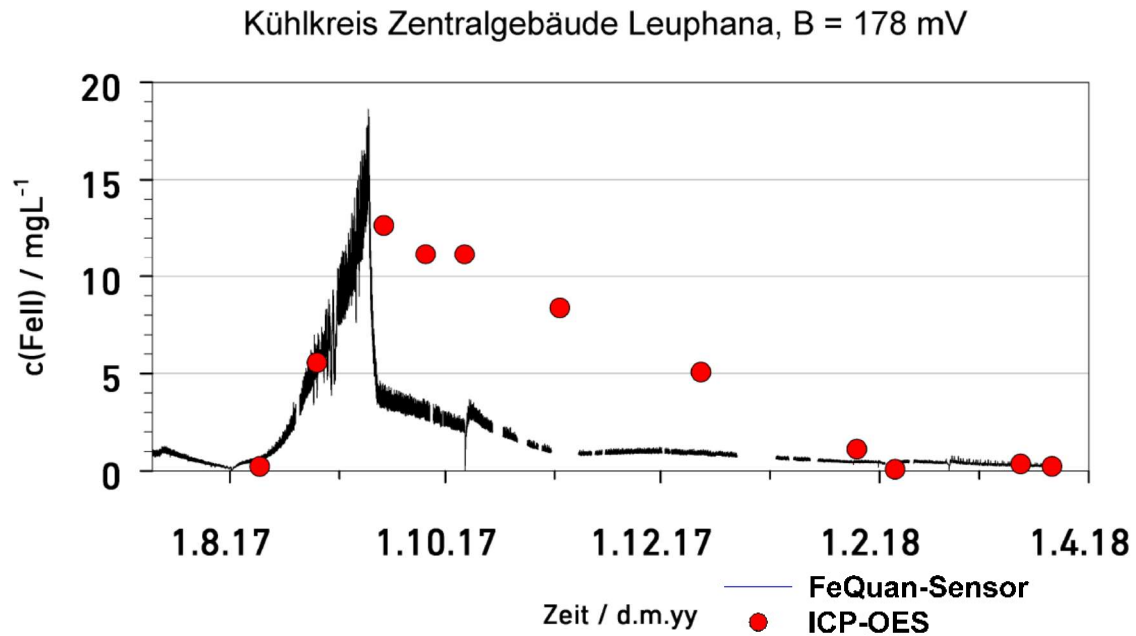


Abb. 74: Kühlkreislauf Leuphana Zentralgebäude, Berechneter (FeQuan-Sensor) und analytisch (ICP-OES) ermittelter Eisengehalt

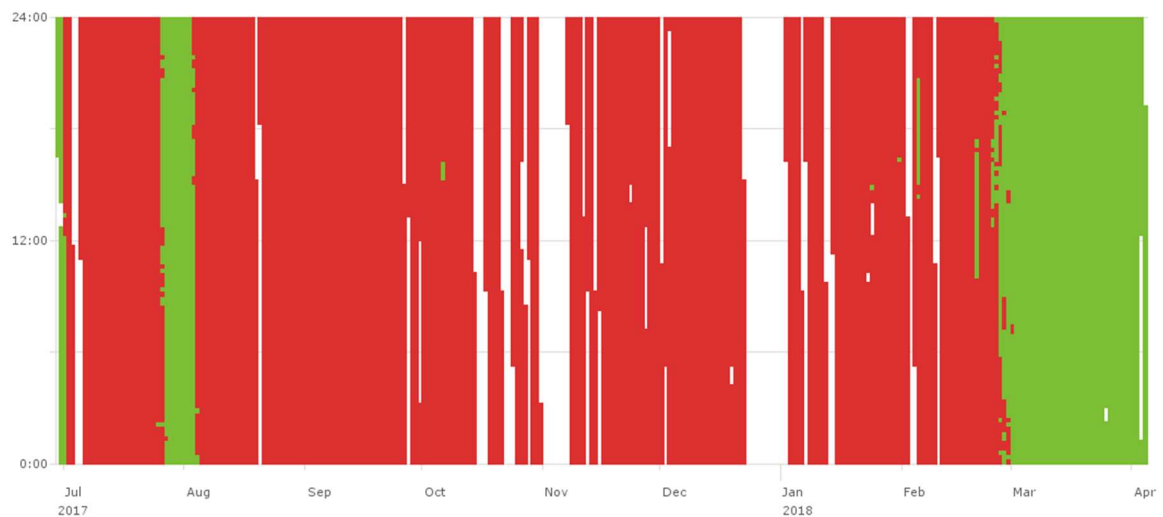


Abb. 75: Kühlkreislauf Leuphana Zentralgebäude, Rasterdiagramm Systemzustand



Tab. 30 Kühlkreislauf Leuphana Zentralgebäude, Anteile der einzelnen Spezies

Bezeichnung	Anteil in %	Bezeichnung	Anteil in %	Bezeichnung	Anteil in %
Halomonas	28,13	Lawsonella	0,68	Pleomorphomonas	0,15
Azospira	16,02	Bosea	0,58	Prevotella	0,15
Novosphingobium	9,36	Chryseobacterium	0,56	Anaerococcus	0,14
Propionibacterium	8,43	Sphingomonas	0,47	Caulobacter	0,14
Rhodovarius	4,19	Smithella	0,45	Nordella	0,14
Ruminiclostridium 1	3,60	Paracoccus	0,43	SEEP-SRB1	0,14
Corynebacterium 1	2,60	Curvibacter	0,33	Robiginitomaculum	0,14
Acetobacterium	2,50	Sulfuricurvum	0,32	Sphingobium	0,14
Brevundimonas	2,18	Geobacter	0,31	Acidovorax	0,14
Enhydrobacter	2,00	Faecalibacterium	0,29	Granulicatella	0,13
Dechloromonas	1,23	Tabrizicola	0,28	Sphingopyxis	0,13
Pseudomonas	1,20	Kocuria	0,27	Rhodiferax	0,13
Roseococcus	1,20	Reyranella	0,25	Dialister	0,13
Hydrogenophaga	1,15	Dinoroseobacter	0,23	Alkanindiges	0,13
Achromobacter	1,09	Phenylobacterium	0,22	Pseudarthrobacter	0,12
Serratia	1,05	Alloprevotella	0,19	Delftia	0,12
Desulfovibrio	0,90	Variovorax	0,19	Geothrix	0,12
Staphylococcus	0,88	Brevibacterium	0,18	Actinomyces	0,12
Erysipelothrix	0,81	Polynucleobacter	0,18	vadinBC27 wastewater-sludge group	0,12
Desulfotomaculum	0,72	Finexgoldia	0,18	Prevotella 7	0,11

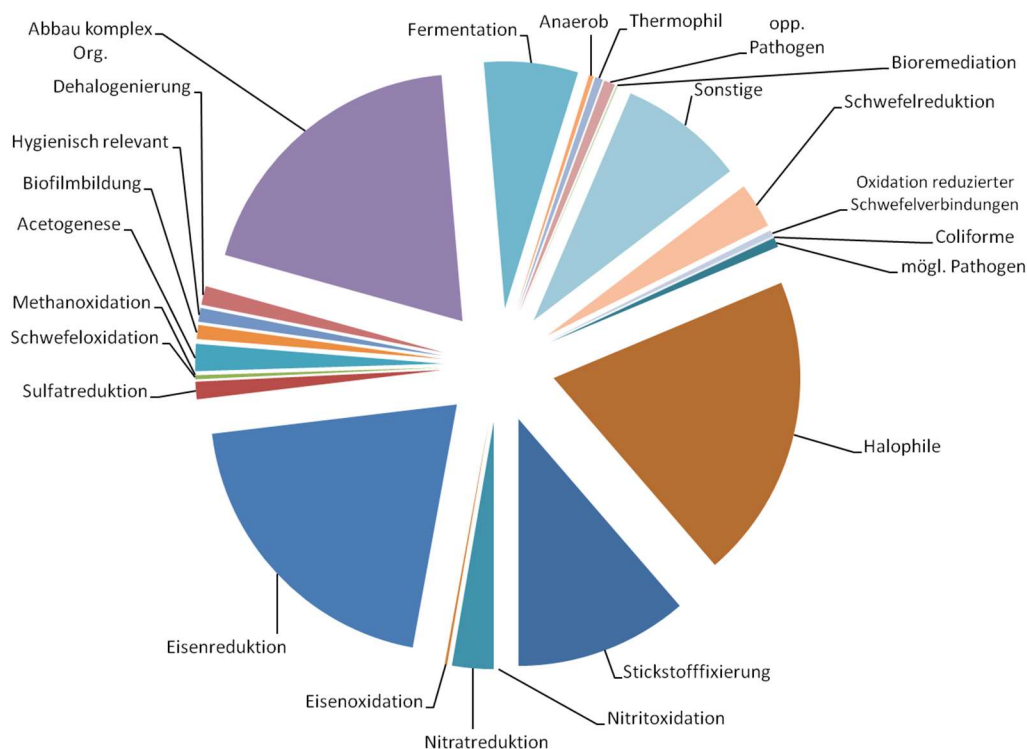


Abb. 76: Kühlkreislauf Leuphana Zentralgebäude, Anteile der einzelnen Spezies auf Basis ihrer Stoffwechselfunktionen

Nach einem weiteren Event Anfang September 2017 sanken die Gelösteisengehalte jedoch wieder, die Anlage erreichte bis Projektende ohne weitere Maßnahmen wieder einen guten Zustand.

2.5 AP5: Dokumentation, Dissemination

Die Ergebnisse der Feldstudie flossen in technische Regeln ein, wurden in zahlreichen nationalen Fachveranstaltungen sowie cci-Schulungen und auch auf einer internationalen wissenschaftlichen Konferenz präsentiert.

Besonders zu nennen gilt die Mitarbeit im BTGA-Ausschuss zur Erarbeitung einer neuen Richtlinie für die Befüllung von Kühlsystemen (BTGA: Bundesverband technischer Gebäudeausrüster), die Zuarbeit zur aktuellen Überarbeitung der VDI 2035 und die Untersuchung mehrerer Bundesbauten, wodurch eine Zusammenarbeit mit dem Bundesinstitut für Bau-Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung entstand. Im Folgenden werden technische Regeln, in der Projektlaufzeit gehaltene Vorträge und Veröffentlichungen genannt.

Technische Regeln

- VDI-Richtlinie 2035 Blatt 1 (2019)
- BTGA-Regel 3.002 (07/2018)
- BTGA-Regel 3.003 (04/2017)

Vorträge

- Wiegand, M. (2018): Kontinuierliches Korrosionsmonitoring in Heiz- und Kühlkreisläufen auf Basis von Redoxpotentialmessungen. GfKorr, Frankfurt (Main).
- Zargari, M., Opel, O. (2018): Wasser, Stahl und Salz: Wie geht das zusammen? cci-Schulung Korrosionssichere Planung, Inbetriebnahme und Betrieb von wasserführenden Systemen, Berlin.
- Zargari, M., Opel, O. (2017): Die Realität im Gebäudebetrieb - gibt es eine korrosionssichere Planung überhaupt? cci-Schulung Korrosionssichere Planung, Inbetriebnahme und Betrieb von wasserführenden Systemen.
- Zargari, M., Opel, O. (2017): Wasserchemie-Einfluss auf das Material und die Folgen. cci-Schulung Korrosionssichere Planung, Inbetriebnahme und Betrieb von wasserführenden Systemen.



- Opel, O., Plesser, S., Wiegand, M., Zargari, M. (2017): Korrosion in hydraulischen Systemen. Jahrestagung des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins DKV, 22.-24. November 2017, Bremen.
- Wiegand, M. (2017): Corrosion monitoring of heating and cooling systems in buildings using pH, redox potential, dissolved oxygen, temperature and conductivity measurements. EUROCORR 2017, 3.-7. September, Prag, Tschechische Republik.
- Opel, O., Zargari, M., Wiegand, M., Plesser, S. (2017): Korrosion in Heiz- und Kühlanlagen. 9. Energieforum Sachsen-Anhalt - Fachtagung Effizienzheizung.
- Opel, O., Zargari, M., Eggerichs, T., Plesser, S., Fisch, M.N., Ruck, W. (2016): 2. Workshop „Energie- und Qualitätsmanagement zur Vermeidung von Korrosion in hydraulischen Systemen“, Braunschweig.
- Opel, O., Zargari, M., Eggerichs, T., Otte, O., Plesser, S., Ruck, W., Fisch, M.N. (2016): Qualitätsmanagement zur Vermeidung von Korrosionsprozessen in hydraulischen Systemen. TGA-Kongress 2016, 14th-15th April, TU Berlin.

Veröffentlichungen

- Wiegand, M., Opel, O., Neumann, K. (2019): Microbial Corrosion in Heating & Cooling Water Loop Systems. Findings from Bacterial Community Analysis. Konferenzbeitrag, EUROCORR 2019, 9.-13. September, Sevilla, Spanien.
- Opel, O., Zargari, M., Wiegand, M. (2019): Vermeidung von Korrosion in hydraulischen Systemen - Wasserführende Systeme sicher schützen. KKA Ausgabe Großkälte 2019, Bauverlag, Gütersloh.
- Opel, O., Wiegand, M., Neumann, K., Zargari, M. und Plesser, S. (2018): Corrosion in Heating and Cooling Water Circuits – A Field Study. Energy Procedia 155, 359-366.
- Opel, O., Zargari, M., Wiegand, M., Plesser, S., Neumann, K. (2018): Corrosion in water circuits – A field study. Wissenschaftliches Poster 12. Internationale Erneuerbare Energien Speicher Konferenz, 13.-15. März, Düsseldorf, 2018.
- Andresen, S., Malinowski, D., Dreger, H., Opel, O., Zargari, M., Heckmann, J., Tuschy, S. (2018): Gebäude sind tickende Zeitbomben – Korrosion in wasserführenden Systemen: So geht es weiter. cci Zeitung 02/2018, S. 28-29, cci Dialog GmbH, Karlsruhe.
- Opel, O., Plesser, S., Wiegand, M., Zargari, M. (2018): Vermeidung von Korrosion in hydraulischen Systemen. HLH 69 (1), Springer VDI, Düsseldorf.
- Opel, O., Eggerichs, T., Otte, T., Wiegand, M., Zargari, M., Plesser, S., Fisch, M.N., Ruck, W.K.L. (2017): Korrosion in Heiz- und Kühlsystemen; Feldstudie zu Korrosion

in TGA-Systemen abgeschlossen – erste Ergebnisse liegen vor. BTGA-Almanach 2017, S. 56 – 59.

- Klein, A., Opel, O., Tuschy, S., Zargari, M. (2017): Die neue BTGA-Regel 3.003 - Kalt- und Kühlwasserkreisläufe sicher betreiben. Kälte Klima Aktuell 04/2017, Bauverlag BV, Gütersloh.
- Opel, O., Eggerichs, T., Otte, T., Wiegand, M., Zargari, M., Plessner, S., Fisch, M.N., Ruck, W.K.L. (2016): Korrosion in Heiz- und Kühlsystemen. BTGA-Almanach 2016, S. 42-45.
- Wiegand, M., Opel, O., Eggerichs, T., Otte, T., Zargari, M., Plessner, S. (2017): Corrosion monitoring of heating and cooling systems in buildings using pH, redox potential, dissolved oxygen, temperature and conductivity measurements. EUROCORR 2017, 3rd-7th September, Prague, Czech Republic.
- Zargari, M., Opel, O., Eggerichs, T., Otte, T., Wiegand, M. (2016): Licht ins Dunkel - Korrosion in hydraulischen Systemen. cci-Zeitung 09/16, cci Dialog GmbH, Karlsruhe.

Zudem ist derzeit noch eine Veröffentlichung mit dem Titel „Microbial community composition in heating and cooling systems of buildings“ geplant, in der die Zusammensetzung der mikrobiellen Flora in Heiz- und Kühlanlagen beschrieben wird.

2.6 Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Es wurde bekannt, dass durch die Fa. Resus der Korrosionssensor Sensor Risycor auf den Markt der Benelux-Staaten gebracht worden ist. Im Test erwies sich dieser im Vergleich unempfindlicher als der in diesem Projekt in seiner Praxistauglichkeit untersuchte Sensor, konnte jedoch Sauerstoffeintrag und pH-Wert-Änderungen bzw. die Korrosivität des Fluids robust detektieren. Ansonsten sind keine relevanten Ereignisse außerhalb des Projekts und der durch die Dissemination der Ergebnisse erreichten Fortschritte zu dokumentieren.

2.7 Fazit und Ausblick

In einem Folgeprojekt wird der Korrosions-Sensor in die Betriebsüberwachung von Gebäuden und ggf. Prozessen eingebunden und für die Inbetriebnahmephase genutzt. Das SIZ e+ bietet das erworbene Know-How in Form einer unabhängigen Beratung zur Schadensvermeidung und Schadensbehebung an. Der Aufbau eines Zertifizierungsverfahrens für unabhängige Sachverständige für Korrosion in TGA-Systemen wird diskutiert.



Wissenschaftliche Forschung schließt vor allem an den erstmalig in diesem Projekt erzielten Erkenntnissen hinsichtlich mikrobiologischer Lebensgemeinschaften mit Einfluss auf das Korrosionsverhalten der untersuchten Anlagen an.

2.8 Abkürzungen

VE Voll-entsalzt

FM Facility-Manager

PM Property-Manager

2.8.1 Begriffe

Alkalisierung: Nach Erstbefüllung setzen aufgrund des im Füllwasser gelösten Sauerstoffs sofort Korrosionsprozesse ein, die den Sauerstoff zehren. Dabei steigt der pH-Wert und das Füllwasser wird alkalisch. In einem ausreichend alkalischen Milieu (nach VDI 2035 Blatt 2 ab einem pH-Wert von 8,2) besteht eine Schutzfunktion gegen weitere Korrosion.

Enthärtung: Dem Wasser werden die Erdalkalien Calcium und Magnesium entzogen die für die Steinbildung in Heizsystemen verantwortlich sind.

Entsalzung: Dem Wasser werden alle Salze entzogen. Ein gängiges Verfahren ist die Umkehrosmose.

Füllwasser (FW): Das Wasser welches zur Befüllung eines Systems verwendet wird, abzugrenzen vom ->Umlaufwasser, das sich in einem System befindet.

Leitfähigkeit (LF): Die Leitfähigkeit eines Wassers bestimmt sich vor allem durch den Gehalt an gelösten Salzen und ist Voraussetzung, damit das Wasser als Elektrolyt im Korrosionsprozess wirksam ist.

Leitungswasser (LW): Die Wasserparameter von unbehandeltem Leitungswasser sind standortabhängig sehr unterschiedlich. So ist es durchaus möglich, dass eine Reihe Anforderungen durch ein unbehandeltes LW erfüllt werden.

pH-Wert: -> Alkalisierung

Sulfatreduzierer: Mikroorganismen, die Sulfat abbauen und dadurch Korrosionsprozesse befördern.

Umlaufwasser (UW): Das im System befindliche Wasser

Voll-Entsalzt (VE): Eine Art der Wasserbehandlung. Dem Wasser werden alle Salze entzogen. Ein gängiges Verfahren ist die Umkehrosmose.

Wasseraufbereitung: Dem Wasser werden chemische Stoffe zugeführt um seine Eigenschaften zu verbessern, z.B. Inhibitoren oder Säurepuffer

Wasserbehandlung: Dem Wasser werden Stoffe entzogen um seine Eigenschaften zu verbessern, Z.B. Salze oder Erdalkalien zur Enthärtung.

2.9 Abbildungsverzeichnis

<i>Abb. 1: Membran Druck-Ausdehnungsgefäße (MAG), Pumpendruckhaltung, Kompressordruckhaltung [2].....</i>	<i>15</i>
<i>Abb. 2: Auszug aus der TGL 18771/02: Zulässige Sauerstoffkonzentration in Abhängigkeit vom pH-Wert</i>	<i>22</i>
<i>Abb. 3: Auszug aus der TGL 190-255/01: Wasserchemische Anforderungen an das Umlaufwasser.....</i>	<i>23</i>
<i>Abb. 4: Auszug aus der ZKS Richtlinie R 38-87: Wasserchemische Anforderungen am Umlaufwasser in Kälteanlagen</i>	<i>24</i>
<i>Abb. 5: Einfluss von Schwefel auf Korrosionsprozesse [26][28][29][30].....</i>	<i>27</i>
<i>Abb. 6: MIC-Prozesse und mikrobielle Sukzession [26]</i>	<i>28</i>
<i>Abb. 7: Screenshot der webbasierten Umfrage.....</i>	<i>34</i>
<i>Abb. 8: Probenahme in einem untersuchten Objekt</i>	<i>40</i>
<i>Abb. 9: Beurteilung der untersuchten Anlagen nach einem Ampelschema</i>	<i>41</i>
<i>Abb. 10: Gelöseisenkonzentration in Relation zum Chloridgehalt.....</i>	<i>42</i>
<i>Abb. 11: Sauerstoffgehalt in Relation zur Temperatur und Gesamteisenkonzentration in Relation zum Sauerstoffgehalt.....</i>	<i>42</i>
<i>Abb. 12: Gesamteisenkonzentration in Relation zum pH-Wert.....</i>	<i>43</i>
<i>Abb. 13: Gelöseisenkonzentration in Relation zur elektrischen Leitfähigkeit</i>	<i>44</i>
<i>Abb. 14: Sekundär-Kühlsystem, Sauerstoff-diffusionsdicht.....</i>	<i>47</i>
<i>Abb. 15: Sauerstoff wurde gezehrt, Korrosionsprodukte sind ausgefallen und wurden abfiltriert</i>	<i>47</i>
<i>Abb. 16: Die Mikrobiologie passt sich dem Nährstoffangebot an, Nitrat wurde gezehrt, Sulfatreduzierer treten vermehrt auf (mikrobiologische Sukzession).....</i>	<i>48</i>
<i>Abb. 17: Wasserproben aus einem Stahlsystem, mit Inhibitorrückständen, Sauerstoffeintrag durch Wasserverlust und wiederholte Nachspeisung mit Frischwasser (pH= 6,3): starke Korrosion.....</i>	<i>49</i>
<i>Abb. 18: Inhibitorreste und vermutlich Sauerstoffeintrag durch Wasserverlust und kontinuierliche Nachspeisung mit Frischwasser (pH= 6,3), Salze aufgrund der hohen Eisenwerte nicht messbar gewesen, Sauerstoffgehalt nicht aussagekräftig (wird sofort gezehrt).....</i>	<i>49</i>
<i>Abb. 19: Heizsystem, hoher Chlorid-Gehalt und Sauerstoffeintrag: starke Korrosion, Aluminium – Wärmetauscher korrodiert</i>	<i>50</i>
<i>Abb. 20: pH-Wert oberhalb des zulässigen Bereiches für Aluminium-Bauteile, gelöstes Eisen II.....</i>	<i>50</i>
<i>Abb. 21: Vergleich des Umlaufwassers mit dem Standortwasser: Cl-Gehalt bestätigt, Wasser wurde enthärtet, Sulfat und Nitrat gezehrt aufgrund Mikrobiologie.....</i>	<i>51</i>
<i>Abb. 22: Kombiniertes Kühl-Heizsystem, sauerstoffdichter Kunststoff, Stahlbauteile</i>	<i>52</i>
<i>Abb. 23: Ein Jahr später: Salz- und Sauerstoffgehalt gestiegen, Korrosion.....</i>	<i>53</i>



Abb. 24: Ursachen: Leckage, Nachspeisung mit unbehandeltem Wasser (trotz bestelltem VE-Wasser), keine Druckhaltung (Planungsfehler)	54
Abb. 25: Sauerstoffoffenes Sekundärsystem mit Kapillarmatten zum Heizen und Kühlen – korrosionsfest ausgeführt (bis auf Graugusspumpe), unproblematisch.....	55
Abb. 26: Umlaufwasser sauerstoffgesättigt, geringer Anteil an NE-Metallen aus Verzinkungen, Lötzinn, Edelstahl und Buntmetallen, kein Eisen in Lösung.....	55
Abb. 27: Salzgehalte entsprechen dem unbehandeltem Standortwasser, hoher Chlorid-Gehalt, pH-Wert im empfohlenen Bereich	56
Abb. 28: Als Füllwasser wurde unbehandeltes Leitungswasser verwendet, Nachspeisung vermutlich mit enthärtetem Wasser	56
Abb. 29: Häufigkeit von Gattungen untersuchter Systeme.....	57
Abb. 30: Auftragung der analytisch bestimmten Gelöseisenkonzentrationen mit Sensorwerten (nicht kalibriert) in Heizsystemen (Feldstudie Phase I)	59
Abb. 31: Auftragung der analytisch bestimmten Gelöseisenkonzentrationen mit Sensorwerten (nicht kalibriert) in Kühlsystemen (Feldstudie Phase I)	60
Abb. 32: Längsschliff eines ausgefallenen Ventils nach einjährigem Betrieb. Stufen 1-3 sind nicht mehr einstellbar. D. Malinowsky.....	64
Abb. 33: Ausgefallene Umwälzpumpe aus einem Gebäudekühlkreis mit Kühldecken. D. Malinowsky.	64
Abb. 34: Zugesezte Durchflussanzeige (links) und klemmende Ventile (rechts) aus dem System 11.1.	65
Abb. 35: Verteilung der Gehalte an Gesamt-Eisen (partikulär und gelöst).....	66
Abb. 36: Verteilung der Gehalte an partikulärem Eisen.....	67
Abb. 37: Verteilung der Gehalte an gelöstem Eisen.....	67
Abb. 38: Heizenergieverbrauch unbereinigt der Jahre 2016 und 2018, Objekt 9.....	74
Abb. 39: Heizenergieverbrauch witterungsbereinigt der Jahre 2016 und 2018, Objekt 9	74
Abb. 40: Vor- und Rücklauftemperaturen des Heizmediums im unbeeinträchtigten System	79
Abb. 41: Vor- und Rücklauftemperaturen des Kühlmediums im unbeeinträchtigten System.....	80
Abb. 42: Abhängigkeit der Wärmeübertragungsleistung von dem Wärmedurchgang $k \cdot A$ [W/K].....	81
Abb. 43: Abhängigkeit der Wärmeübertragungsleistung von dem Wärmedurchgang $k \cdot A$ [W/K] (Heizsystem) .	82
Abb. 44: Abhängigkeit der erforderlichen Temperaturdifferenz von dem Wärmedurchgang $k \cdot A$ [W/K] (Heizsystem).....	83
Abb. 45: Abhängigkeit der erforderlichen Temperaturdifferenz von dem Wärmedurchgang $k \cdot A$ [W/K] (Kühlsystem).....	84
Abb. 46: Reduzierung der Jahresheizenergie infolge Belagbildung bei verringertem Wärmedurchgang (Heizsystem).....	85
Abb. 47: Reduzierung der Jahresheizenergie infolge Belagbildung bei verringertem Wärmedurchgang (Kühlsystem).....	86

Abb. 48: Abhängigkeit der Rücklauftemperatur bei vermindertem Wärmedurchgang und konstanter Vorlauftemperatur (Heizsystem).....	87
Abb. 49: Abhängigkeit der Rücklauftemperatur bei vermindertem Wärmedurchgang und konstanter Vorlauftemperatur (Heizsystem).....	88
Abb. 50: Erforderliche gemittelte Temperatur am Wärmeübertrager bei verminderten Wärmedurchgang und konstanter Temperaturspreizung (Heizsystem)	89
Abb. 51: Erforderliche gemittelte Temperatur am Wärmeübertrager bei verminderten Wärmedurchgang und konstanter Temperaturspreizung (Kühlsystem).....	90
Abb. 52: Erforderliche Rücklauftemperatur am Wärmeübertrager bei verminderten Wärmedurchgang und unterschiedlicher Temperaturspreizung (Kühlsystem).....	91
Abb. 53: Erforderliche mittlere Temperatur am Wärmeübertrager bei unterschiedlicher Auslegungstemperaturdifferenz (Kühlsystem).....	92
Abb. 54: Einfluss der Belagbildung auf den Wirkungsgrad eines Brennwertkessels	93
Abb. 55: Auswirkung der Änderung der Vorlauftemperatur auf die Lesitungszahl einer Wärmepumpe (Stiebel Eltron WPL 15 A/ IK-2 / I2)	94
Abb. 56: Proben vom Objekt 9. Die Proben des sanierten Systems sind markiert.....	100
Abb. 57: Mobile Filterung und Osmoseentsalzung.....	102
Abb. 58: Gebrauchter Filter.....	102
Abb. 59: Montierte Messstrecke	103
Abb. 60: Verlauf des berechneten Eisengehaltes (oben) und des pH-Wertes (unten).....	105
Abb. 61: Rohdaten der Messstrecke.....	106
Abb. 62: Montageort des Fequan-Sensors für das Heizsystem. Die Anbindung erfolgte über die Entlüftungsleitungen mit Edelstahlwellrohr.....	109
Abb. 63: Zeitreihen der Korrosionsrate, des Sauerstoffgehaltes und der Sensorwerte.....	112
Abb. 64: Berechneter (FeQuan-Sensor) und analytisch (ICP-OES) ermittelter Eisengehalt	113
Abb. 65: Zeitreihen der Korrosionsrate, des Sauerstoffgehaltes und der Sensorwerte.....	120
Abb. 66 Berechneter (FeQuan-Sensor) und analytisch ermittelter Eisengehalt (ICP-OES).....	121
Abb. 67: Manuelle Nachspeisung mit Entsalzungskartusche.....	124
Abb. 68: Zeitreihen der Korrosionsrate, des pH-Wertes und der Sensorwerte.....	127
Abb. 69: Berechneter (FeQuan-Sensor) und analytisch (ICP-OES) ermittelter Eisengehalt	128
Abb. 70: Heizkreislauf Leuphana Zentralgebäude, Berechneter (FeQuan-Sensor) und analytisch (ICP-OES) ermittelter Eisengehalt.....	130
Abb. 71: Heizkreislauf Leuphana Zentralgebäude, Einzelparameter	130
Abb. 72: Heizkreislauf Leuphana Zentralgebäude, Performancechart.....	131
Abb. 73: Intensiv grün gefärbter Komplex "Green Rust" als Vorstufe der Magnetitbildung (Heizkreislauf Leuphana Zentralgebäude)	131



Abb. 74: Kühlkreislauf Leuphana Zentralgebäude, Berechneter (FeQuan-Sensor) und analytisch (ICP-OES) ermittelter Eisengehalt.....	132
Abb. 75: Kühlkreislauf Leuphana Zentralgebäude, Rasterdiagramm Systemzustand	132
Abb. 76: Kühlkreislauf Leuphana Zentralgebäude, Anteile der einzelnen Spezies auf Basis ihrer Stoffwechselfunktionen.....	133
Abb. 77: Anteile der einzelnen Gattungen auf Basis ihrer Stoffwechselfunktionen	172
Abb. 78: Anteile der einzelnen Gattungen auf Basis ihrer Stoffwechselfunktionen	175
Abb. 79: Mikrobiologische Analyse Objekt 9 Heizsystem nach Sanierung	178
Abb. 80: Anteile der Gattungen auf Basis ihrer Stoffwechselfunktion der Probe vom 17.07.2014.....	187
Abb. 81: Anteile der Gattungen auf Basis ihrer Stoffwechselfunktion	190
Abb. 82: Anteile der Gattungen auf Basis ihrer Stoffwechselfunktion	193
Abb. 83: Anteile der Gattungen auf Basis ihrer Stoffwechselfunktion	221
Abb. 84: Anteile der Gattungen auf Basis ihrer Stoffwechselfunktion.....	224
Abb. 85: Anteile der Gattungen auf Basis ihrer Stoffwechselfunktion	227
Abb. 86: Anteile der einzelnen Gattungen auf Basis ihrer Stoffwechselfunktionen	256
Abb. 87: Anteile der einzelnen Gattungen auf Basis ihrer Stoffwechselfunktionen	259

2.10 Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Übersicht themenbezogener Normen [3], [4], [5],[6], [7], [8],[9], [10],[11],[12],[13], [14].....	16
Tab. 2 Normen und Regeln in der DDR [1], [15],[16],[17], [18],[19], [20], [21], [22]	20
Tab. 3 Übersicht aller Probenahmen.....	37
Tab. 4 Übersicht der geprüften Parameter beim Online-Check	45
Tab. 5 Systeme der Feldstudie mit korrosionsbedingten Schäden	66
Tab. 6 Kupferlegierungen und Entzinkungsbeständigkeit.....	69
Tab. 7 Sanierungskosten nach [BKI], brutto	71
Tab. 8 Sanierungskosten	72
Tab. 9 Übersicht der Gebäude für Phase III.....	96
Tab. 10 Gebäude- und TGA-Daten Objekt 9.....	98
Tab. 11 Probenahmen für die chemischen Analysen in Objekt 9	101
Tab. 12 Probenahmeergebnisse Objekt 9	101
Tab. 13 Einzelmaßnahmen der Sanierung.....	103
Tab. 14 die mikrobielle Sequenzierung in Objekt 9	106
Tab. 15 Gebäude- und TGA-Daten für Objekt 10, Heizsystem	107
Tab. 16 Probenahmen für die chemischen Analysen in Objekt 10, Heizsystem	109
Tab. 17 Historie des Systems vor Monitoring.....	110
Tab. 18 Ereignisse während des Monitorings	111

Tab. 19 Probenahmen für die mikrobielle Sequenzierung in Objekt 10, Heizsystem	114
Tab. 20 Gebäude- und TGA-Daten für Objekt 10, Kühlsystem	115
Tab. 21 Probenahmen für die chemischen Analysen in Objekt 10, Kühlsystem	117
Tab. 22 Historie des Systems vor Monitoring	118
Tab. 23 Ereignisse während des Monitorings	119
Tab. 24 Probenahmen für die mikrobielle Sequenzierung in Objekt 10, Kühlsystem	122
Tab. 25 Gebäude- und TGA-Daten Objekt 11	123
Tab. 26 Probenahmen für die chemischen Analysen in Objekt 11	125
Tab. 27 Historie des Systems vor Monitoring	126
Tab. 28 Ereignisse während des Monitorings	126
Tab. 29 Probenahmen für mikrobielle Sequenzierung in Objekt 11	129
Tab. 30 Kühlkreislauf Leuphana Zentralgebäude, Anteile der einzelnen Spezies	133
Tabelle 31 Übersicht aller Analyseergebnisse aus Phase I, Werte in mg/L, Mn, Ni, Cr in µg/L	156
Tab. 32 Anteile der einzelnen Gattungen	173
Tab. 33 Anteile der einzelnen Gattungen	176
Tab. 34: Anteile der einzelnen Gattungen	179
Tab. 35 Anteile der einzelnen Gattungen	188
Tab. 36 Anteile der einzelnen Gattungen	191
Tab. 37 Anteile der einzelnen Gattungen	194
Tab. 38 Anteile der einzelnen Gattungen	222
Tab. 39 Anteile der einzelnen Gattungen	225
Tab. 40 Anteile der einzelnen Gattungen	228
Tab. 41 Anteile der einzelnen Gattungen	257
Tab. 42 Anteile der einzelnen Gattungen	260

Literaturverzeichnis

- [1] O. Opel und W. Ruck, Verfahren zur Bestimmung der Neigung der Verockerung und System hierfür (Verockerungssensor), DE10 2010 033 056.6-52, WO2012016673A1, 2012.
- [2] VDI, VDI 2035, Düsseldorf, 2009.
- [3] „DIN 4751 Teil 1 – 3:1962-76, Sicherheitstechnische Ausrüstung von Wasserheizungen bis 110° C“.
- [4] „DIN EN 14868:2005-11, Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe - Leitfaden für die Ermittlung der Korrosionswahrscheinlichkeit in geschlossenen Wasser-Zirkulationssystemen; Deutsche Fassung EN 14868:2005“.
- [5] „DIN EN 12502-2:2005-03, Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe - Hinweise zur Abschätzung der Korrosionswahrscheinlichkeit in Wasserverteilungs- und speichersystemen,“ - Teil 2: Einflussfaktoren für Kupfer und Kupferlegierungen; Deutsche Fassung EN 12502-2:2004.



- [6] „DIN EN 12502-3:2005-03, Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe - Hinweise zur Abschätzung der Korrosionswahrscheinlichkeit in Wasserverteilungs- und speichersystemen,“ - Teil 3: Einflussfaktoren für schmelztauchverzinkte Eisenwerkstoffe; Deutsche Fassung EN 12502-3:2004 , 2005-03.
- [7] „DIN EN 12502-4:2005-03, Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe - Hinweise zur Abschätzung der Korrosionswahrscheinlichkeit in Wasserverteilungs- und speichersystemen,“ - Teil 4: Einflussfaktoren für nichtrostende Stähle; Deutsche Fassung EN 12502-4:2004 , 2005-03.
- [8] „VDI-Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung, VDI 2035 Blatt 1, Vermeidung von Schäden in Warmwasser-Heizungsanlagen - Steinbildung in Trinkwassererwärmungs- und Warmwasser-Heizungsanlagen,“ VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik , 2005-12.
- [9] „Gebäudeausrüstung, VDI-Fachbereich Technische, VDI 2035 Blatt 2, Vermeidung von Schäden in Warmwasser-Heizungsanlagen - Wasserseitige Korrosion,“ VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik, 2009-08.
- [10] „Erläuterungen zur aktuellen VDI-Richtlinie 2035, Blatt 2,“ [Online]. Available: <https://www.tuev-sued.de/uploads/images/1317818007207657000181/vdi-rl-2035-2.pdf>. [Zugriff am 09 09 2019].
- [11] „ÖNORM H 5195-1: 2001 06 01, Verhütung von Schäden durch Korrosion und Steinbildung in geschlossenen Warmwasser-Heizungsanlagen mit Betriebstemperaturen bis 100 °C,“ [Online]. Available: https://shop.austrian-standards.at/action/de/public/details/88934/OENORM_H_5195-1_2001_06_01. [Zugriff am 2019 09 09].
- [12] „ BTGA 3.002:2018-07;BTGA-Regel 3.002:2018-07, Geschlossene wassergeführte Heiz- und/oder Kalt-/Kühlwasserkreisläufe in Gebäuden - Druckprüfung, Spülen und Befüllen von Neuanlagen,“ 2018-07 . [Online]. Available: <https://www.beuth.de/de/technische-regel/btga-3-002/293056131>. [Zugriff am 2019 09 09].
- [13] „ BTGA 3.003:2017-04;BTGA-Regel 3.003:2017-04, Geschlossene wassergeführte Kalt- bzw. Kühlwasserkreisläufe - Zuverlässiger Betrieb unter wassertechnischen Aspekten,“ 2017-04. [Online]. Available: <https://www.beuth.de/de/technische-regel/btga-3-003/273989579>. [Zugriff am 2019 09 09].
- [14] „DIN EN 12502-5:2005-03, Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe - Hinweise zur Abschätzung der Korrosionswahrscheinlichkeit in Wasserverteilungs- und speichersystemen,“ - Teil 5: Einflussfaktoren für Gusseisen, unlegierte und niedriglegierte Stähle; Deutsche Fassung EN 12502-5:2004.
- [15] „TGL 18771/01:1986-06-00, Korrosion und Korrosionsschutz. Metallische Werkstoffe in Wasserführenden Anlagen. Allgemeine Festlegungen,“ Bauhaus-Universität Weimar, [Online]. Available: <https://www.uni-weimar.de/de/universitaet/struktur/zentrale-einrichtungen/universitaetsbibliothek/recherche/normen/tgl-verzeichnis/tgl-18771-tgl-19482/>. [Zugriff am 09 09 2019].
- [16] „TGL 18771/02:1986-06-00, Korrosion und Korrosionsschutz. Metallische Werkstoffe in Wasserführenden Anlagen. Un- und niedriglegierter Stahl, unlegiertes Gußeisen in Rohrleitungen, Behältern und Wärmeübertragern,“ Bauhaus-Universität Weimar, [Online]. Available: <https://www.uni-weimar.de/de/universitaet/struktur/zentrale-einrichtungen/universitaetsbibliothek/recherche/normen/tgl-verzeichnis/tgl-18771-tgl-19482/>. [Zugriff am 09 09 2019].
- [17] „TGL 18771/03:1986-06-00, Korrosion und Korrosionsschutz. Metallische Werkstoffe in Wasserführenden Anlagen. Feuerverzinkter Stahl in Rohrleitungen und Behältern,“ Bauhaus-Universität Weimar, [Online]. Available: <https://www.uni-weimar.de/de/universitaet/struktur/zentrale-einrichtungen/universitaetsbibliothek/recherche/normen/tgl-verzeichnis/tgl-18771-tgl-19482/>. [Zugriff am 09 09 2019].
- [18] „TGL 18771/04:1987-05-00, Korrosion und Korrosionsschutz. Metallische Werkstoffe in Wasserführenden Anlagen. Korrosionsbeständige Stähle in Rohrleitungen, Behältern und Wärmeübertragern,“ Bauhaus-Universität Weimar, [Online]. Available: <https://www.uni-weimar.de/de/universitaet/struktur/zentrale->

einrichtungen/universitaetsbibliothek/recherche/normen/tgl-verzeichnis/tgl-18771-tgl-19482/. [Zugriff am 09 09 2019].

- [19] „TGL 18771/05:1987-05-00, Korrosion und Korrosionsschutz. Metallische Werkstoffe in Wasserführenden Anlagen. Kupfer und Kupferlegierungen in Rohrleitungen, Behälter und Wärmeübertragern,“ Bauhaus-Universität Weimar, [Online]. Available: <https://www.uni-weimar.de/de/universitaet/struktur/zentrale-einrichtungen/universitaetsbibliothek/recherche/normen/tgl-verzeichnis/tgl-18771-tgl-19482/>. [Zugriff am 09 09 2019].
- [20] „TGL 190-255/01:1988-06-00, Wärmeversorgungsanlagen. Wärmeträger. Heizwasser, Dampf, Kondensat. Qualitätsanforderungen,“ Bauhaus-Universität Weimar, [Online]. Available: <https://www.uni-weimar.de/de/universitaet/struktur/zentrale-einrichtungen/universitaetsbibliothek/recherche/normen/tgl-verzeichnis/tgl-190-241-tgl-190-356/>. [Zugriff am 09 09 2019].
- [21] „TGL 190-255/02:1978-07-00, Wärmeversorgungsanlagen. Wärmeträger. Qualitätsüberwachung,“ Bauhaus-Universität Weimar, [Online]. Available: <https://www.uni-weimar.de/de/universitaet/struktur/zentrale-einrichtungen/universitaetsbibliothek/recherche/normen/tgl-verzeichnis/tgl-190-241-tgl-190-356/>. [Zugriff am 09 09 2019].
- [22] „ZKS Richtlinie R 38-87, Werkstoffeinsatz und Korrosionsschutz in Lüftungstechnischen Anlagen,“ <https://www.bbr-server.de>, [Online]. Available: <https://www.bbr-server.de/bauarchivddr/archiv/plarchiv/04626-2090/akten-und-mappen-pdf/04626-2090-richtlinie-r-38-87.pdf>. [Zugriff am 09 09 2019].
- [23] R. Wagner, „Chemische und biologische Prozesse in Aquifer-Wärmespeichern,“ in *Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft*, Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, 1988, pp. Band 101. ISBN 3-486-26280-7.
- [24] T.-H. Merkel, „Untersuchungen zu den chemischen Reaktionen bei der Flächenkorrosion des Kupfers in Trinkwasserinstallationen,“ Dissertation, Universität Karlsruhe, 2002.
- [25] J. Dartmann, T. Alex, T. Dorsch, E. Schevalje und K. Johannsen, „Influence of Decarbonisation and Phosphate Dosage on Copper Corrosion in Drinking Water Systems. Acta hydrochim. hydrobiol.,“ Bd. 32, Nr. 1, pp. 25-32, 2004.
- [26] O. Opel, „Detektion von Verockerungsprozessen, Korrosion und Belagbildung - Monitoring der Eisenoxidation in Brunnen, Gebäuden, Leitungen und technischen Anlagen mithilfe des Redoxpotentials,“ Dissertation, Leuphana Universität Lüneburg, SVH Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften, ISBN: 978-3-8381-3472-7, 2013.
- [27] T. Eggerichs, S. Jerofke, T. Otte, O. Opel und W. Ruck, „Iron Oxidizing Bacteria - Influence of Calcium and Magnesium on Growth Rates,“ 22nd V.M. Goldschmidt Conference, Montreal, Canada, 2012.
- [28] W. A. Hamilton, „Sulfate-reducing bacteria and anaerobic corrosion,“ *Annual Review of Microbiology*, Nr. Jg. 39, pp. 195-217, 1985.
- [29] C. O. Moses, D. K. Nordstrom, J. S. Herman und A. L. Mills, „Aqueous pyrite oxidation by dissolved oxygen and by ferric iron,“ *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Bd. H. 6, Nr. Jg. 51, p. S. 1561–1571, 1987.
- [30] H. Fang, D. Young und S. Nešić, „Corrosion of Mild Steel in the presence of elemental Sulfur Corrosion,“ NACE international, 2008.
- [31] O. Opel, T. Eggerichs, N. Eler und W. Ruck, „Zusammenhänge und Kinetik biotischer und abiotischer Eisenoxidation bei der Brunnenverockerung und Ansätze zur Modellierung,“ *Wasser*, Bd. Tagungsband der Jahrestagung der wasserchemischen Gesellschaft, 18.-20. Mai 2009 in Stralsund, ISBN 978-3-936028-56-0, Berlin 2009.
- [32] T. Eggerichs, O. Opel, T. Otte und W. K. L. Ruck, „Leptothrix discophora: How bacterial MnO₂ oxidises iron. Iron Biogeochemistry - From Molecular Processes to Global Cycles, March 3-8,“ At Monte Verità, Ascona, Switzerland, 2013.
- [33] „Ausfuhrkontrolle, Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, URL: https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Heizungsoptimierung/heizungsoptimierung_node.html,“



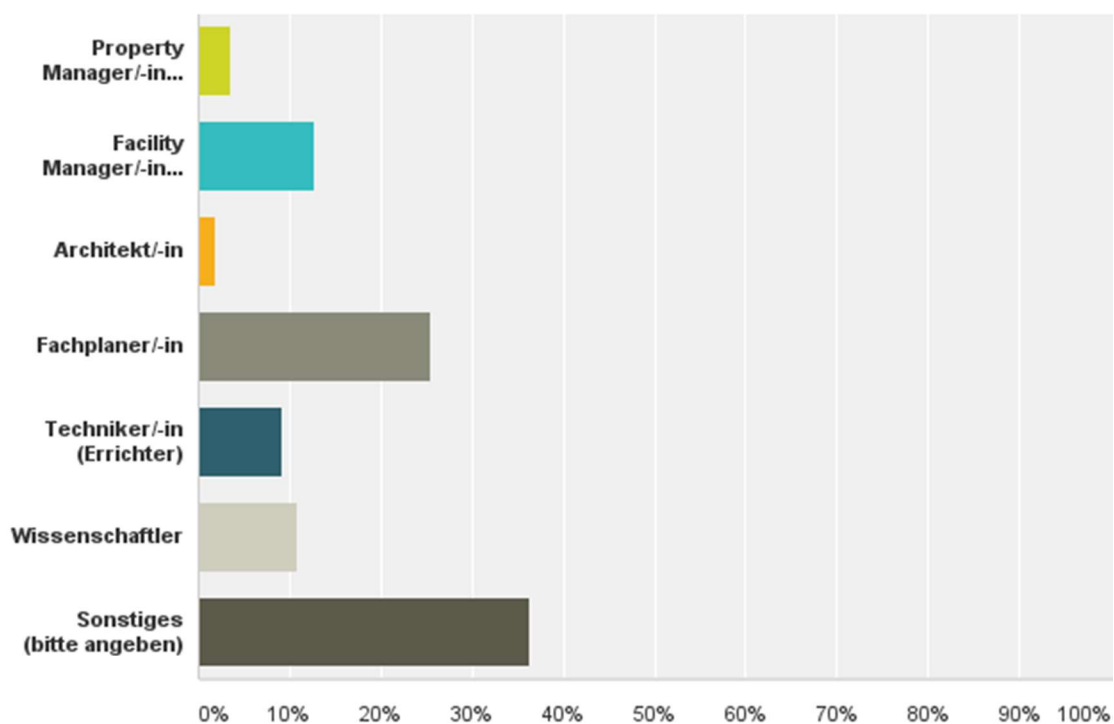
<https://www.bafa.de>, 2016.

- [34] T. Eggerichs, O. Opel, T. Otte und W. K. L. Ruck, „Interdependencies and Balance between Biotic and Abiotic Ferrous Iron Oxidation - Influence of pH, Oxygen and Ferric Hydroxide Deposits.“, *Geomicrobiology (Accepted)*, 2014.
- [35] O. Opel, T. Otte und W. Ruck, „Hydraulik auf dem Prüfstand. 3. EnBOP-Forum Qualitätssicherung für nachhaltige Gebäude.“, 28.03.2012, Hamburg, 2012.
- [36] O. Opel, J. Novio Liñares und W. Ruck, „Saisonale Wärmespeicherung im Aquifer – Ergebnisse aus dem geochemischen Monitoring der Aquiferwärme- und Kältespeicher am deutschen Reichstagskomplex in Berlin“, *GTV: Der Geothermiekongress 2007, Energie für alle Fälle*, Bde. %1 von %2Tagungsband. 29.-31, Poster. ISBN 3-932570-58-8, 2007.
- [37] O. Opel und J. Novio Liñares, „Berechnung von Eisengehalten und Verockerungspotential von Schluckbrunnen mithilfe von Temperatur-, Redoxpotential-, pH-Wert-, Leitfähigkeits- und Sauerstoffsättigungsdaten“, *GTV: Der Geothermiekongress 2007, Energie für alle Fälle*, Bde. %1 von %2Tagungsband. 29.-31, Poster. ISBN 3-932570-58-8, 2007.
- [38] O. Opel, J. Novio Liñares, T. Eggerichs und W. Ruck, „Zusammenhänge zwischen gemessenen und aus Fe²⁺-Konzentrationen errechneten Redoxpotentialen in den Fluiden der thermischen Aquiferenergiespeicher im Energiesystem der Parlamentsbauten am Spreebogen in Berlin“, *Vom Wasser*, Bde. %1 von %2106, ISSN 0038-6915, Nr. 4, pp. 14-21, 2008.
- [39] O. Opel, T. Eggerichs, T. Otte und W. K. L. Ruck, „Monitoring of microbially mediated corrosion and scaling processes using redox potential measurements“, *Bioelectrochemistry*, Bd. 97, pp. 137-144, 2014.
- [40] V. D. Ingenieure, „VDI 2032 Blatt 2“, Düsseldorf, 2006.
- [41] M. Turner, Influence of Water Composition on the Dezincification, *Proc. Soc. Water Treatment & Examination*, 1961.
- [42] S. Eltron, *Berechnungssoftware für Wärmepumpen IMT V1.12*, Holzminde.
- [43] S.-. u. R. Bundesinstitut für Bau-, „Bauarchiv DDR“, [Online]. Available: <https://www.bbr-server.de/bauarchivddr/> .
- [44] „VDI-Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung, VDI 2035 Blatt 2, Vermeidung von Schäden in Warmwasser-Heizungsanlagen - Wasserseitige Korrosion“, VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik , 2009-08.

3. Anhang

3.1 Fragen und Ergebnisse der Online Umfrage

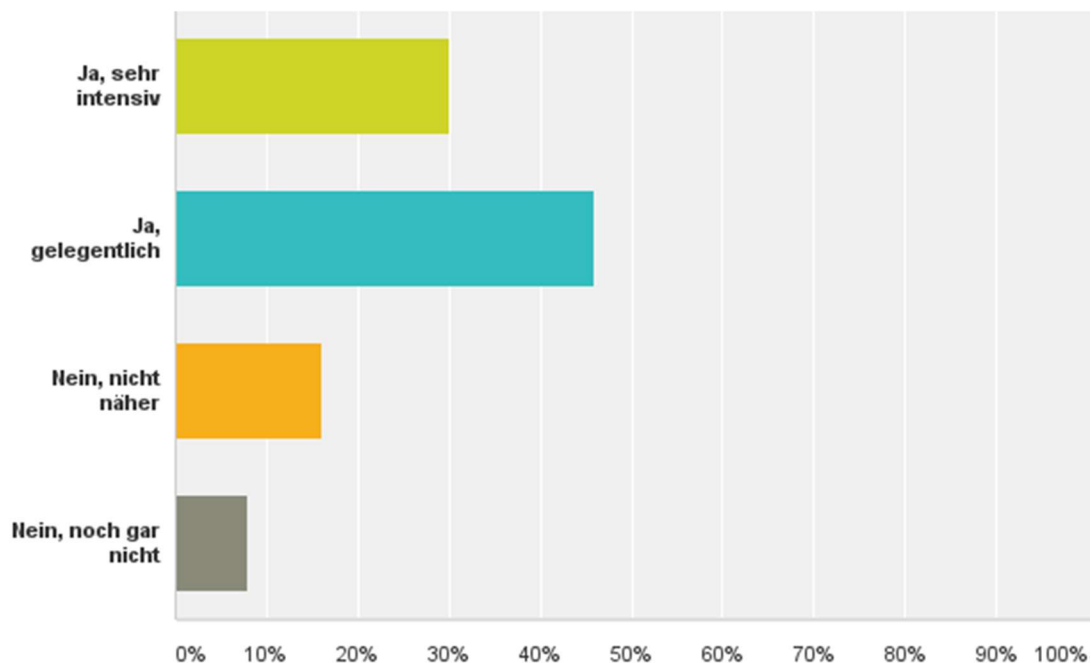
Ihre Rolle: Ich betreue Gebäude als...



Antwortoptionen	Beantwortungen	
Property Manager/-in (strategische Tätigkeit kaufmännisch, juristisch etc.)	3,64%	2
Facility Manager/-in (operativ-technische Tätigkeit)	12,73%	7
Architekt/-in	1,82%	1
Fachplaner/-in	25,45%	14
Techniker/-in (Errichter)	9,09%	5
Wissenschaftler	10,91%	6
Sonstiges (bitte angeben)	36,36%	20
Gesamt		55

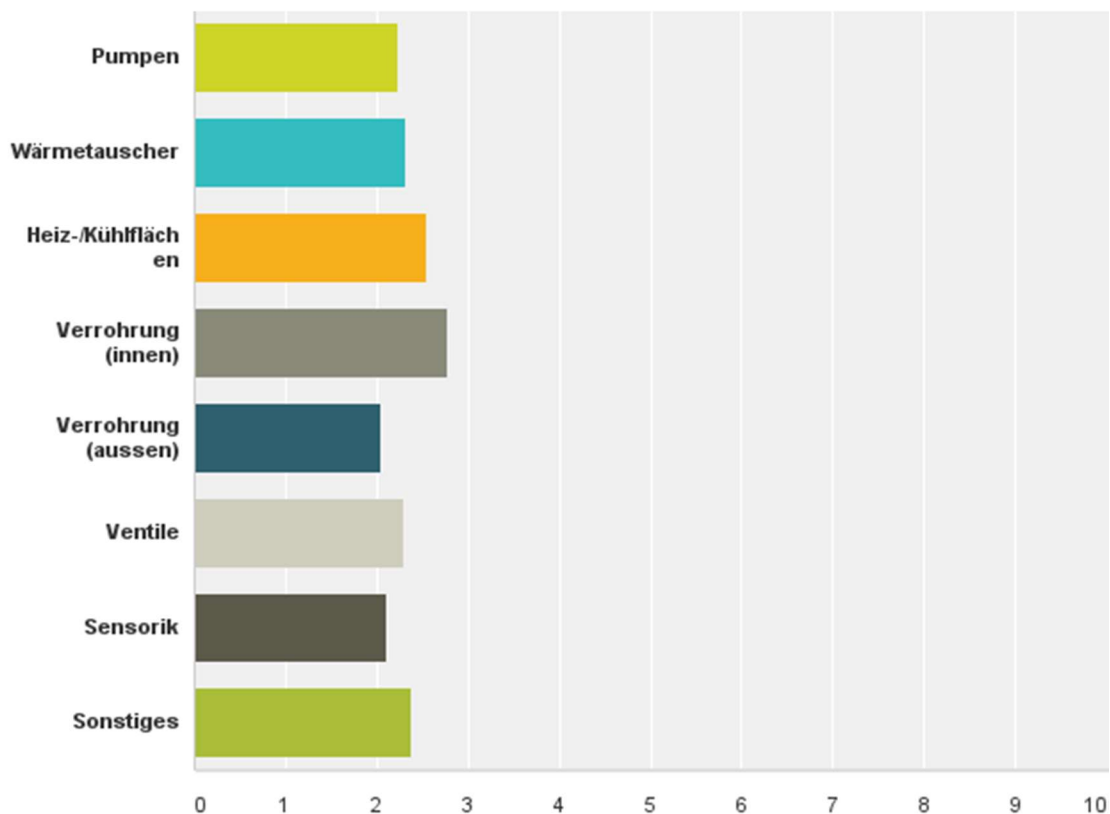


Erfahrung mit Korrosion Haben Sie sich bereits mit Korrosion im Zusammenhang mit hydraulischen Systemen beschäftigt?



Antwortoptionen	Beantwortungen
Ja, sehr intensiv	30,00% 15
Ja, gelegentlich	46,00% 23
Nein, nicht näher	16,00% 8
Nein, noch gar nicht	8,00% 4
Gesamt	50

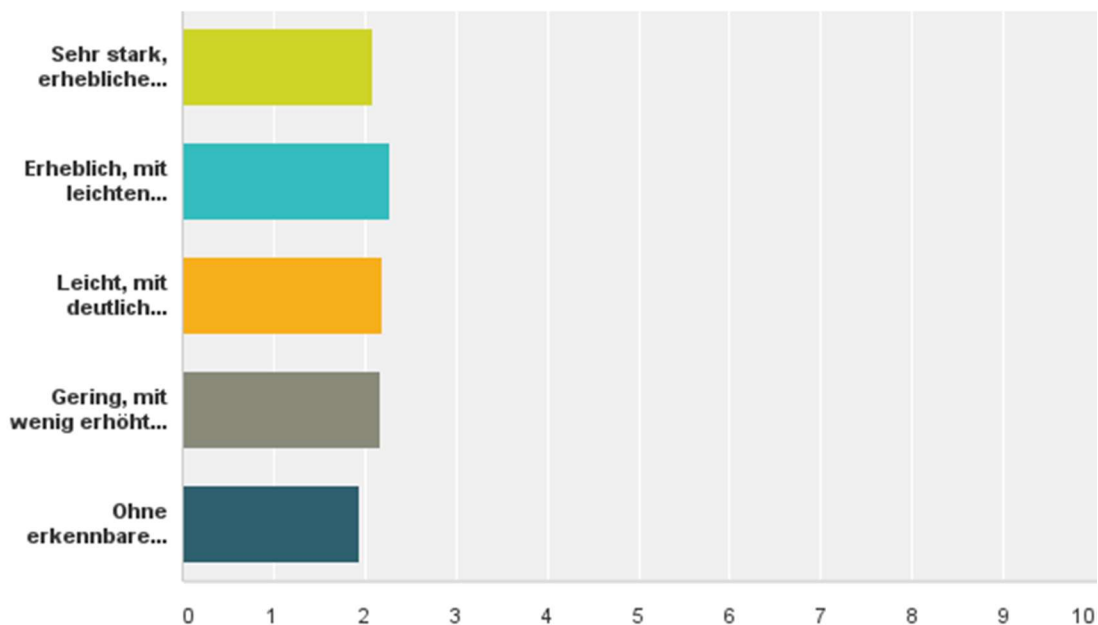
Detektierte Schäden: Welche Bauteile waren/sind in Ihren Gebäuden besonders anfällig für Korrosion?



	1 - gar nicht	2	3	4 - sehr häufig	Gesamt	Gewichteter Mittelwert
Pumpen	23,08% 6	42,31% 11	23,08% 6	11,54% 3	26	2,23
Wärmetauscher	34,62% 9	19,23% 5	26,92% 7	19,23% 5	26	2,31
Heiz-/Kühlflächen	20,83% 5	33,33% 8	16,67% 4	29,17% 7	24	2,54
Verrohrung (innen)	12,50% 4	18,75% 6	46,88% 15	21,88% 7	32	2,78
Verrohrung (aussen)	31,58% 6	36,84% 7	26,32% 5	5,26% 1	19	2,05
Ventile	14,81% 4	44,44% 12	37,04% 10	3,70% 1	27	2,30
Sensorik	28,57% 6	42,86% 9	19,05% 4	9,52% 2	21	2,10
Sonstiges	50,00% 4	0,00% 0	12,50% 1	37,50% 3	8	2,38

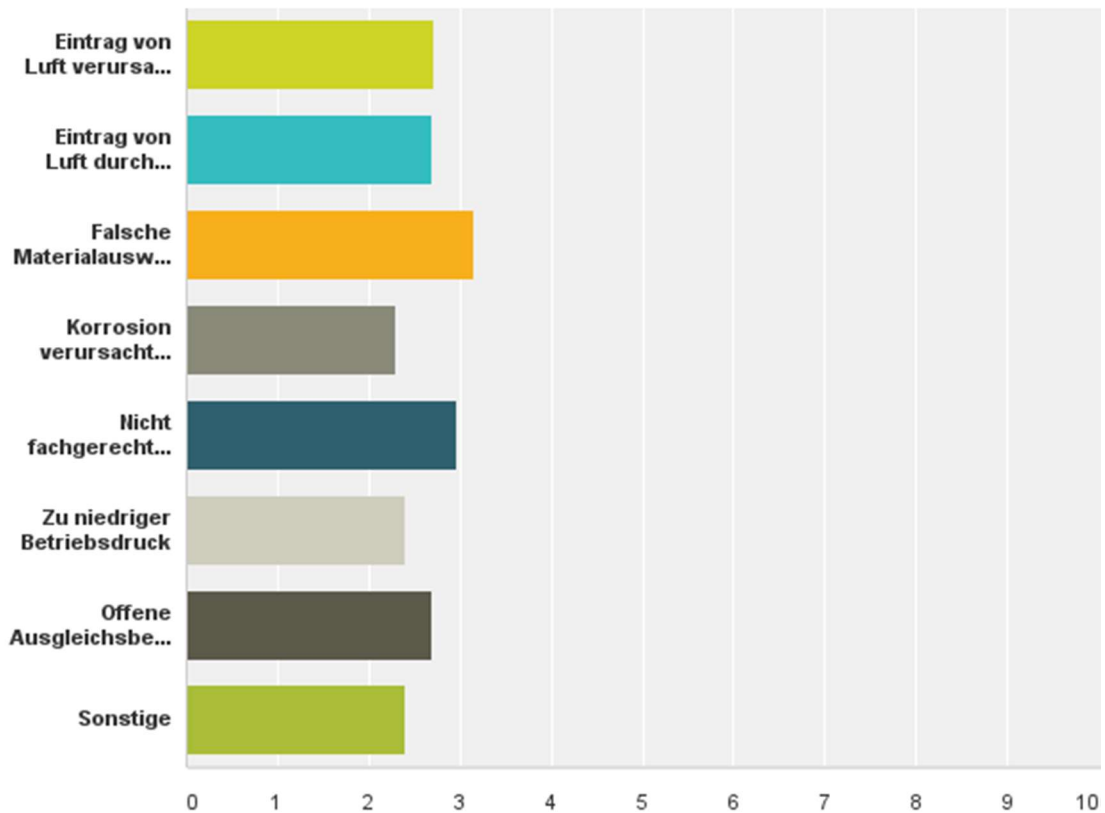


Schwere und Häufigkeit von Korrosionsschäden: Wie stark wirken sich Schäden durch Korrosion in Ihren Gebäuden aus?



	1 - gar nicht	2	3	4 - sehr häufig	Gesamt	Gewichteter Mittelwert
Sehr stark, erhebliche Nutzungseinschränkungen	36,36% 8	31,82% 7	18,18% 4	13,64% 3	22	2,09
Erheblich, mit leichten Nutzungseinschränkungen	28,00% 7	28,00% 7	32,00% 8	12,00% 3	25	2,28
Leicht, mit deutlich erhöhtem Instandhaltungsaufwand	28,57% 6	33,33% 7	28,57% 6	9,52% 2	21	2,19
Gering, mit wenig erhöhtem Instandhaltungsaufwand	29,41% 5	35,29% 6	23,53% 4	11,76% 2	17	2,18
Ohne erkennbare Schäden	44,44% 8	27,78% 5	16,67% 3	11,11% 2	18	1,94

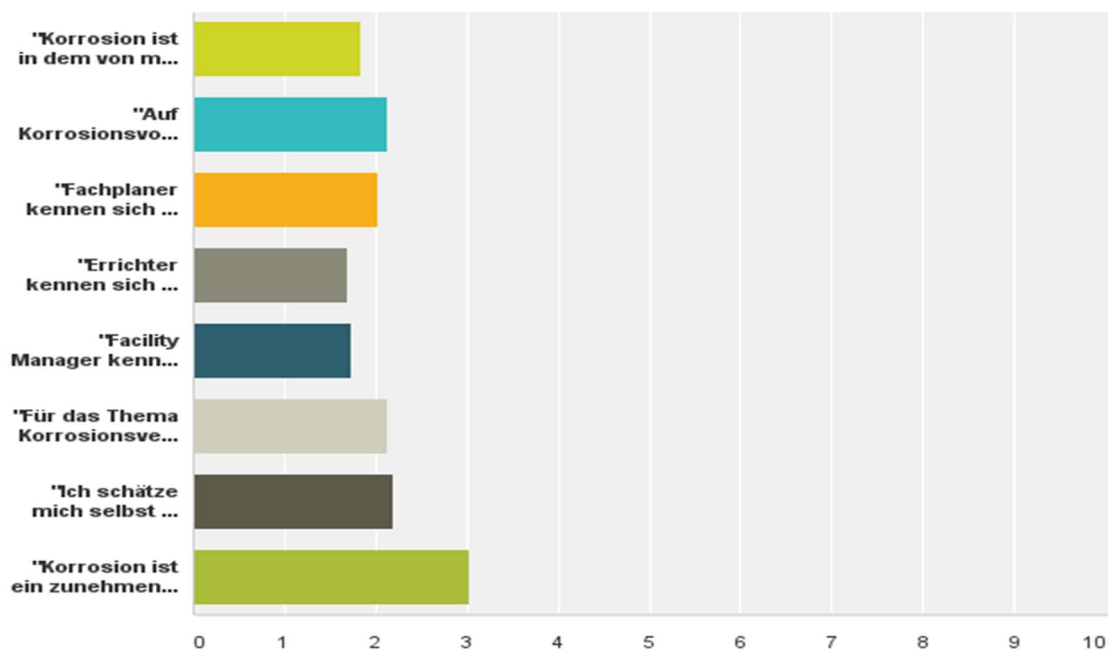
Risiken durch mögliche Korrosionsursachen: Wie groß bewerten Sie das Schadensrisiko durch folgende mögliche Ursachen für Korrosion?



	1 - kein Risiko	2	3	4 - hohes Risiko	Gesamt	Gewichteter Mittelwert
Eintrag von Luft verursacht durch Undichtigkeiten im System	10,71% 3	32,14% 9	32,14% 9	25,00% 7	28	2,71
Eintrag von Luft durch Diffusion verursacht durch Kunststoffbauteile	13,04% 3	30,43% 7	30,43% 7	26,09% 6	23	2,70
Falsche Materialauswahl / falscher Materialmix	4,00% 1	20,00% 5	32,00% 8	44,00% 11	25	3,16
Korrosion verursacht durch Mikroorganismen	15,00% 3	50,00% 10	25,00% 5	10,00% 2	20	2,30
Nicht fachgerecht durchgeführte Systembefüllung	11,54% 3	19,23% 5	30,77% 8	38,46% 10	26	2,96
Zu niedriger Betriebsdruck	9,09% 2	54,55% 12	22,73% 5	13,64% 3	22	2,41
Offene Ausgleichsbehälter	25,00% 5	20,00% 4	15,00% 3	40,00% 8	20	2,70
Sonstige	50,00% 5	0,00% 0	10,00% 1	40,00% 4	10	2,40

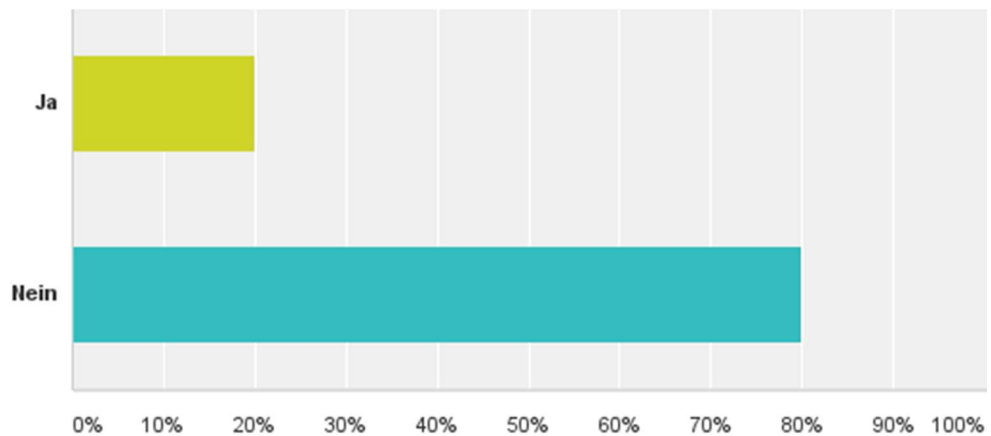


Aussagen: Bitte geben Sie an, inwieweit Sie folgenden Aussagen zustimmen.



	1 - stimme gar nicht zu	2	3	4 - stimme voll zu	Gesamt	Gewichteter Mittelwert
"Korrosion ist in dem von mir betreuten Gebäudebestand kein Problem."	43,75% 14	31,25% 10	21,88% 7	3,13% 1	32	1,84
"Auf Korrosionsvorbeugung wird im Allgemeinen in Projekten ausreichend geachtet."	31,25% 10	34,38% 11	25,00% 8	9,38% 3	32	2,13
"Fachplaner kennen sich mit Korrosionsvermeidung in der Regel gut aus."	25,00% 8	50,00% 16	21,88% 7	3,13% 1	32	2,03
"Errichter kennen sich mit Korrosionsvermeidung in der Regel gut aus."	40,63% 13	50,00% 16	9,38% 3	0,00% 0	32	1,69
"Facility Manager kennen sich mit Korrosionsvermeidung in der Regel gut aus."	43,33% 13	40,00% 12	16,67% 5	0,00% 0	30	1,73
"Für das Thema Korrosionsvermeidung bzw. Schadensbehebung kenne ich Spezialisten, die mich sehr kompetent beraten."	34,38% 11	34,38% 11	15,63% 5	15,63% 5	32	2,13
"Ich schätze mich selbst als sehr kompetent im Thema Korrosionsvermeidung ein."	28,13% 9	31,25% 10	34,38% 11	6,25% 2	32	2,19
"Korrosion ist ein zunehmendes Risiko für die Funktion und die Betriebskosten von Gebäuden."	12,12% 4	12,12% 4	36,36% 12	39,39% 13	33	3,03

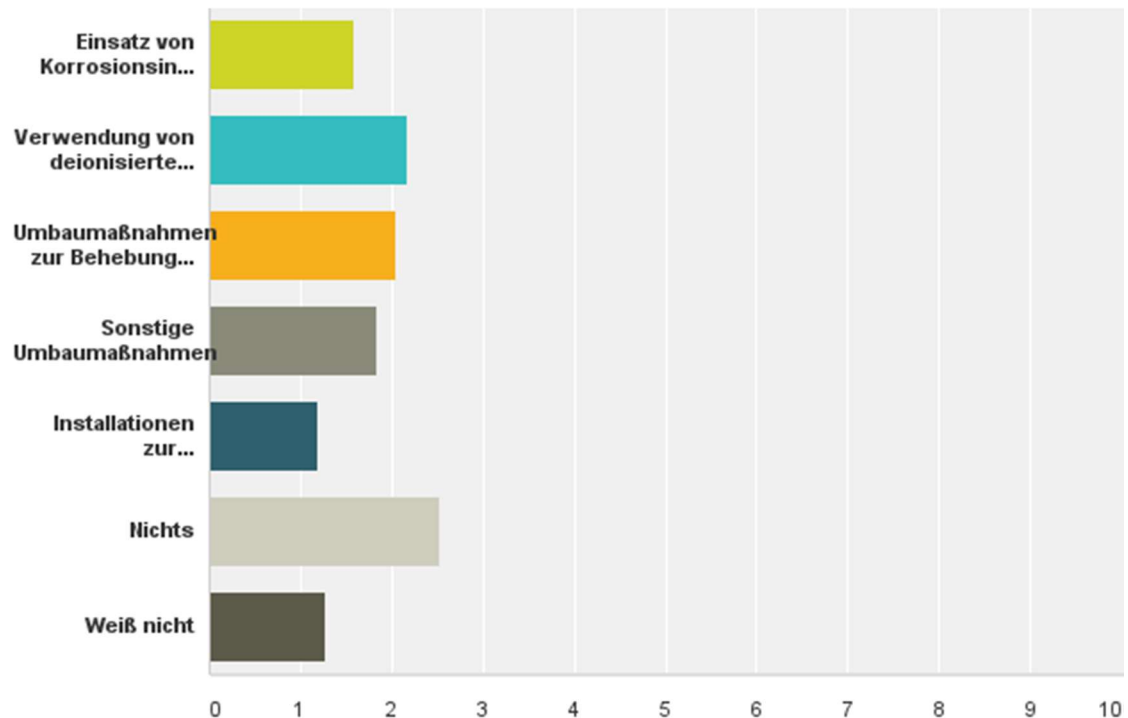
Schadensmanagement / Vorgehen zur Korrosionsvermeidung: Gibt es bei Ihnen ein zentrales Schadensmanagement zur Erfassung von u.a. durch Korrosion hervorgerufene Schäden?



Antwortoptionen	Beantwortungen	
Ja	20,00%	6
Nein	80,00%	24
Gesamt		30

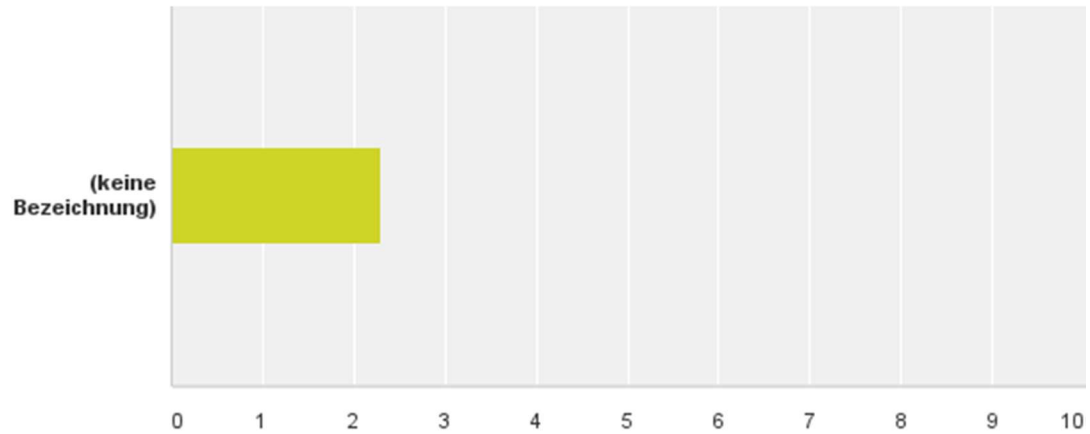


Korrosionsvermeidung: Wie häufig haben Sie folgende Maßnahmen zur Korrosionsvermeidung in von Ihnen betreuten Gebäuden bereits eingesetzt?



	1 - gar nicht	2	3	4 - sehr häufig	Gesamt	Gewichteter Mittelwert
Einsatz von Korrosionsinhibitoren	62,96% 17	18,52% 5	14,81% 4	3,70% 1	27	1,59
Verwendung von deionisiertem Wasser (VE-Wasser)	46,43% 13	10,71% 3	21,43% 6	21,43% 6	28	2,18
Umbaumaßnahmen zur Behebung von Undichtigkeiten (Wasseraus- oder Lufteintritt)	36,00% 9	32,00% 8	24,00% 6	8,00% 2	25	2,04
Sonstige Umbaumaßnahmen	43,48% 10	34,78% 8	17,39% 4	4,35% 1	23	1,83
Installationen zur Korrosionsüberwachung (z.B.: Korrosionscoupons, Online-Messsensorik)	92,31% 24	0,00% 0	3,85% 1	3,85% 1	26	1,19
Nichts	40,00% 6	6,67% 1	13,33% 2	40,00% 6	15	2,53
Weiß nicht	90,91% 10	0,00% 0	0,00% 0	9,09% 1	11	1,27

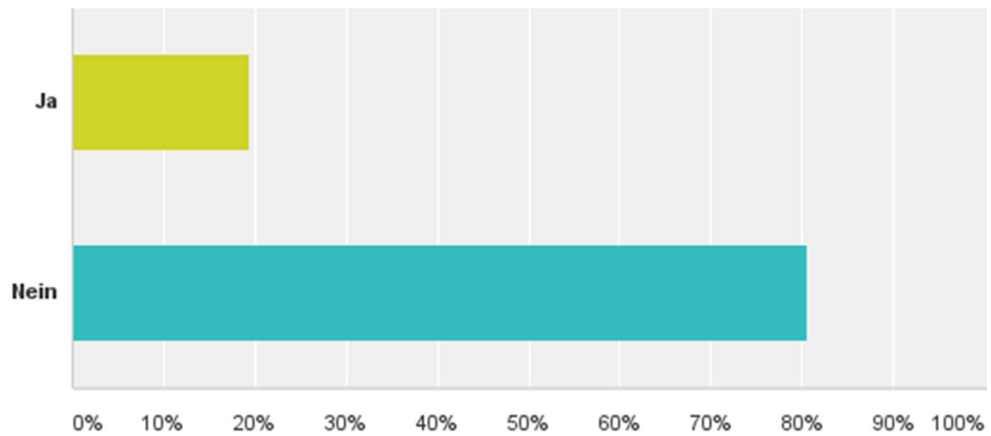
Anlagenbefüllung: Wird auf eine Anlagenbefüllung, auch bei Nachspeisung, gemäß VDI 2035 geachtet?



	1 - gar nicht	2	3	4 - immer	nicht bekannt	Gesamt	Gewichteter Mittelwert
(keine Bezeichnung)	8,82% 3	23,53% 8	26,47% 9	23,53% 8	17,65% 6	34	2,29



Unterlagen zu Arbeitsanweisungen für Korrosionsvermeidung: Gibt es detaillierte Arbeitsanweisungen für Wartungspersonal?



Antwortoptionen	Beantwortungen
Ja	19,35% 6
Nein	80,65% 25
Gesamt	31

3.2 Ergebnisse Phase I

3.2.1 Analyseergebnisse Phase I

Tabelle 31 Übersicht aller Analyseergebnisse aus Phase I, Werte in mg/L, Mn, Ni, Cr in µg/L

Probe	Fe(ges)	Fe(II)	Cu	Zn	Al	Mn	Ni	Cr	Na	K	Mg	Ca	Mo	P	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NPOC	pH	Eh(mV)	O ₂ [µg/L]	Cond [µS/cm]	Temp °C
1.1_K	5,80	2,79	1,64	0,21	0,01	324,70	6,51	4,10	47,80	4,32	8,94	27,98	n.b.	0,00	70,01	46,03	0,24	10,4	8,3	-424,40	14,00	690,4	23,0
1.2_H	57,71	1,24	0,87	2,67	0,17	674,30	45,72	49,73	46,50	4,11	9,27	33,34	n.b.	0,00	69,91	46,02	0,21	14,8	7,9	-258,26	331,00	651,0	18,8
16.1_H	0,02	0,00	0,21	0,00	0,00	4,01	3,05	0,00	51,65	4,56	4,99	2,42	0,00	0,01	80,30	0,50	0,60	16,4	9,4	-210,11	18,86	606,2	34,6
16.2_K	0,11	0,00	0,05	0,00	0,00	6,97	3,16	0,00	53,83	4,24	4,83	2,37	0,00	0,00	116,40	0,60	0,50	15,0	9,6	-250,15	27,40	477,4	22,8
16.3_H	57,22	0,00	10,87	0,00	0,00	1796,00	101,10	47,96	52,49	4,51	6,62	3,64	0,00	0,00	81,80	0,50	0,50	9,5	9,0	n.b.	n.b.	435,0	n.b.
16.4_K	1,90	0,00	0,21	0,00	0,02	42,93	6,50	1,03	51,52	8,88	5,93	4,58	0,00	0,01	84,00	0,60	0,50	5,9	9,6	n.b.	n.b.	457,0	n.b.
16.5_K	0,88	0,00	0,10	0,00	0,03	40,76	2,06	10,54	50,42	4,11	6,90	3,17	0,00	0,00	85,20	0,40	0,50	5,6	9,6	n.b.	n.b.	430,0	n.b.
16.6_H	n.b.	0,01	0,00	0,00	0,02	3,06	6,56	0,00	n.b.	4,75	7,11	3,82	n.b.	0,01	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
16.7_K	0,13	0,01	0,01	0,27	0,02	0,00	n.b.	n.b.	54,37	4,80	6,38	3,08	0,00	0,01	82,30	0,50	0,50	18,98	9,73	n.b.	n.b.	434,00	n.b.
16.8_H	0,04	0,00	0,03	0,00	0,02	6,00	0,90	0,00	56,28	4,62	6,28	2,57	0,00	0,00	82,60	0,50	0,50	16,9	9,6	n.b.	n.b.	429,0	n.b.
16.9_K	2,80	0,02	0,18	1,74	0,04	26,09	6,07	3,57	56,90	3,17	4,55	2,81	0,00	0,00	85,30	0,50	0,60	28,9	9,6	n.b.	n.b.	462,0	n.b.
3.1_H	0,05	0,00	0,00	0,04	0,00	14,90	1,90	2,14	11,50	0,90	4,10	4,61	0,10	0,04	11,77	0,50	0,20	4,8	8,5	-65,97	18,00	370,0	63,9
3.10_K	0,09	0,06	0,00	0,00	0,34	9,55	1,14	1,32	45,00	42,40	4,87	2,14	28,80	6,84	29,15	0,21	1,32	1,6	9,6	-382,31	35,00	440,0	8,4
3.2_K	1,25	0,00	0,26	0,05	0,04	26,89	4,47	1,06	68,80	2,02	3,20	5,85	4,20	0,39	19,22	1,79	0,27	3,1	8,9	70,09	28,00	397,3	11,1
3.3_H	0,09	0,00	0,02	0,00	0,00	16,44	2,52	3,09	6,50	0,65	3,38	7,34	n.b.	0,00	7,98	0,19	0,19	2,5	8,4	-128,02	12,00	265,0	43,6
3.4_K	1,37	1,12	0,04	0,05	0,00	111,60	1,75	0,94	45,50	2,10	3,56	11,67	0,00	0,00	18,07	0,00	0,21	3,5	8,3	-360,53	23,00	326,6	10,5
3.5_H	0,07	0,01	0,04	0,00	0,09	83,68	1,14	1,56	19,70	0,74	3,67	5,11	0,00	0,02	1,53	0,19	0,18	3,6	8,5	-320,22	1,00	315,4	38,1
3.6_K	1,50	1,19	0,01	0,00	0,00	16,40	2,02	1,06	76,20	2,17	2,80	9,43	0,00	0,00	23,73	0,21	0,22	4,6	8,3	-364,50	26,00	436,2	10,0
3.7_H	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	16,73	3,19	1,55	42,50	2,66	3,80	2,73	0,50	0,08	29,14	1,09	0,20	9,8	8,8	-76,92	17,00	537,9	39,6
3.8_K	0,43	0,38	0,04	0,00	0,26	70,00	1,55	1,18	77,00	2,53	7,00	3,60	22,60	6,50	29,35	19,77	0,53	8,0	9,6	-448,38	27,00	485,0	11,1
3.9_H	19,49	19,34	0,02	0,00	0,00	182,70	8,03	48,51	49,60	172,30	4,75	13,70	10,30	5,60	26,45	0,41	2,23	566,0	8,4	-510,40	8,00	2399,0	53,0
5.1_H	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	3,79	2,15	2,65	9,00	1,90	1,38	6,23	0,00	0,05	19,39	0,86	0,70	3,2	8,7	-19,90	14,00	305,3	62,8
6.1_H	0,22	0,00	0,03	0,00	0,00	17,77	3,32	2,24	10,21	0,24	0,18	2,31	0,00	0,15	3,00	0,24	0,00	3,7	10,1	-77,98	26,73	187,1	57,8
6.2_K	4,99	0,04	0,12	0,03	0,02	73,82	22,99	8,77	12,68	2,40	6,38	62,54	0,00	0,00	17,80	11,60	0,30	7,1	9,9	84,15	11530,00	430,4	9,5
6.3_K	2,19	1,89	0,00	0,00	0,00	175,90	1,14	1,23	8,18	1,68	5,28	22,30	0,00	0,13	17,75	11,60	0,28	6,9	8,0	-452,47	36,68	228,9	10,6
6.4_K	2,17	1,91	0,01	0,00	0,00	168,90	2,96	2,62	9,17	1,85	5,83	24,07	0,00	0,00	23,22	4,00	0,17	7,1	8,3	-450,79	42,60	211,1	8,4
6.5_H	0,23	0,00	0,04	0,01	0,04	14,64	5,15	1,26	9,47	0,15	0,23	2,58	0,00	0,00	0,79	0,23	0,00	4,9	9,9	-154,05	27,91	395,3	56,3
6.6_H	0,27	0,00	0,05	0,01	0,05	20,40	10,41	2,52	9,20	0,15	0,20	2,62	0,00	0,00	0,40	0,00	0,00	5,3	10,5	-122,02	282,00	158,1	48,2
6.7_K	2,20	0,41	0,02	0,00	0,00	42,20	0,41	0,03	8,63	1,82	5,84	24,25	0,00	0,00	23,95	3,79	0,17	7,5	7,8	-442,34	42,00	213,5	8,6
6.8_H	0,69	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	n.b.	0,00	8,69	0,16	0,16	2,15	0,00	0,00	2,90	0,00	0,14	4,9	8,8	-232,14	18,00	224,5	66,2
2.1_K	n.b.	n.b.	0,06	n.b.	0,02	330,00	10,70	1,62	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
7.1_H	0,10	0,00	0,05	0,13	0,02	3,46	3,05	0,84	52,60	0,67	0,07	0,65	0,00	0,00	26,80	6,28	0,00	8,6	10,4	-189,09	20,00	946,8	19,9
7.2_K	0,15	0,02	0,04	0,00	0,00	14,91	0,91	0,18	36,90	1,17	2,00	3,93	0,00	0,00	14,61	24,88	0,00	8,6	10,4	-363,07	42,00	252,0	9,0
7.3_H	0,07	0,00	0,04	0,00	0,00	13,59	0,85	0,29	30,30	1,93	6,70	8,10	0,00	0,05	21,90	2,80	0,97	122,6	9,3	-238,14	63,00	391,6	26,1
8.1_H	0,06	0,03	0,01	0,00	0,01	9,24	0,79	0,01	21,92	6,85	3,76	9,37	0,00	0,57	34,60	0,40	0,00	11,0	9,2	-128,03	40,27	468,1	41,6
9.1_H	195,40	193,51	0,10	0,00	0,00	6600,00	1,36	0,91	6,67	1,10	1,57	2,60	0,00	1,60	n.b.	n.b.	n.b.	41,9	6,3	-516,00	6,59	2342,1	63,7
9.2_H	0,27	0,02	0,05	0,00	0,01	7,62	1,85	0,38	5,77	4,75	1,52	6,29	0,00	0,02	23,00	0,03	0,00	6,7	9,8	-237,85	23,49	286,9	39,9
9.3_K	1,34	0,02	2,82	0,09	0,01	33,29	6,32	2,04	18,86	4,80	3,15	9,63	0,00	0,00	32,30	0,00	0,00	3,5	10,2	-342,32	35,67	263,0	14,5
9.4_K	224,11	220,23	3,02	0,10	0,00	5634,00	5,52	4,76	7,00	3,99	1,89	6,95	0,00	-48,23	n.b.	n.b.	n.b.	57,7	7,6	-438,57	34,88	964,3	10,6
10.1_K	2,15	1,92	0,03	0,00	0,04	95,49	1,34	0,83	15,60	1,86	3,78	19,20	0,00	0,00	29,52	17,22	0,00	39,4	8,6	-431,14	42,82	242,7	12,2
10.2_H	0,04	0,01	0,04	0,00	0,00	4,61	0,16	0,02	8,40	0,87	1,36	5,55	0,00	0,00	12,30	0,50	0,50	11,9	9,6	-380,31	33,00	121,2	21,0
4.1_H	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	n.b.	n.b.	7,80	0,72	1,44	14,84	n.b.	0,00	0,84	0,00	0,00	11,5	9,1	-91,98	17,00	202,0	48,3
4.2_K	0,30	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	n.b.	n.b.	18,00	1,55	4,87	14,84	n.b.	0,00	12,25	0,44	0,00	14,1	9,3	-494,35	22,00	282,5	18,8
11.1_HK	1,08	0,96	2,07	0,04	2,30	20,74	3,38	2,13	154,32	11,38	9,00	100,87	158,61	9,84	n.b.	n.b.	n.b.	1389,0	7,3	-138,00	30,88	3286,2	37,2
11.2_K	0,04	0,03	0,02	0,00	0,04	21,94	0,37	0,25	12,26	2,52	2,73	6,28	0,02	0,00	21,30	0,00	0,00	5,1	9,3	-429,27	47,91	124,6	6,7
11.3_K	0,08	0,04	0,04	0,00	0,04	10,52	1,76	0,40	23,91	5,78	4,17	7,51	0,00	0,00	50,90	0,00	0,00	9,1	8,6	-386,28	23,72	492,5	41,1
12.1_H	131,60	122,78	0,25	0,14	1,12	1060,00	6,09	0,41	183,08	4,04	3,36	27,80	76,62	4,34	n.b.	n.b.	n.b.	2952,0	6,4	-273,99	23,20	2055,8	32,8
12.2_H	112,67	105,84	0,00	0,10	0,86	950,00	0,83	0,22	171,59	4,12	3,31	27,21	61,61	3,12	n.b.	n.b.	n.b.	2968,0	6,9	-332,20	16,00	2168,9	37,8
12.3_K	1,38	0,89	0,01	0,00	2,79	68,98	0,33	0,08	158,73	6,19	4,50	20,74	192,59	10,50	n.b.	n.b.	n.b.	130,3	8,9	-422,34	34,82	1068,2	15,7
12.4_HK	172,17	159,39	0,27	2,59	0,15	840,00	1047,00	14,21	112,65	3,67	1,92	13,70	8,90	0,40	n.b.	n.b.	n.b.	1251,0	5,5	-55,96	56,72	1440,7	29,5
12.5_HK	1,54	0,01	2,22	1,52	0,24	630,00	914,30	0,43	70,99	16,62	15,03	40,38	16,25	1,21	n.b.	n.b.	n.b.	110,4	7,4	80,17	5462,61	1120,3	34,2
12.6_HK	1,17	0,03	0,68	0,22	0,23	59,22	243,20	3,35	69,80	11,97	9,89	48,09	14,56	0,79	n.b.	n.b.	n.b.	9,4	8,2	64,16	6559,06	1175,8	34,9
12.7_HK	30,24	27,17	0,03	0,00	3,31	425,80	0,87	0,91	324,63	3,77	2,48	29,79	246,13	15,58	n.b.	n.b.	n.b.	12410,0	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
12.8_HK	0,05	0,00	0,75	0,20	0,24	83,67	328,70	0,00	41,83	9,70	12,56	56,88	14,54	0,83	n.b.	n.b.	n.b.	68,3	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
13.1_K	0,22	0,07	0,00	0,00</																			



3.2.2 Beispiel Objektbericht Objekt 7

Zusammenfassung

Für das Gebäude [REDACTED] wurde am 24.02.2016 eine Korrosionssprüfung der hydraulischen Systeme der Wärmeversorgung und der Kälteversorgung durchgeführt. In diesem Bericht wird die Heizung HT behandelt.



Bewertung

Im fänden die mit der Erstbefüllung üblichen Korrosionsprozesse statt, die vollständig zum Erliegen gekommen sind. Es befinden sich noch geringe Mengen partikuläres Eisen im Umlaufwasser

Einzelergebnisse

Es wurden folgende Einzelergebnisse ermittelt:

	Bewertung	Bemerkung
Sensorwerte	ok	
Gelöste Metalle	ok	
Partikuläre Metalle	ok	
Salze u. Nährstoffe	grenzwertig	Chloridgehalt leicht erhöht
Härtebildner	ok	



Handlungsempfehlungen

Wir empfehlen:

- Regelmäßige Wiederholung dieser Untersuchung
(Detaillierte Bewertung folgt)

Gebäudedaten

Basisdaten

Objektbezeichnung	 07
Nutzungstyp	Büro- / Verwaltungsgebäude
Fläche	n.b.
Objektanschrift	 37 Holzminden

TGA Heizung

Wärmeversorgung	Sole-Wärmepumpen
Nennleistung	
Übergabesysteme	Flächenheizsysteme, RLT
Filter im Umlaufwasser	n.b.
Druckhaltung	Membran-Ausdehnungsgefäße
Nachspeisung	Ja
Temperaturbereich	

**TGA Kühlung**

Kälteversorgung	Kältemaschinen
Nennleistung	
Übergabesysteme	Flächenkühlsysteme, RLT
Filter im Umlaufwasser	n.b.
Druckhaltung	Membran Ausdehnungsgefäße
Nachspeisung	Ja
Temperaturbereich	

Untersuchter Kreis

Anzahl hydraulisch unabhängiger Kreise	3
Kreis #1	Heizung HT
Kreis #2	Betriebswasser/Kühlung
Kreis #3	Fußbodenheizung

Kreis #1 (Heizkreis) vorangegangene Maßnahmen

Zeitpunkt	Maßnahme	Wasserbehandlung
2015	Spülung vor Inbetriebnahme, Pulsierend mit Wasser und Luft	n.b.

Wasseranalyse

Den Hauptbestandteil dieser Untersuchung bildete die Messung korrosionsrelevanter Vor-Ort-Parameter sowie die Entnahme und Analyse des Umlaufwassers. Aus den chemischen Parametern lassen sich Rückschlüsse auf Korrosionsvorgänge in den Heiz- und Kühlsystemen ableiten.

Probenahme und Erfassung der Vor-Ort-Parameter

Im Rahmen der Prüfung wurden folgende Probeentnahmen durchgeführt:

	Zeitpunkt	Kreis	Bemerkung
Probennahme 1	24.02.2016	Kreis #1 Heizkreis	
Probennahme 2	24.02.2016	Kreis #2 Kühlkreis	
Probennahme 3	24.02.2016	Kreis # 3 Fußbodenheizung	

Die Umwälzpumpen aller Kreisläufe waren nach Angabe des Betreibers mindestens 24h vor der Probenahme in Betrieb.

Mit einer mobilen Messeinheit (siehe FeQuan-Sensor) wurden die Parameter Sauerstoff, pH, Leitfähigkeit, Temperatur und Redox-Potential untersucht. Aus diesen Parametern wird der Systemzustand hinsichtlich seiner Korrosionsneigung bestimmt.

Es wurden je beprobter Kreis mehrere Proben zur Bestimmung der unten angegebenen Parameter entnommen. Bei Vorliegen großer Mengen partikulärer Korrosionsprodukte (Sichtprüfung) wird davon ebenfalls eine Probe entnommen. In Abhängigkeit vom Füllvolumen der Anlage wird entweder ein anderer, höher liegender Beprobungspunkt gewählt, oder das Anlagenwasser bis zur Erreichung einer optisch homogenen Probe abgelassen (Kriterien: Trübung, Färbung).

Je nach Untersuchungsprogramm oder zuvor festgelegten Problemstellungen werden ggf. weitere Proben entnommen, z.B. zur Bestimmung weiterer Parameter zur mikrobiellen Korrosion.



Im Einzelnen erfolgten folgende Analysen:

Analyse	Parameter	Analysenmethode
Sicht- und Geruchsprüfung	Trübung, Färbung	Vor-Ort-Beurteilung
Vor-Ort-Parameter	Gelöstsauerstoff, pH-Wert, Redoxpotential, Leitfähigkeit, Temperatur	Vor-Ort-Messung
Metall-Kationen (gelöst/partikulär)	Fe, Mn, Cu, Zn, Cr, Ni, Al	ICP-OES / ICP-MS
Mikrobielle Nährstoffe und Stoffwechselprodukte	S / P	ICP-OES / ICP-MS / Photometrie
Anionen	Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻	IC
Kohlenstoff	C org. (NPOC) / C an-org.	TOC-Analyzer
Mikrobielle Profilanalyse	Artenzusammensetzung	DNA-Analyse BlueBiolabs

Wasserchemische Analyse

Im Labor wurden anhand der entnommenen Proben die enthaltenen Korrosionsprodukte (Eisenminerale, Kupfer und Legierungsmetalle) mittels elementaranalytischer Methoden bestimmt. Es wurden gefilterte (0,2 µm-Spritzenfilter) und ungefilterte Proben untersucht, um gelöste und ungelöste Korrosionsprodukte und Wasserinhaltsstoffe zu unterscheiden. Zur Bestimmung des Risikos von Kalk-Ablagerungen wurde der Gehalt an Härtebildnern bestimmt. Neben den Härtebildnern können auch Anionen als Nährstoffe mikrobiell induzierte Korrosion fördern. Darüber hinaus wurde der Gehalt an anorganischem Kohlenstoff sowie organischer Kohlenstoff als nicht ausblasbarer Kohlenstoff (NPOC) bestimmt.

Hohe Konzentrationen der meisten der oben genannten Analyten erhöhen die Leitfähigkeit des Systemwassers, wodurch Korrosionsprozesse beschleunigt werden können.

Für eine mikrobiologische Profilanalyse in den untersuchten Systemen wurden zusätzlich 2 x 0,8 L Probe entnommen, stabilisiert und zur weiteren Untersuchung an ein mikrobiologisches Speziallabor übergeben. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden aufgrund der langen Analysezeiträume separat zur Verfügung gestellt.

FeQuan-Sensor

Der FeQuan-Sensor stellt eine kompakte Version der hier verwendeten mobilen Messeinheit dar. Aufgrund eines neu entwickelten Mess- und Auswerteverfahrens ist es möglich, mit diesem Sensor Korrosionsprozesse zu erkennen, bevor partikuläre Korrosionsprodukte ausfallen und Schäden verursachen. Der FeQuan-Sensor befindet sich in der Entwicklung. Im weiteren Verlauf des Forschungsprojektes ist der testweise Feldeinsatz geplant. Als Teil eines ganzheitlichen Energie- und Qualitätsmanagements ist zukünftig mit Hilfe des FeQuan-Sensors die automatisierte und kontinuierliche Überwachung des Umlaufwassers zur Schadensvermeidung absehbar.



Bewertungsgrundlage und Gewährleistung

Dieser Analysebericht entstand im Rahmen der Feldstudie des Forschungsprojektes EQM:Hydraulik. Teilweise kommen neuartige Analyseverfahren und Bewertungsmaßstäbe zum Einsatz, deren Entwicklung und Validierung Bestandteil dieses Forschungsprojektes sind. Sie stellen den aktuellen Stand des Wissens dar, können aber im Projektverlauf weitere Anpassungen erfahren.

Alle Aussagen stehen deshalb unter Forschungsvorbehalt und erfolgen ohne Gewähr. Leuphana und SIZ energie+ übernehmen keine Planer-, Errichter- oder Betreiberverantwortung für die betroffenen Gebäude.“

Ergebnisse

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Systemwasseranalyse aufgeführt.

Laborwerte

Fe part.+gel.	Eisen partikulär u. gelöst	mg/l	0.10 *
Fe gel.	Eisen gelöst	mg/l	0.00
Cu	Kupfer	mg/l	0.08
Zn	Zink	mg/l	0.13
Al	Aluminium	mg/l	0.00
Mn	Mangan	µg/l	0.00
Ni	Nickel	µg/l	n.b.
Cr	Chrom	µg/l	n.b.
Na	Natrium	mg/l	52.60
K	Kalium	mg/l	0.67
Mg	Magnesium	mg/l	0.07
Ca	Kalzium	mg/l	0.65
Mo	Molybdän	mg/l	0.00
P	Phosphor	mg/l	0.00
Cl ⁻	Chlorid	mg/l	26.80
SO ₄ ²⁻	Sulfat	mg/l	6.28
NO ₃ ⁻	Nitrat	mg/l	0.00
NPOC	Organischer Kohlenstoff	mg/l	8.55
IC	Anorganischer Kohlenstoff	mg/l	19.71
Zellzahl	Keimbelastung	l ⁻¹	n.b.
Vor-Ort-Werte			
pH	-	-	10.4
Redoxpotential (gemessen)	mV	-	-189.1
Sauerstoffgehalt	mg/l	-	0.02
Leitfähigkeit	µS/cm	-	946.8
Temperatur	°C	-	19.9

* 0,00: Wert liegt unterhalb der Nachweisgrenze; n.b. : nicht bestimmt

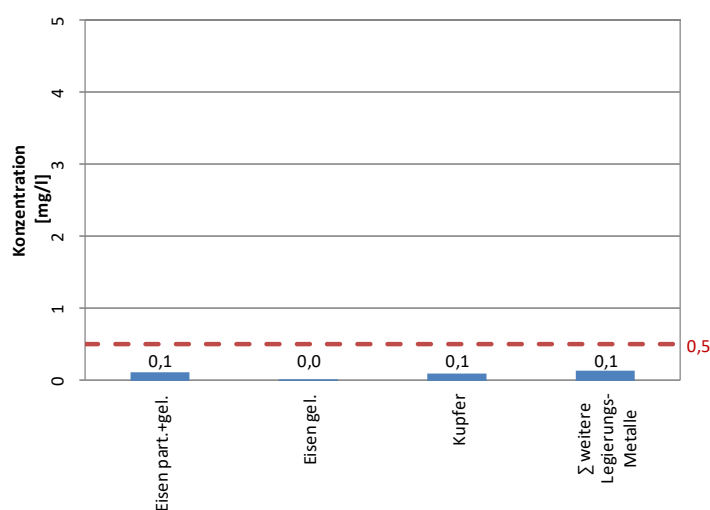


Bewertung

Die folgende Tabelle erläutert die Messergebnisse im Einzelnen einschließlich einer individuellen Bewertung und Handlungsempfehlungen.

Ergebnis	Bewertung und Handlungsempfehlung
----------	-----------------------------------

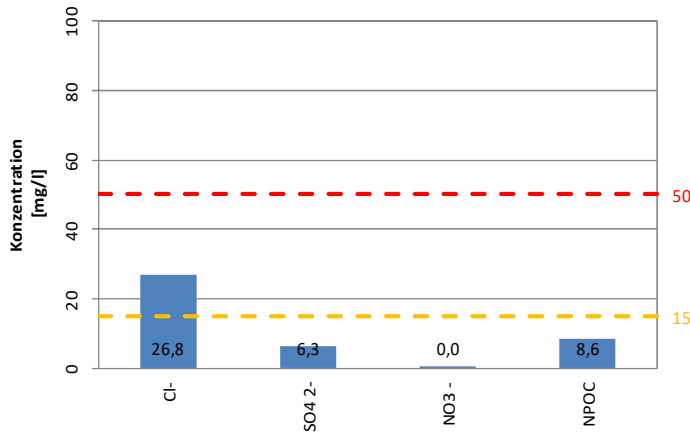
Metalle



Gelöste und partikulär vorkommende Eisenverbindungen, bzw. Kupfer im Systemwasser stellen die Haupt-Korrosionsprodukte dar. Sie sind daher indikativ für aktive Korrosionsprozesse. Gelöstes Eisen stellt die Vorstufe zu partikulären Bestandteilen da. Das Fehlen partikulärer Bestandteile bei einem hohen Anteil gelöster Bestandteile kann verschiedene Ursachen haben: entweder die partikulären Bestandteile werden wirksam gefiltert oder die Korrosionsprozesse sind infolge Sauerstoffmangel zum Erliegen gekommen. Metallgehalte (gelöst) bis zu 0,5 mg/l werden als unkritisch angesehen.

Bewertung: Es sind nur geringe Gehalte ungelöstes Eisen sowie Kupfer nachweisbar, die die Grenzwerte weit unterschreiten.

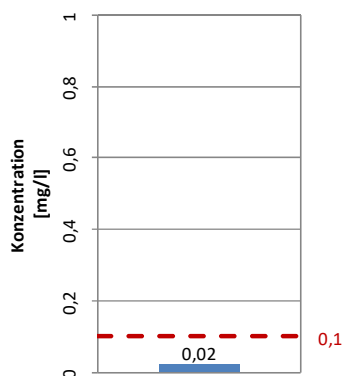
Salze



Chlorid, Sulfat und Nitrat fördern als Elektrolyten durch die Erhöhung der Leitfähigkeit die Korrosion. Zusätzlich tragen Nitrat und Sulfat als Nährsalze sowie organischer Kohlenstoff (NPOC) zu einem erhöhten Keim-Wachstum bei. Die Salze werden über das Füllwasser und ggf. über das Nachspeisewasser eingebracht. Organischer Kohlenstoff stammt aus zugesetzten Inhibitoren, geölten und nicht gereinigten Bauteilen oder Kunststoff-Dichtungen.

Bewertung: Der Chlorid-Gehalt überschreitet den unteren Grenzwert. Das Vorhandensein geringer Gehalte von Nitrat und Sulfat deutet darauf hin dass nicht ausschließlich VE-Wasser verwendet wurde.

Sauerstoffgehalt

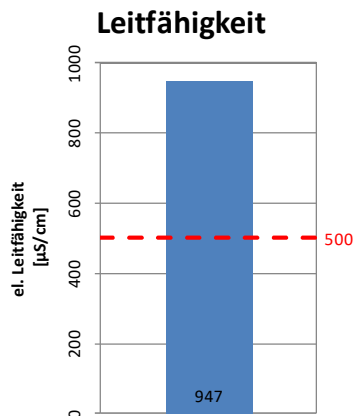


Das Vorhandensein von Sauerstoff ist Voraussetzung für die nicht-mikrobiell induzierte Korrosion von Eisen und Kupfer. Der Sauerstoffgehalt ist nach Neubefüllung hoch und sinkt in gasdichten Systemen mit der Betriebszeit, weil er durch Korrosionsprozesse aufgebraucht wird. Die Korrosionsprozesse kommen dann zum Erliegen. Aufgrund der Erfahrung nimmt die Korrosionsrate ab einem Sauerstoffgehalt von 0,1 mg/l stark zu. Ein hoher Sauerstoffgehalt bei einem nicht frisch befüllten, geschlossenen System weist auf



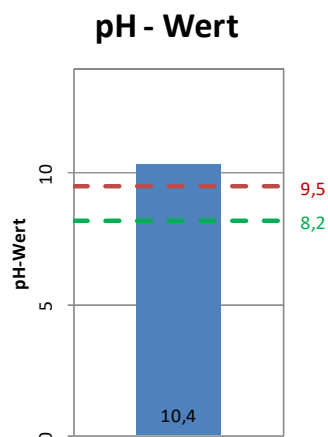
Gasdiffusion durch dünnwandige Kunststoffrohre, nicht ordnungsgemäße Druckhaltungssysteme oder offene Ausgleichsbehälter hin.

Bewertung: Der Sauerstoffgehalt liegt mit 0,02 mg/l weit unter dem Grenzwert und weist auf ein ausreichend gasdichtes System hin.



Die Leitfähigkeit gibt die elektrolytische Eigenschaft des Systemwassers an. Das Korrosionsrisiko steigt mit der Erhöhung der Leitfähigkeit. Entsalztes Wasser weist in der Praxis eine Leitfähigkeit von etwas über 100 µS/cm, Leitungswasser bis zu 1200 µS/cm und mehr auf. In einem Systemwasser ohne Zusatz von Korrosionsschutzmitteln wird eine Leitfähigkeit von < 500 µS/cm zur Vermeidung von Korrosion toleriert.

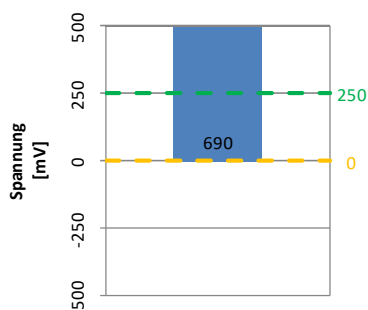
Bewertung: Die Leitfähigkeit von 947 µS/cm liegt über dem Grenzwert und erhöht das Korrosionsrisiko.



Der pH-Wert ist ein Hauptindikator für Korrosionsrisiken und sollte zwischen 8,2 und 9,5 liegen. Ist Aluminium im System vorhanden, darf der pH-Wert 8,5 nicht überschreiten.

Bewertung: Der pH-Wert von 10,4 liegt weit im alkalischen Bereich und weist eine Schutzfunktion vor Korrosionsprozessen auf. Allerdings überschreitet er sowohl den empfohlenen Grenzwert für Stahl-Bauteile. Der pH-Wert sollte möglichst innerhalb des empfohlenen Bereiches liegen.

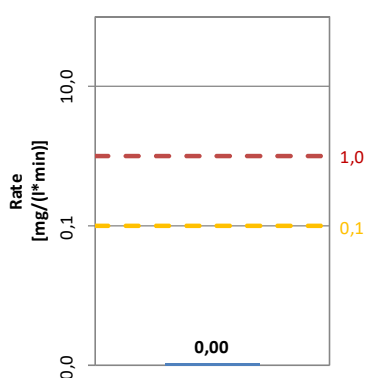
Redoxpotential normiert



Das sauerstoffkorrigierte, auf Standardwasserstoffelektrode und pH 7 bzw. den Neutralpunkt normierte Redoxpotential gibt in Systemen ohne Wasserbehandlung Aufschluss über den Systemzustand. Es zeigt an, ob sich Eisen(II) als primäres Korrosionsprodukt im System befindet, Sulfid als Produkt mikrobieller Aktivität vorliegt oder der Systemzustand insgesamt unkritisch ist. Ein Redoxpotential über 250 mV ist unkritisch, es liegen keine gelösten Korrosionsprodukte vor. Zwischen 0 mV und 250 mV liegt gelöstes Eisen(II) vor, ein Redoxpotential von unter 0 mV deutet auf sulfatreduzierende Bakterien hin.

Bewertung: Das normierte Redoxpotential von 690 mV weist auf einen guten Systemzustand hin und bestätigt, dass keine gelösten Korrosionsprodukte im Umlaufwasser vorhanden sind.

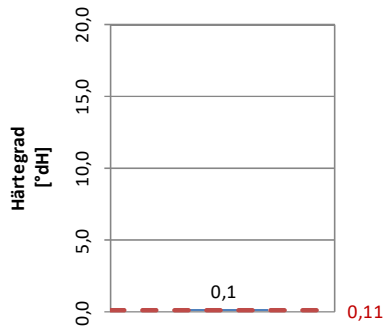
Korrosionsrate



Die Korrosionsrate gibt zum Zeitpunkt der Messung die je Zeiteinheit theoretisch gebildete Menge der sekundären Korrosionsprodukte an. Aus diesem Wert kann u.U. auf Grundlage weiterer anlagenspezifischer Parameter auch der absolute Gesamtertrag an sekundären Korrosionsprodukten und der Materialabtrag in mm/a berechnet werden. Bei der Korrosionsrate handelt es sich um einen neu entwickelten Indikatorwert, dessen Aussagekraft und Praxisbezug noch ermittelt werden muss.

Bewertung: Es sind keine aktiven Korrosionsprozesse nachweisbar.

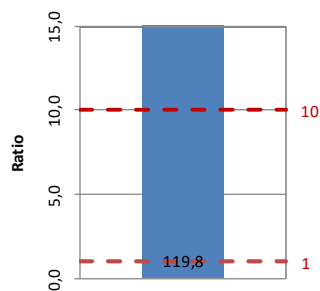
Gesamthärte



Härtebildner bergen die Gefahr der Verkalkung an heißen Bauteilen wie Wärmeübertragern oder Erhitzern. Ihr Grenzwert ist abhängig von dem Vorhandensein entsprechender Anlagenelemente und der Anlagengesamtleistung (gem. VDI 2035 Blatt 1)

Bewertung: Der Wert von 0,1 °dH unterschreitet den Grenzwert nach VDI 2035 Blatt 1 für Anlagen mit einer Leistung von mehr als 600 kW von 0,11 °dH.

Stoffmengenanteil $\text{Na}/(\text{Ca}+\text{Mg})$



Das Verhältnis der molaren Konzentrationen von Natrium zu Calcium und Magnesium gibt einen Hinweis auf die Vorbehandlung des Systemwassers. Bei einem Wert unter 1 ist das Wasser unaufbereitet oder voll-entsalzt, bei einem Wert über 10 ist es nur enthärtet.

Bewertung: Der Wert von 119,8 weist auf enthärtetes Wasser hin.



Schlussbemerkungen

Der Systemzustand ist gut. Korrosionsprozesse konnten nicht festgestellt werden. Der Grenzwert für Leitfähigkeit wurde überschritten, es wurden jedoch keine besonderen Auffälligkeiten festgestellt.

Nach der Erstbefüllung erfolgten leichte Korrosionsvorgänge, die vollständig zum Erliegen gekommen sind. Damit steigt üblicherweise der pH-Wert an; er liegt hier mit einem Wert von 10,4 in einem für Anlagen ohne Zink- und Aluminium-Bauteile Bereich, der eine gute Schutzfunktion vor Korrosionsprozessen bietet. Da im Systemwasser jedoch geringe Mengen Zink detektiert wurden, wird hier eine Einhaltung der empfohlenen pH-Grenzen empfohlen.

Der Chlorid-Gehalt ist relativ hoch und erhöht das Korrosionsrisiko. Das System sollte dauerhaft beobachtet oder diese Untersuchung nach ein bis zwei Jahren wiederholt werden.

Insgesamt befindet sich das Füllwassers des Systems zum Probenahmezeitpunkt in einem aus wasserchemischer Sicht guten Zustand.

3.3 Analysen Objekte Phase II/III

Es folgen die detaillierten Analyseergebnisse der Objekte aus Phase II/III.

3.3.1 Objekt 9

Mikrobiologische Analyse 1 vom 09.03.2016 (Heizsystem)

Im Folgenden sind die Anteile der Spezies auf der Basis Ihrer Stoffwechselfunktionen dargestellt.

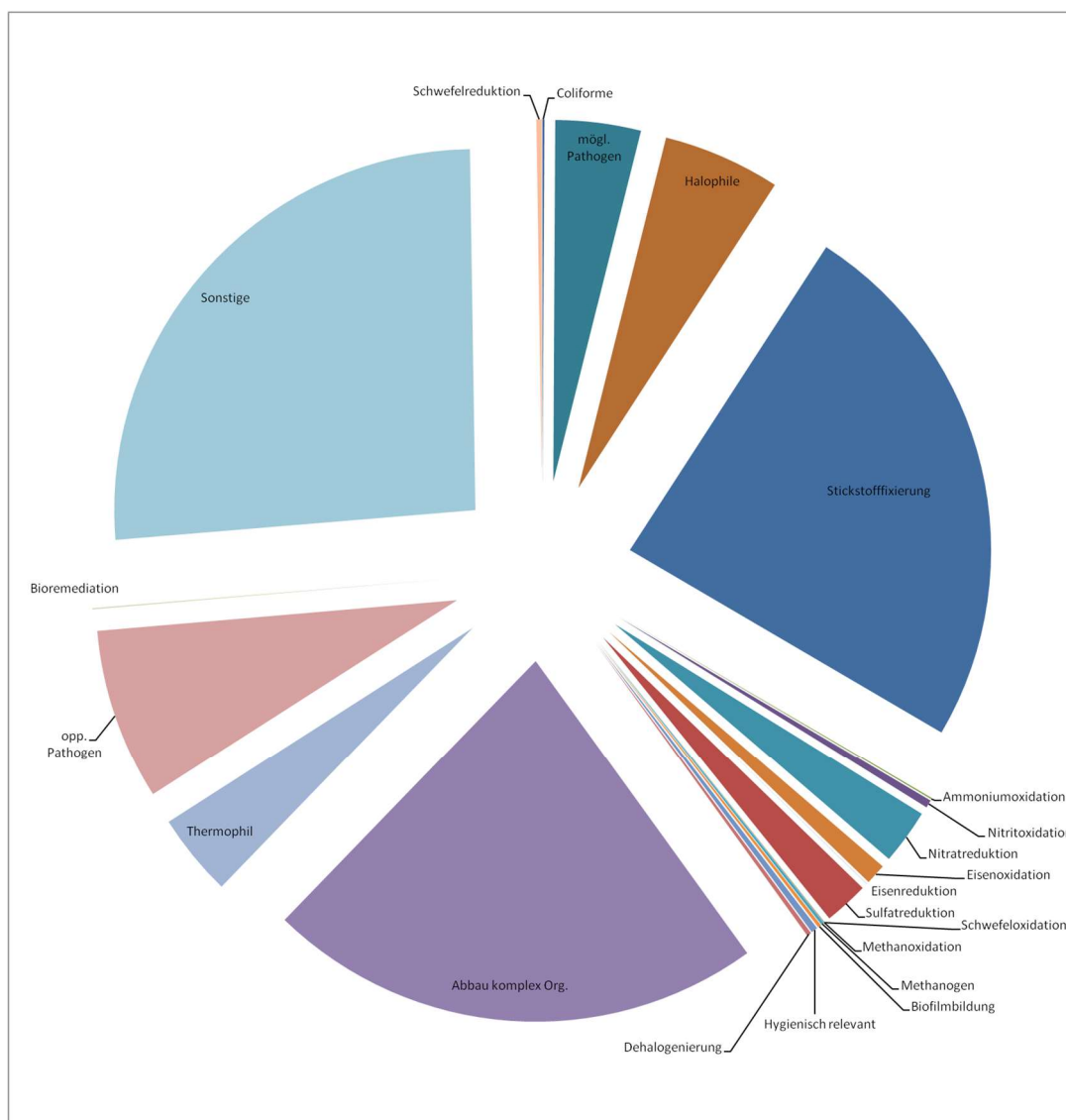


Abb. 77: Anteile der einzelnen Gattungen auf Basis ihrer Stoffwechselfunktionen

Bei dieser Probe steht ganz klar die Stickstofffixierung im Vordergrund. Zusätzlich gibt es bei dieser Probe auch einen bedeutenden Anteil opportunistischer Krankheitserreger, vor allem der Gattung *Staphylococcus*.



Die Ergebnisse des Sequenzabgleichs sind in Tab. 32 dargestellt. Die Zahl hinter dem lateinischen Namen beschreibt hierbei den Anteil der ermittelten Sequenzen, deren nächster Verwandter das jeweilige Bakterium ist.

Tab. 32 Anteile der einzelnen Gattungen

Gattung	Anteil in %	Gattung	Anteil in %	Gattung	Anteil in %
Bradyrhizobium	28,30	Streptococcus	0,48	Acinetobacter	0,12
Noviherbaspirillum	9,14	Simplicispira	0,41	Sarcina	0,12
Propionibacterium	8,85	Nitrospira	0,32	Comamonas	0,11
Lysobacter	6,23	Sphingomonas	0,28	Desulfovibrio	0,11
Micrococcus	6,09	Desulfurivibrio	0,24	Lutispora	0,11
Massilia	5,50	Thermoanaerobaculum	0,23	Brevundimonas	0,10
Staphylococcus	3,67	Gossypium arboreum	0,22	Mycobacterium	0,10
Actinobacillus	3,67	Rugamonas	0,21	Phreatobacter	0,10
Bacillus	3,44	Candidatus Profftella	0,19	Alkanindiges	0,09
Smithella	3,23	Curvibacter	0,19	Candidatus Nitrotoga	0,09
Silanimonas	2,71	Variovorax	0,18	Enterobacter	0,09
Moraxella	2,68	Reyranella	0,17	Rhizobium	0,09
Novosphingobium	1,33	Variibacter	0,17	Sediminibacterium	0,09
Pseudorhodoferrax	1,18	Acetobacterium	0,15	Veillonella	0,09
Desulfotomaculum	1,17	Aquabacterium	0,15	Alloprevotella	0,08
Desulfomicrobium	0,97	Hydrogenobacter	0,15	Amborella trichopoda	0,08
Hydrogenophaga	0,92	Escherichia-Shigella	0,14	Agaricicola	0,07
Orobancha californica	0,76	Pseudomonas	0,14	Corynebacterium	0,07
Acidovorax	0,75	Paucimonas	0,13	Rhodoplanes	0,07
Ureibacillus	0,68	Streptomyces	0,13	Achromobacter	0,06

Bradyrhizobium spp., *Noviherbaspirillum spp.*, *Propionibacterium spp.*, *Lysobacter spp.*, *Micrococcus spp.* als nächste Verwandte der bestimmbar, dominanten Bakterien in der Population identifiziert werden. Im Folgenden sollen die wesentlichen Merkmale dieser Bakterien genauer dargestellt werden.

Bradyrhizobium spp.

Bradyrhizobien sind gram-negative Bakterien. Sie kommen häufig in Böden vor, wo sie in symbiotischer Gemeinschaft mit Leguminosen leben und Stickstoff fixieren. Einige Spezies können Kohlenmonoxid aerob oxidieren.

Noviherbaspirillum spp.

Nicht viel ist über die Bakterien dieser Gattung bekannt. Es handelt sich um ein anaerobes Bodenbakterium das zur Nitratreduktion fähig ist. Es konnte bereits aus mit Öl kontaminierten Böden isoliert werden.

Propionibacterium spp.

Propionibakterien, sind gram-positive Bakterien, die zur natürlichen mikrobiellen Flora der Haut gehören und in manchen Käsesorten die Käselöcher verursachen. Diese entstehen durch das bei der Propionsäuregärung gebildete CO₂. Propionibakterien leben anaerob bis aerotolerant und sind obligate, meist sekundäre Gärer. Sie stellen sehr hohe Anforderungen an ihre Nährstoffquellen (Aminosäuren, Purine) und wachsen im Allgemeinen sehr langsam und nur an speziellen Orten. Unter bestimmten Bedingungen können sie an Infektionen, wie beispielsweise der Acne vulgaris beteiligt sein.

Lysobacter spp.

Es ist wenig über die möglichen Stoffwechselwege dieser Bakteriengattung bekannt. Sie wird als ein potentieller Kandidat für die Produktion neuartiger Antibiotika angesehen und konnte bereits aus Wasser und Böden isoliert werden.

Micrococcus spp.

Diese Gattung kommt in einer Vielzahl möglicher Habitate vor. Sie sind für ihre sehr robuste Zellwand bekannt, die mehr als 50 % der bakteriellen Zellmasse ausmachen kann. Sie sind moderat salztolerant. Technologisch sind sie wegen ihrer Eigenschaft interessant, ein breites Spektrum an ungewöhnlichen Nährstoffen verwerten zu können (Pflanzenschutzmittel und Öl).

Mikrobiologische Analyse 2 vom 09.03.2016 (Kühlsystem)

Im Folgenden sind die Anteile der Spezies auf der Basis Ihrer Stoffwechselfunktionen dargestellt.

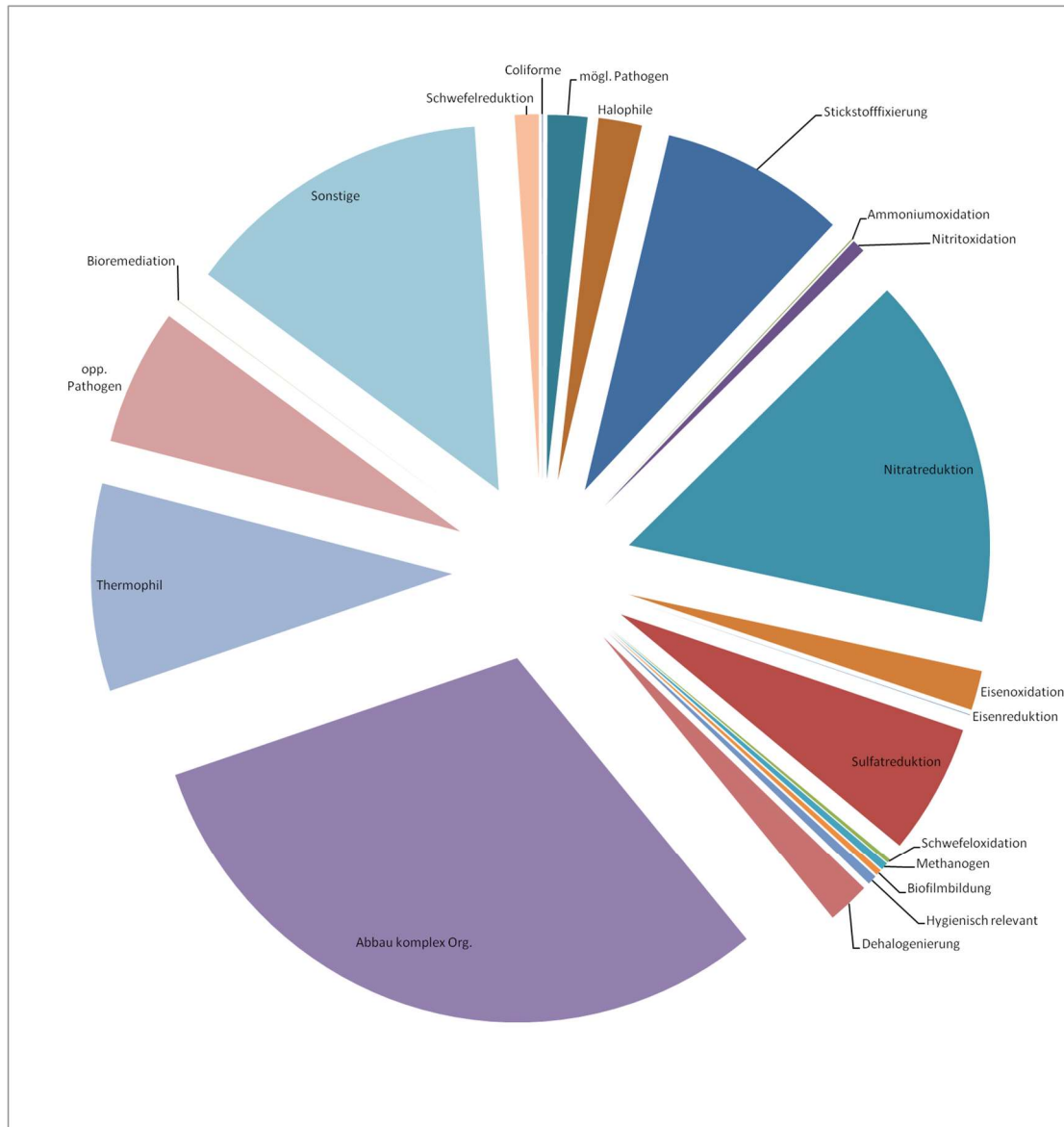


Abb. 78: Anteile der einzelnen Gattungen auf Basis ihrer Stoffwechselfunktionen

Nitratreduzierer und zum Abbau komplexer Organik befähigte Bakterien stellen den größten Anteil der Population. Auch Stickstofffixierer und Sulfatreduzierer konnten nachgewiesen werden.

Die Ergebnisse des Sequenzabgleichs sind in Tab. 33 dargestellt. Die Zahl hinter dem lateinischen Namen beschreibt hierbei den Anteil der ermittelten Sequenzen, deren nächster Verwandter das jeweilige Bakterium ist.

Tab. 33 Anteile der einzelnen Gattungen

Gattung	Anteil in %	Gattung	Anteil in %	Gattung	Anteil in %
Smithella	20,57	Actinobacillus	0,80	Pseudomonas	0,27
Hydrogenophaga	11,83	Moraxella	0,75	Rothia	0,27
Bradyrhizobium	9,32	Thermoanaerobaculum	0,75	Sphingomonas	0,27
Propionibacterium	4,70	Caulobacter	0,72	Phreatobacter	0,24
Bacillus	4,01	Desulfurivibrio	0,67	Desulfobacca	0,21
Desulfotomaculum	4,01	Phenylobacterium	0,67	Desulfuromonadales bacterium J1	0,21
Silanimonas	3,69	Simplicispira	0,64	Streptomyces	0,21
Novosphingobium	3,10	Dechloromonas	0,61	Comamonas	0,19
Pseudorhodoferrax	2,46	Aquabacterium	0,59	Denitratisoma	0,19
Lutispora	2,11	Hydrogenobacter	0,59	Reyranella	0,19
Micrococcus	2,11	Nitrospira	0,56	Mycobacterium	0,16
Massilia	2,03	Orobancha californica	0,56	Afipia	0,13
Desulfomicrobium	1,98	Veillonella	0,56	Corynebacterium 1	0,13
Lysobacter	1,68	Desulfuromonas	0,53	Hyphomicrobium	0,13
Noviherbaspirillum	1,63	Erythrobacter	0,40	Paucimonas	0,13
Acidovorax	1,55	Acetobacterium	0,37	Sediminibacterium	0,13
Staphylococcus	1,47	Curvibacter	0,37	Sulfuritalea	0,13
Brevundimonas	1,31	Escherichia-Shigella	0,37	Achromobacter	0,11
Porphyromonas	0,96	Variibacter	0,32	Alkanindiges	0,11
Variovorax	0,93	Desulfovibrio	0,29	Alloprevotella	0,11

Smithella spp., *Hydrogenophaga* spp., *Bradyrhizobium* spp., *Propionibacterium* spp., *Bacillus* spp. als nächste Verwandte der bestimmaren, dominanten Bakterien in der Population identifiziert werden. Im Folgenden sollen die wesentlichen Merkmale dieser Bakterien genauer dargestellt werden.

***Smithella* spp.**

Dieses anaerobe Bakterium ist in der Lage verschiedene kurzketttige Kohlenwasserstoffe zu oxidieren. Es wird häufig in durch Erdöl verseuchten Gebieten isoliert. Ansonsten ist über diese Gattung nur wenig bekannt.

***Hydrogenophaga* spp.**

Diese Bakterien sind zur Nitratreduktion und Wasserstoffoxidation befähigt, haben jedoch ansonsten nur ein sehr eingeschränktes Nährstoffspektrum (verwerten z.B. organische Säuren).



Bradyrhizobium spp.

Bradyrhizobien sind gram-negative Bakterien. Sie kommen häufig in Böden vor, wo sie in symbiotischer Gemeinschaft mit Leguminosen leben und Stickstoff fixieren. Einige Spezies können Kohlenmonoxid aerob oxidieren.

Propionibacterium spp.

Propionibakterien, sind gram-positive Bakterien, die zur natürlichen mikrobiellen Flora der Haut gehören und in manchen Käsesorten die Käselöcher verursachen. Diese entstehen durch das bei der Propionsäuregärung gebildete CO₂. Propionibakterien leben anaerob bis aerotolerant und sind obligate, meist sekundäre Gärer. Sie stellen sehr hohe Anforderungen an ihre Nährstoffquellen (Aminosäuren, Purine) und wachsen im Allgemeinen sehr langsam und nur an speziellen Orten. Unter bestimmten Bedingungen können sie an Infektionen, wie beispielsweise der Acne vulgaris beteiligt sein.

Bacillus spp.

Bacillus sp. vermehren sich nur unter aeroben Bedingungen auch auf einfachen Grundkulturmedien. Alle Arten bilden Lecithinase und Katalase, während sich die meisten Arten in Kohlenhydrat-Verwertung und Fähigkeit zur aktiven Bewegung unterscheiden. Zur Zersetzung von Organik besitzen sie ein breites Spektrum artspezifischer Enzyme (Bsp.: Kollagenasen, Proteasen). Einige Vertreter der Gattung bilden Toxine (Bsp.: Hämolsine).

Mikrobiologische Analyse 3 vom 09.03.2016 (Heizsystem nach Sanierung)

Nach Biozidbehandlung und Sanierung konnte im Heizsystem eine deutlich reduzierte mikrobiologische Gemeinschaft festgestellt werden, wobei typische korrosionsrelevante Vertreter vollständig fehlen.

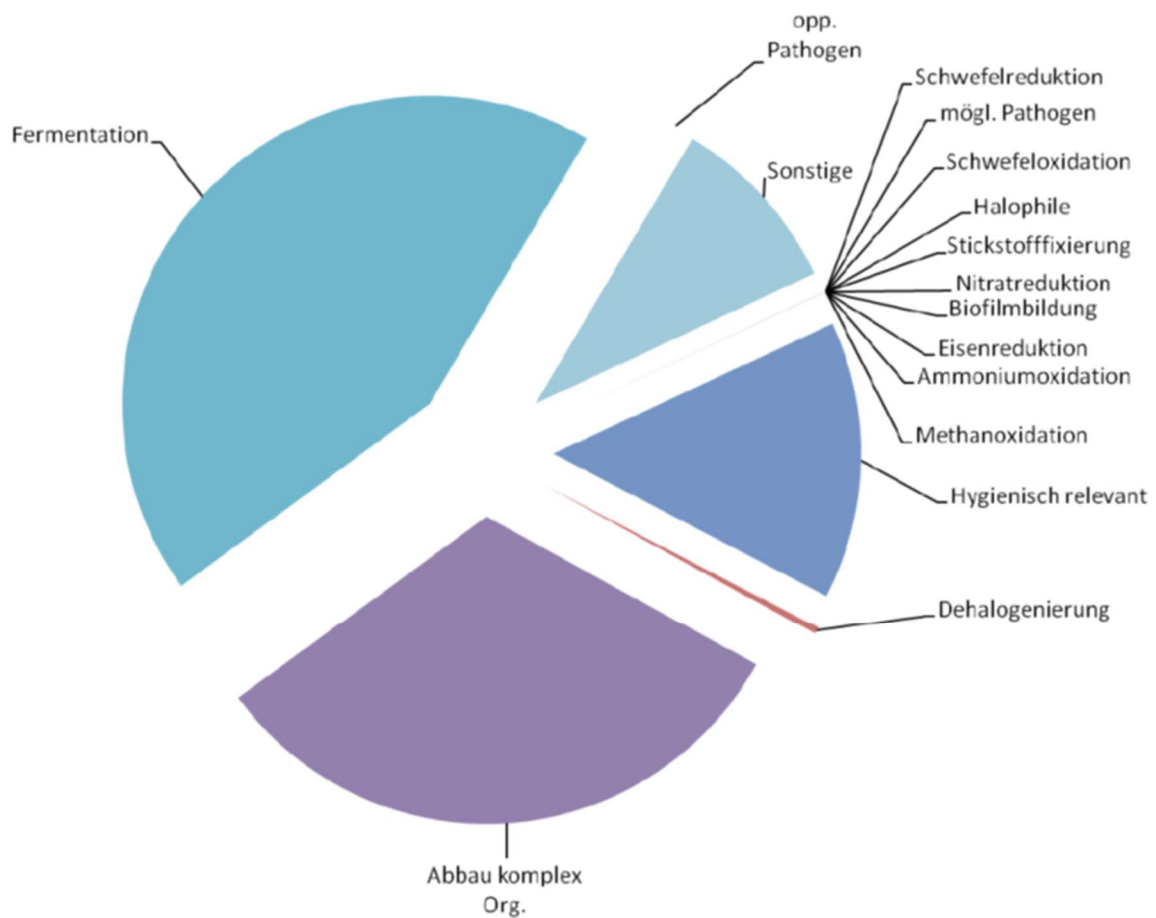


Abb. 79: Mikrobiologische Analyse Objekt 9 Heizsystem nach Sanierung



Tab. 34: Anteile der einzelnen Gattungen

Bezeichnung	Anteil in %	Bezeichnung	Anteil in %	Bezeichnung	Anteil in %	Bezeichnung
Enhydrobacter	51,23	Delftia	0,00	uncultured actinobacterium	0,00	uncultured Syntrophaceae bacterium
Ralstonia	19,97	uncultured	0,00	Candidatus Planktophila	0,00	Bacteriovorax
Sphingomonas	17,14	uncultured	0,00	uncultured bacterium	0,00	Pseudoalteromonas
uncultured bacterium	6,62	OM43 clade	0,00	uncultured bacterium	0,00	Escherichia-Shigella
Corynebacterium 1	3,89	Desulfurivibrio	0,00	uncultured	0,00	uncultured bacterium
Sphingobium	0,43	Sulfurimonas	0,00	uncultured bacterium	0,00	Halomonas
Moraxella	0,37	uncultured bacterium	0,00	uncultured soil bacterium	0,00	Thiothrix
uncultured bacterium	0,18	Sphingopyxis	0,00	uncultured bacterium	0,00	Ambiguous_taxa
Cloacibacterium	0,10	Methylobacter	0,00	uncultured bacterium	0,00	uncultured bacterium
uncultured bacterium	0,01	Ambiguous_taxa	0,00	Ambiguous_taxa	0,00	0
Williamsia	0,01	uncultured bacterium	0,00	uncultured bacterium	0,00	0
Propionibacterium	0,00	hgcl clade	0,00	uncultured	0,00	0
Sulfuricurvum	0,00	uncultured bacterium	0,00	Bradyrhizobium	0,00	0
Corynebacterium	0,00	uncultured bacterium	0,00	uncultured	0,00	0
Staphylococcus	0,00	Deinococcus	0,00	Dongia	0,00	0
Veillonella	0,00	uncultured bacterium	0,00	uncultured bacterium	0,00	0
uncultured archaeon	0,00	uncultured bacterium	0,00	Altererythrobacter	0,00	0
uncultured	0,00	uncultured	0,00	uncultured bacterium	0,00	0
Lawsonella	0,00	uncultured	0,00	Sulfuritalea	0,00	0
Achromobacter	0,00	uncultured archaeon	0,00	uncultured	0,00	0

Enhydrobacter spp.

Bisher konnte in dieser Gruppe nur *Enhydrobacter aerosaccus* beschrieben werden. Hierbei handelt es sich um ein gram-negatives, fakultativ anaerobes Bakterium, welches in der Lage ist Gasvakuolen zu bilden es ist zur Fermentation von Kohlenhydraten fähig und kann organische Säuren aerob abbauen. Der Abbau von organischen Säuren (z.B. Pyruvat oder Acetat) scheint auch die Ausprägung der Gasvakuolen zu induzieren. Die Wachstumstemperatur beträgt zwischen 7 und 40 °C (bei pH 5 – 9.5).

Ralstonia spp.

Einige Bakterien dieser Gattung sind als Pflanzenschädlinge bekannt (Kartoffel), kommen jedoch auch in Abwasser und Gewässern vor. Sie besitzen ein großes Abbaupotential für komplexe organische Verbindungen (z.B. Trichloroethylene oder Chlorophenole).

Sphingomonas spp.

Sphingomonas wurde 1990 als Gruppe von Gram-negativen, stabförmigen, chemoheterotrophen, aeroben Bakterien definiert. Die Sphingomonaden sind weit verbreitet in der Natur, und konnten aus verschiedenen Land- und Wasser-Lebensräumen, sowie von Pflanzenwurzelsystemen, klinischen Proben und anderen Quellen isoliert werden. Dies liegt an ihrer Fähigkeit, in niedrigen Nährstoffkonzentrationen zu überleben und eine Vielzahl von Kohlenstoffquellen zu metabolisieren. Zahlreiche Stämme wurden aus Umgebungen isoliert, die mit toxischen Verbindungen kontaminiert sind, wo sie die Fähigkeit zeigen, die Verunreinigungen als Nährstoffe zu verwenden. Einige Stämme sind in der Lage hydrophobe, polyzyklische, aromatische Kohlenwasserstoffe, Polyethylenglykol oder 2-Methylphenanthren abzubauen.

Corynebacterium spp.

Es handelt sich um ein Gram-positives Bakterium. Einige Stämme sind pathogen für Tiere und Menschen. Sie kommen in der Schleimhaut und auf der Haut des Menschen natürlicherweise vor.

Sphingobium spp.

Sphingobium ist eine Gattung von Gram-negativen Bakterien, welche in der Lage sind chlorierte aromatische Verbindungen abzubauen.

Wasserchemische Analyse 1 vom 09.03.2016

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Systemwasseranalyse aufgeführt.

Laborwerte

Fe part.+gel.	Eisen partikulär u. gelöst	mg/l	195.40 *
Fe gel.	Eisen gelöst	mg/l	193.51
Cu	Kupfer	mg/l	0.10
Zn	Zink	mg/l	0.00
Al	Aluminium	mg/l	0.00
Mn	Mangan	µg/l	6600.00
Ni	Nickel	µg/l	n.b.
Cr	Chrom	µg/l	n.b.
Na	Natrium	mg/l	6.67
K	Kalium	mg/l	1.10
Mg	Magnesium	mg/l	1.57
Ca	Kalzium	mg/l	2.60
Mo	Molybdän	mg/l	0.00
P	Phosphor	mg/l	1.60
Cl ⁻	Chlorid	mg/l	n.b.
SO ₄ ²⁻	Sulfat	mg/l	n.b.
NO ₃ ⁻	Nitrat	mg/l	n.b.
NPOC	Organischer Kohlenstoff	mg/l	41.9
IC	Anorganischer Kohlenstoff	mg/l	0.9
Zellzahl	Keimbelastung	l ⁻¹	n.b.

Vor-Ort-Werte

pH	-	6.3
Redoxpotential (gemessen)	mV	-516.0
Sauerstoffgehalt	mg/l	0.007
Leitfähigkeit	µS/cm	2342.1
Temperatur	°C	63.7

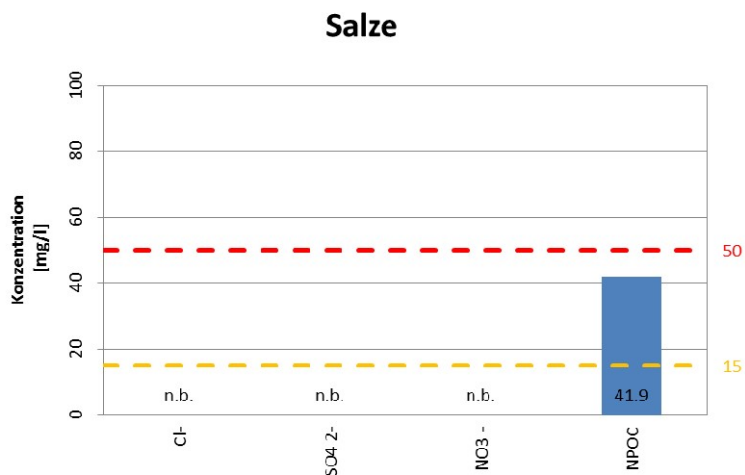
* 0,00: Wert liegt unterhalb der Nachweisgrenze; n.b. : nicht bestimmt



Bewertung

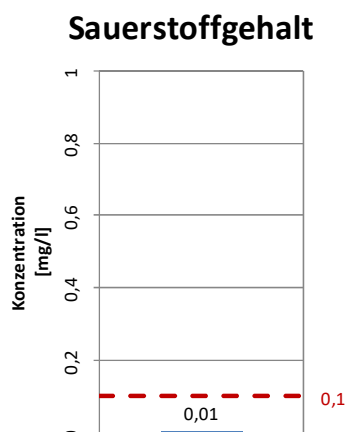
Die folgende Tabelle erläutert die Messergebnisse im Einzelnen einschließlich einer individuellen Bewertung und Handlungsempfehlungen.

Ergebnis	Bewertung und Handlungsempfehlung										
Metalle <table><thead><tr><th>Metall</th><th>Konzentration [mg/l]</th></tr></thead><tbody><tr><td>Eisen part.+gel.</td><td>195,4</td></tr><tr><td>Eisen gel.</td><td>193,5</td></tr><tr><td>Kupfer</td><td>0,1</td></tr><tr><td>Σ weitere Legierungs-Metalle</td><td>6,6</td></tr></tbody></table>	Metall	Konzentration [mg/l]	Eisen part.+gel.	195,4	Eisen gel.	193,5	Kupfer	0,1	Σ weitere Legierungs-Metalle	6,6	Gelöste und partikulär vorkommende Eisenverbindungen, bzw. Kupfer im Systemwasser stellen die Haupt-Korrosionsprodukte dar. Sie sind daher indikativ für aktive Korrosionsprozesse. Gelöstes Eisen stellt die Vorstufe zu partikulären Bestandteilen da. Das Fehlen partikulärer Bestandteile bei einem hohen Anteil gelöster Bestandteile kann verschiedene Ursachen haben: entweder die partikulären Bestandteil werden wirksam gefiltert oder die Korrosionsprozesse sind infolge Sauerstoffmangel zum Erliegen gekommen. Metallgehalte (gelöst) bis zu 0,5 mg/L werden als unkritisch angesehen. Bewertung: Es sind außergewöhnlich hohe Mengen gelöstem Eisen von 193,5 mg/L nachweisbar, sowie geringe Mengen Kupfer. Die extrem hohen Werte an gelöstem Eisen weisen auf sehr starke aktuelle Korrosionsprozesse hin. Weiterhin wurde Mangan nachgewiesen. Mangan wird frei, wenn Eisenkorrosion stattfindet.
Metall	Konzentration [mg/l]										
Eisen part.+gel.	195,4										
Eisen gel.	193,5										
Kupfer	0,1										
Σ weitere Legierungs-Metalle	6,6										



Chlorid, Sulfat und Nitrat fördern als Elektrolyten durch die Erhöhung der Leitfähigkeit die Korrosion. Zusätzlich tragen Nitrat und Sulfat als Nährsalze sowie organischer Kohlenstoff (NPOC) zu einem erhöhten Keim-Wachstum bei. Die Salze werden über das Füllwasser und ggf. über das Nachspeisewasser eingebracht. Organischer Kohlenstoff stammt aus zugesetzten Inhibitoren, geölten und nicht gereinigten Bauteilen oder Kunststoffdichtungen.

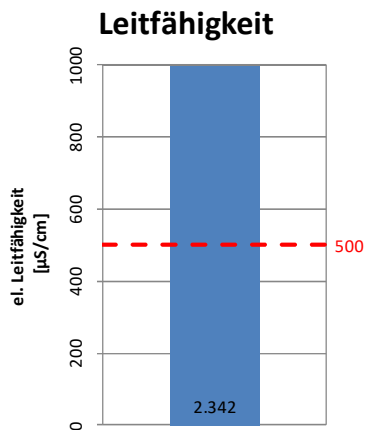
Bewertung: Aufgrund der hohen Metallfrachten konnten gelöste Salze nicht bestimmt werden. Das Vorhandensein von organischem Kohlenstoff deutet auf das Vorhandensein von Ölen, Dichtmitteln und/oder Inhibitoren hin.



Das Vorhandensein von Sauerstoff ist Voraussetzung für die nicht-mikrobiell induzierte Korrosion von Eisen und Kupfer. Der Sauerstoffgehalt ist nach Neubefüllung hoch und sinkt in gasdichten Systemen mit der Betriebszeit, weil er durch Korrosionsprozesse aufgebraucht wird. Die Korrosionsprozesse kommen dann zum Erliegen. Aufgrund der Erfahrung nimmt die Korrosionsrate ab einem Sauerstoffgehalt von 0,1 mg/L stark zu. Ein hoher Sauerstoffgehalt bei einem nicht frisch befüllten, geschlossenen System weist auf Gasdiffusion durch dünnwandige Kunststoffrohre, nicht ordnungsgemäße Druckhaltungssysteme oder offene Ausgleichsbehälter hin.

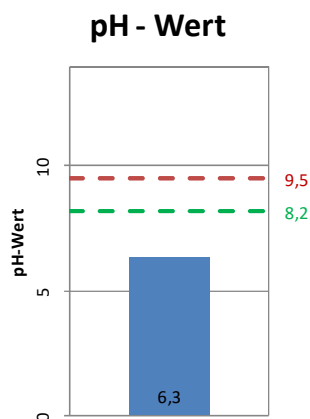


Bewertung: Der Sauerstoffgehalt liegt mit 0,01 mg/L unter dem Grenzwert. Eindringender Sauerstoff wird jedoch durch die starken Korrosionsprozesse sofort aufgezehrt. Daher kann ein Sauerstoffeintritt in das System nicht ausgeschlossen werden.



Die Leitfähigkeit gibt die elektrolytische Eigenschaft des Systemwassers an. Das Korrosionsrisiko steigt mit der Erhöhung der Leitfähigkeit. Entsalztes Wasser weist in der Praxis eine Leitfähigkeit von etwas über 100 µS/cm, Leitungswasser bis zu 1200 µS/cm und mehr auf. In einem Systemwasser ohne Zusatz von Korrosionsschutzmitteln wird eine Leitfähigkeit von < 500 µS/cm zur Vermeidung von Korrosion toleriert.

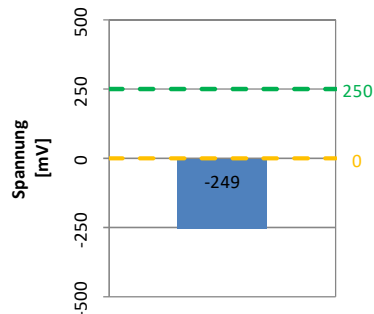
Bewertung: Die Leitfähigkeit von 2342 µS/cm liegt weit über dem Grenzwert und vermutlich einer hohen Salzkonzentration und dem Vorhandensein von Inhibitoren geschuldet.



Der pH-Wert ist ein Hauptindikator für Korrosionsrisiken und sollte zwischen 8,2 und 9,5 liegen. Ist Aluminium im System vorhanden, darf der pH-Wert 8,5 nicht überschreiten.

Bewertung: Der pH-Wert von 6,3 liegt weit im sauren Bereich und weist keine Schutzfunktion vor Korrosionsprozessen auf. Im Gegenteil wird Korrosion befördert.

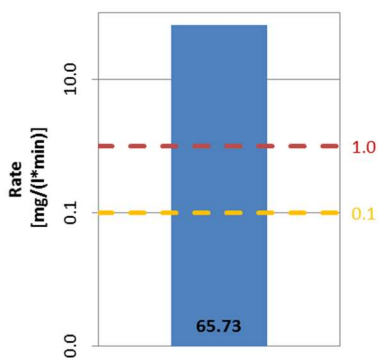
Redoxpotential normiert



Das sauerstoffkorrigierte, auf Standardwasserstoffelektrode und pH 7 bzw. den Neutralpunkt normierte Redoxpotential gibt in Systemen ohne Wasserbehandlung Aufschluss über den Systemzustand. Es zeigt an, ob sich Eisen(II) als primäres Korrosionsprodukt im System befindet, Sulfid als Produkt mikrobieller Aktivität vorliegt oder der Systemzustand insgesamt unkritisch ist. Ein Redoxpotential über 250 mV ist unkritisch, es liegen keine gelösten Korrosionsprodukte vor. Zwischen 0 mV und 250 mV liegt gelöstes Eisen(II) vor, ein Redoxpotential von unter 0 mV deutet auf sulfatreduzierende Bakterien hin.

Bewertung: Das normierte Redoxpotential von -249 mV weist auf einen sehr schlechten Systemzustand und möglicherweise sulfatreduzierende Bakterien hin.

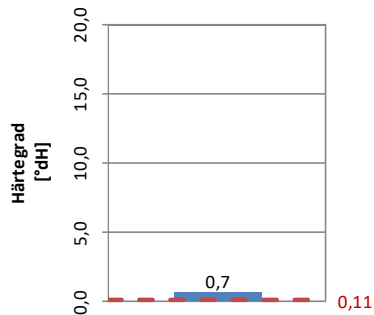
Korrosionsrate



Die Korrosionsrate gibt zum Zeitpunkt der Messung die je Zeiteinheit theoretisch gebildete Menge der sekundären Korrosionsprodukte an. Aus diesem Wert kann u.U. auf Grundlage weiterer anlagenspezifischer Parameter auch der absolute Gesamtertrag an sekundären Korrosionsprodukten und der Materialabtrag in mm/a berechnet werden. Bei der Korrosionsrate handelt es sich um einen neu entwickelten Indikatorwert, dessen Aussagekraft und Praxisbezug noch ermittelt werden muss.

Bewertung: Es sind im hohen Maße aktive Korrosionsprozesse nachweisbar.

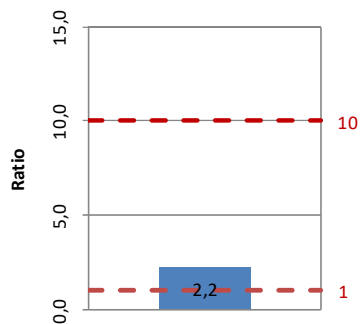
Gesamthärte



Härtebildner bergen die Gefahr der Verkalkung an heißen Bauteilen wie Wärmeübertragern oder Erhitzern. Ihr Grenzwert ist abhängig von dem Vorhandensein entsprechender Anlagenelemente und der Anlagengesamtleistung (gem. VDI 2035 Blatt 1)

Bewertung: Der Wert von 0,7 °dH überschreitet den Grenzwert nach VDI 2035 Blatt 1 für Anlagen mit einer Leistung von mehr als 600 kW von 0,11 °dH geringfügig. Es besteht diesbezüglich kein Handlungsbedarf zur Senkung der Wasserhärte.

Stoffmengenanteil Na/(Ca+Mg)



Das Verhältnis der molaren Konzentrationen von Natrium zu Calcium und Magnesium gibt einen Hinweis auf die Vorbehandlung des Systemwassers. Bei einem Wert unter 1 ist das Wasser unaufbereitet oder voll-entsalzt, bei einem Wert über 10 ist es nur enthärtet.

Bewertung: Der Wert von 2,2 weist auf unbehandeltes Wasser hin.

3.3.2 Objekt 10 (Heizsystem)

Mikrobiologische Analyse 1 vom 17.07.2014

Im Folgenden sind die Anteile der Spezies auf der Basis Ihrer Stoffwechselfunktionen dargestellt.

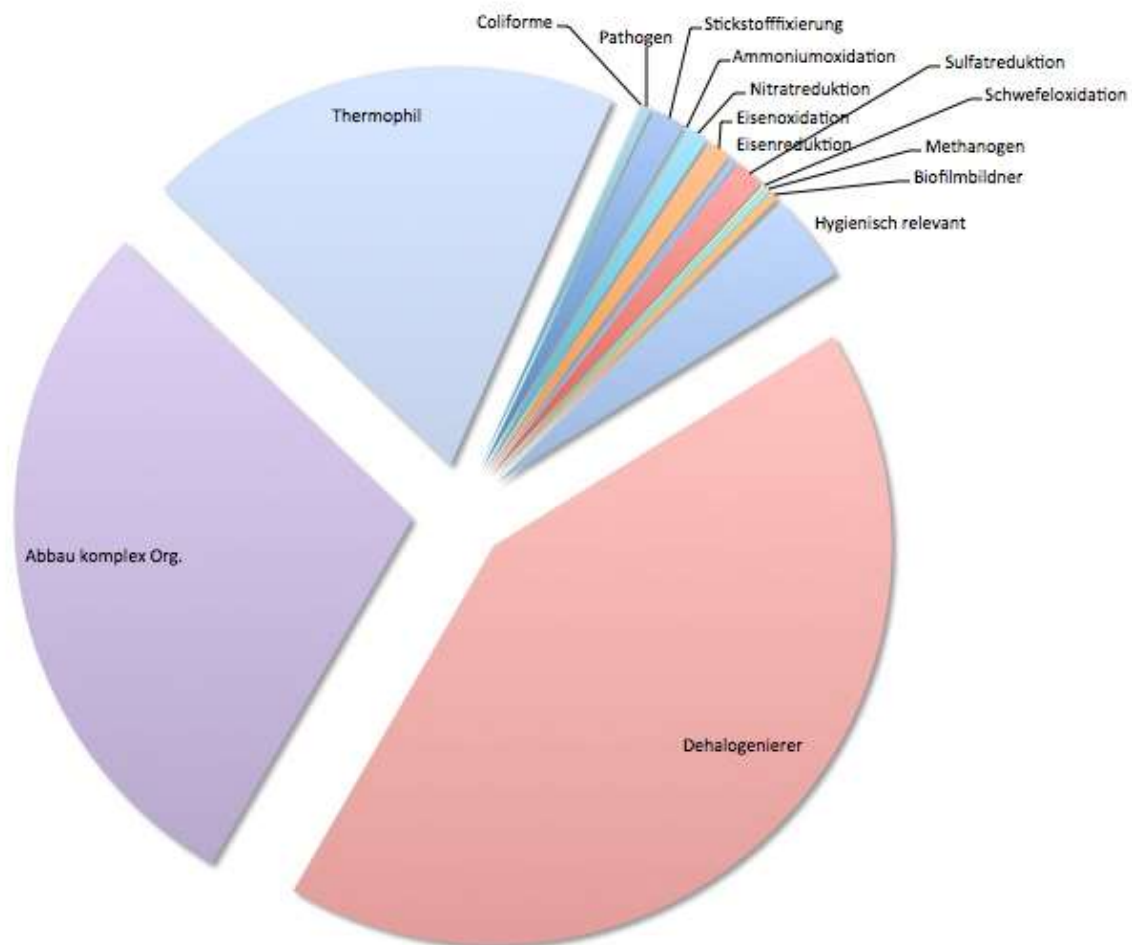


Abb. 80: Anteile der Gattungen auf Basis ihrer Stoffwechselfunktion der Probe vom 17.07.2014

Die Probe enthält viele als thermophil bekannte Organismen und weist ein breites Artenspektrum auf, siehe Abb. 80. Jedoch dominieren eindeutig zwei Organismengruppen. Dies sind Dehalobacter mit 44 % und Pelotomaculum mit 23 % Anteil an der Gesamtheit aller detektierten Sequenzdaten. Die Probe weist somit eine hohe Zahl an Bakterien auf, die zum Abbau komplexer Organik befähigt sind.

Neben einer geringeren Zahl von Eisenoxidierern und Eisenreduzierern konnten auch einige hygienisch relevante Organismen (wie *Enterobacter sp.* und *Listeria sp.*) detektiert werden.

Es konnte auch ein geringerer Anteil an Dehalogenierern detektiert werden. Diese sind in der Lage chlorierte organische Moleküle zu verwerten. Auch wenn die eisenoxidierenden und -reduzierenden Organismen nicht die dominanten Vertreter im System sind, deutet ihr auf einen aktiven Eisenkreislauf hin. In Tab. 35 sind die einzelnen Spezies dargestellt.

Tab. 35 Anteile der einzelnen Gattungen

Gattung	Anteil in %	Gattung	Anteil in %	Gattung	Anteil in %	Gattung	Anteil in %
Dehalobacter	44,40	Rhodopseudomonas	0,26	Aneurinibacillus	0,02	Thiobacillus	0,02
Pelotomaculum	23,42	Aquabacterium	0,23	Azospirillum	0,02	Victivallis	0,02
Dechloromonas	9,45	Lactobacillus	0,21	Bellilinea	0,02		
Erysipelothrix	4,53	Desulfotobacterium	0,16	Bryobacter	0,02		
Novosphingobium	3,20	Orenia	0,12	Chlorochromatium	0,02		
Gelria	2,30	Aliihoeflea	0,07	Coprothermobacter	0,02		
Azospira	1,72	Bacillus	0,07	Corynebacterium	0,02		
Desulfotomaculum	1,55	Dialister	0,07	Dethiobacter	0,02		
Phenylobacterium	1,25	Geobacter	0,07	Eliaorea	0,02		
Acidovorax	1,16	Pelobacter	0,07	Enterobacter	0,02		
Propionivibrio	0,84	Propionibacterium	0,07	Halomonas	0,02		
Desulfotibacter	0,63	Selenomonas	0,07	Kluyvera	0,02		
Enhydrobacter	0,60	Treponema	0,07	Listeria	0,02		
Pseudomonas	0,46	Acidithiobacillus	0,05	Mogibacterium	0,02		
Acinetobacter	0,39	Arthrobacter	0,05	Nitrospira	0,02		
Desulfuromonas	0,39	Azoarcus	0,05	Propionimonas	0,02		
Sphingomonas	0,39	Caulobacter	0,05	Rahnella	0,02		
Rhodoplanes	0,37	Pelomonas	0,05	Selenihalanaerobacter	0,02		
Acetobacterium	0,30	Pelosinus	0,05	Succinoclasticum	0,02		
Desulfosporosinus	0,28	Stenotrophomonas	0,05	Thermincola	0,02		

Dehalobacter spp., *Pelotomaculum spp.*, *Dechloromonas spp.*, *Erysipelothrix spp.* und *Novosphingobium spp.* konnten als nächste Verwandte der dominanten Bakterien in der Population identifiziert werden. Im Folgenden sollen die wesentlichen Merkmale dieser Bakterien genauer dargestellt werden.

Dehalobacter spp. gehören zur Ordnung der Clostridiales (Familie: Peptococcaceae) und werden in anaeroben Umgebungen wie tiefen Erdschichten, Grundwasserleitern und Flusssedimenten gefunden. Sie konkurrieren mit Methanogenen Bakterien und Eisenreduzieren in ihrem Lebensraum um Wasserstoff und andere lebenswichtige Nährstoffe. Alle bekannten *Dehalobacter* Stämme sind nicht pathogen. Sie sind in der Lage halogenierte Verbindungen abzubauen.

Einige Bakterien der Gattung ***Pelotomaculum*** sind anaerob, thermophil und können in syntrophischer Gemeinschaft mit anderen Bakterien Propionat oxidieren.



Bakterien der Gattung ***Dechloromonas*** können Perchlorat reduzieren und konnten bereits aus Abwässern der Papierherstellung und aus Flusssedimenten isoliert werden. Sie sind fakultativ anaerob, sehr beweglich und zur Eisenreduktion und anaerobem Abbau org. Ringstrukturen (Benzol) befähigt.

Erysipelothrix können in Abwasser, in Fischdärmen und in Boden in kontaminierten Böden gefunden werden. Sie sind vor allem als Pathogen bei Tieren bekannt. Einige Arten können jedoch auch beim Menschen Krankheiten auslösen (Wundrose).

Novosphingobium ist eine Gattung von Gram-negativen Bakterien, von denen einige in der Lage sind aromatische Verbindungen wie Phenol, Anilin, Nitrobenzol und Phenanthren abzubauen.

3.3.2.2 Mikrobiologische Analyse 2 vom 17.11.2015

Im Folgenden werden die Anteile der Spezies auf der Basis Ihrer Stoffwechselfunktionen dargestellt.

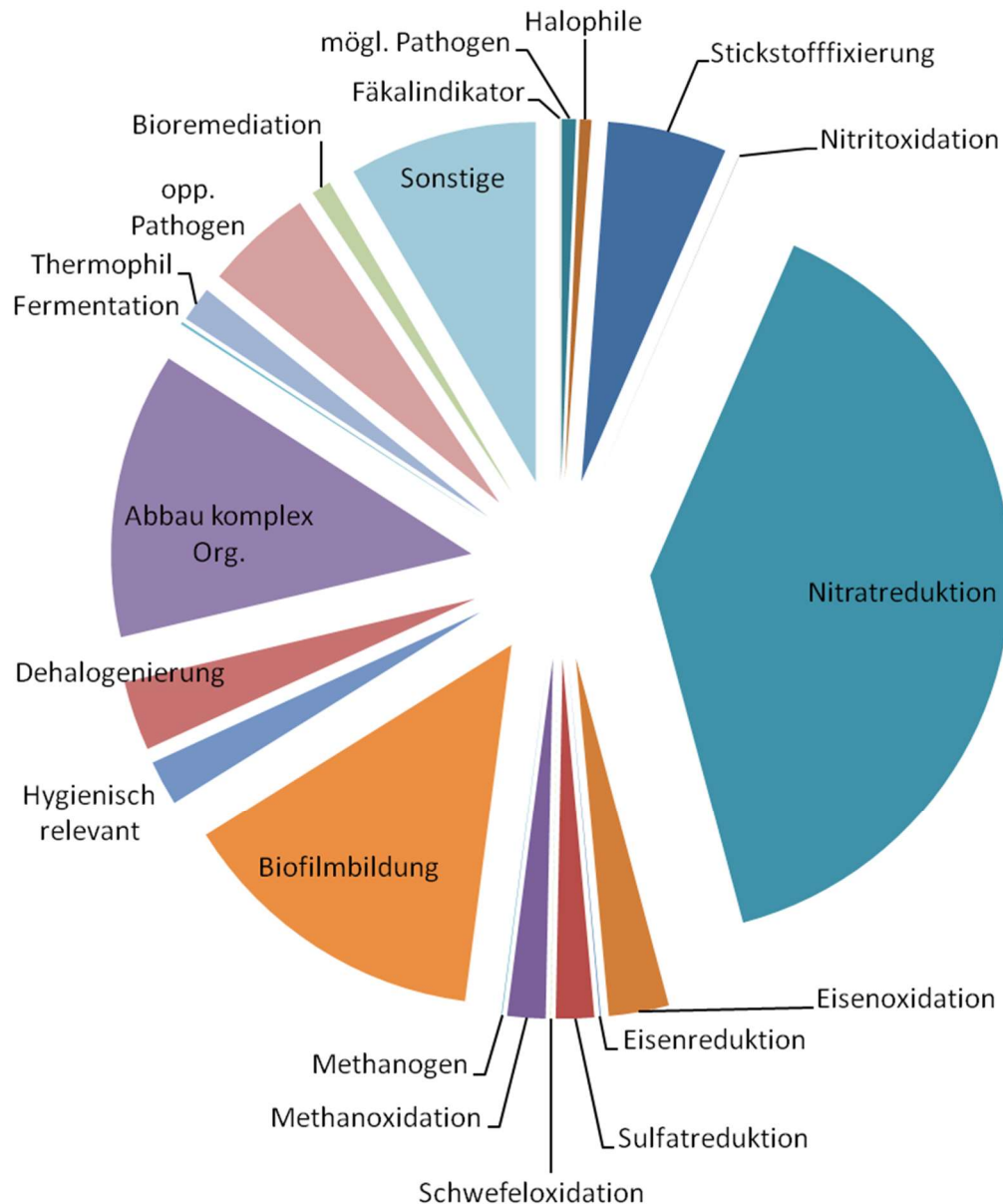


Abb. 81: Anteile der Gattungen auf Basis ihrer Stoffwechselfunktion

Bei dieser Probe sind vor allem Nitratreduzierer, Spezialisten für den Abbau komplexer organischer Verbindungen und Biofilmbildner auffällig. Es ist eine deutliche Abnahme an Dehalogenierern und zum Abbau komplexer org. Substanzen fähige Bakterien im Vergleich zur vorherigen Probe zu beobachten.

Die Anwesenheit von Nitratreduzierern und Sulfatreduzierern deutet auf Nachspeisung mit Leitungswasser hin.



Im Folgenden sind die einzelnen Spezies dargestellt.

Tab. 36 Anteile der einzelnen Gattungen

Gattung	Anteil in %	Gattung	Anteil in %	Gattung	Anteil in %
Desulfotomaculum	24,16	Aquabacterium	0,81	Magnetospirillum	0,20
Pseudomonas	9,95	Candidatus Accumulibacter	0,65	Erysipelothrix	0,20
Blastomonas	9,72	Smithella	0,56	Delftia	0,17
Pseudoxanthomonas	7,23	Simplicispira	0,48	Aquicella	0,17
Brevundimonas	6,92	Silanimonas	0,45	Propionibacterium	0,16
Azospira	5,19	Novosphingobium	0,45	Thermodesulfovibrio	0,14
Desulfovibrio	3,08	Roseococcus	0,43	Achromobacter	0,14
Phreatobacter	3,00	Variibacter	0,40	Alicyclophilus	0,14
Desulfurispora	2,52	Rhodanobacter	0,33	Lutispora	0,14
Bradyrhizobium	2,34	Methylothermobacter	0,32	Woodsholea	0,13
Pseudorhodospira	2,11	Variovorax	0,31	Dechloromonas	0,13
Sphingopyxis	1,79	Rhodopseudomonas	0,30	Staphylococcus	0,13
Sulfurovum	1,62	Xanthobacter	0,29	Acetobacterium	0,12
Sedimentibacterium	1,41	Ferribacterium	0,25	Candidatus Nitrotoga	0,12
Tepidimonas	1,14	Massilia	0,24	Moraxella	0,12
Caulobacter	1,09	Propionivibrio	0,22	Sphingomonas	0,11
Reyranella	1,05	Geothrix	0,22	Cloacibacterium	0,11
Hydrogenophaga	0,96	Candidatus MRC-1	0,22	Alcaligenes	0,11
Acidovorax	0,95	Bacillus	0,22	Curvibacter	0,09
Phenylobacterium	0,88	Bosea	0,21	Zoogloea	0,09

Desulfotomaculum spp., *Pseudomonas* spp., *Blastomonas* spp., *Pseudoxanthomonas* spp., *Brevundimonas* spp. konnten als nächste Verwandte der bestimmbarsten, dominanten Bakterien in der Population identifiziert werden. Im Folgenden sollen die wesentlichen Merkmale dieser Bakterien genauer dargestellt werden.

***Desulfotomaculum* spp.**

Desulfotomaculum spp. können in der Regel in Grundwasser, im Sedimentgestein oder im Kot von Tieren (hauptsächlich Schweinen), wo wenig Sauerstoff vorhanden ist, gefunden werden. Insbesondere *D. alkaliphilum* ist die einzige bekannte obligat alkaliphile Art, wächst nur bei pH-Werten zwischen 8,5 bis 11, und wird häufig in Schweine- und Rindergülle gefunden. Bei *Desulfotomaculum* spp. handelt es sich um sulfatreduzierende Bakterien.

***Pseudomonas* spp.**

Pseudomonaden sind ubiquitäre Bakterien, welche im Boden, in Sümpfen, in küstennahen Lebensräumen und in Tier- und Pflanzengewebe gefunden werden können. Im Allgemeinen können diese Bakterien eine Vielzahl von physischen Bedingungen tolerieren. Einige dieser Arten, wie *Pseudomonas aeruginosa*, sind opportunistische Pathogene. Pseudomonas-Arten sind auch für den Verderb von Milch selbst nach einer Pasteurisation verantwortlich. Pseu-

domonaden sind psychrotrophe Bakterien. Sie sind in der Lage bei niedrigen Temperaturen zu wachsen und sich zu vermehren. Pseudomanden bilden bevorzugt Biofilme aus.

Blastomonas spp.

Hierbei handelt es sich um eine Gattung von zur Biofilmbildung fähigen Bakterien über die ansonsten wenig bekannt ist.

Pseudoxanthomonas spp.

Hierbei handelt es sich eine Gattung von Bodenbakterien die zur Nitratreduktion fähig sind.

Brevundimonas spp.

Sie sind mit entfernt mit *Caulobacter spp.* verwandt. Sie sind beispielsweise in der Lage Isochinolin abzubauen, einen giftigen Bestandteil in Pestiziden und Korrosionsschutzmitteln.

3.3.2.3 Mikrobiologische Analyse 3 vom 16.08.2017

Im Folgenden werden die Anteile der Spezies auf der Basis Ihrer Stoffwechselfunktionen dargestellt.

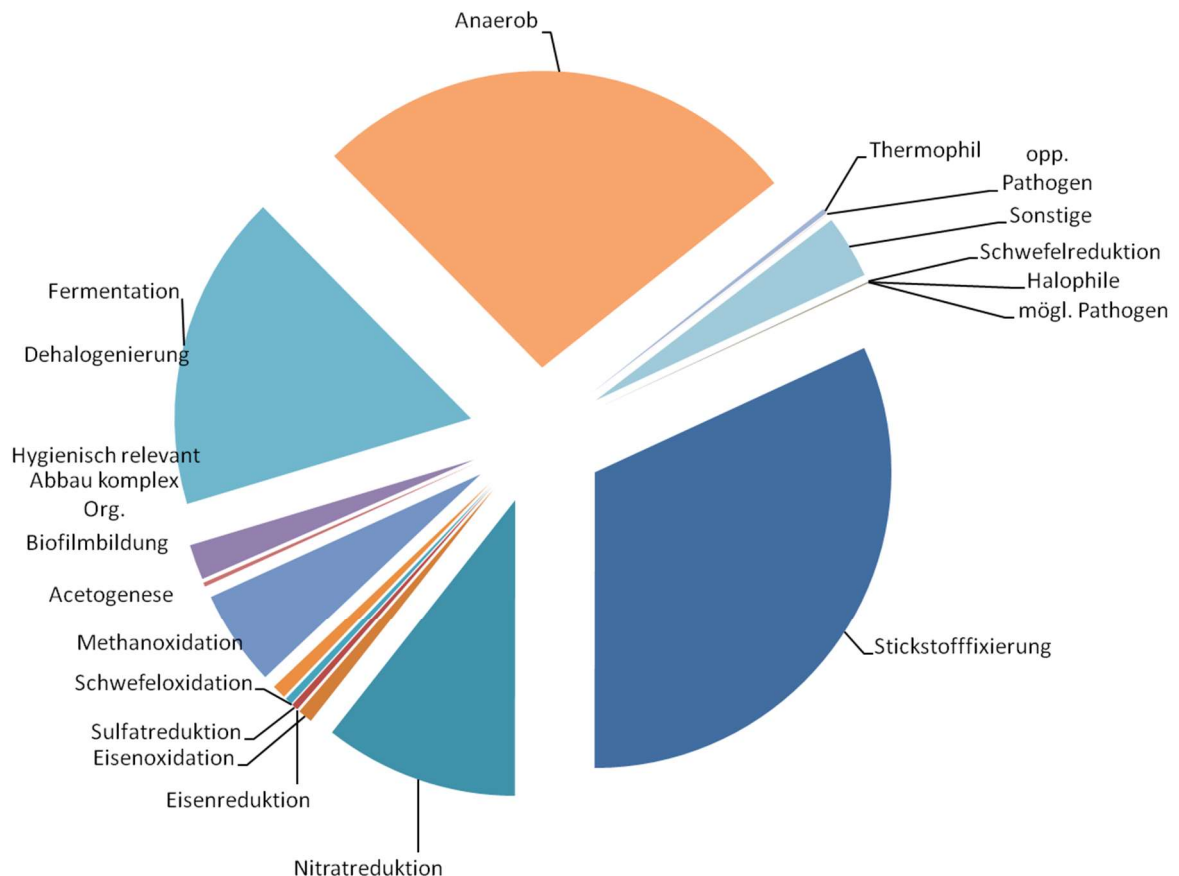


Abb. 82: Anteile der Gattungen auf Basis ihrer Stoffwechselfunktion

Es dominieren Stickstofffixierer, anaerob wirkende Keime, Nitratreduzierer sowie Keime, die zur Fermentation fähig sind. Der Anteil der Nitratreduzierer hat im Vergleich zur letzten Probe abgenommen. Dies ist ein Hinweis darauf, dass Nitrat vollständig gezerrt wurde woraufhin diese Keime absterben. Bei der Reduzierung von Nitrat entstehen Säuren, die den pH-Wert des Umlaufwassers absenken können. Eine kritische pH-Wert-Absenkung konnte jedoch nicht beobachtet werden. Die Etablierung von Stickstofffixierern deutet auf das Eindringen von Umgebungsluft hin. Als Diffusionsquelle kommen die Butylschläuche in Frage.

Im Folgenden sind die einzelnen Spezies dargestellt.

Tab. 37 Anteile der einzelnen Gattungen

Bezeichnung	Anteil in %	Bezeichnung	Anteil in %	Bezeichnung	Anteil in %
Azospira	44,04	Methanobacterium	0,16	Acinetobacter	0,02
Pelosinus	23,51	Pseudomonas	0,15	Lysinimonas	0,01
Tessaracoccus	13,44	Zymomonas	0,14	Ornatilinea	0,01
Erysipelothrix	7,26	Bradyrhizobium	0,13	Erythrobacter	0,01
Parablastomonas	2,98	Christensenellaceae R-7 group	0,10	Hydrocarboniphaga	0,01
Novosphingobium	0,97	Desulfovibrio	0,10	Legionella	0,01
Blastomonas	0,90	Undibacterium	0,10	Sphingomonas	0,01
Sediminibacterium	0,61	Leptolinea	0,09	Caulobacter	0,01
Brevundimonas	0,59	Candidatus Accumulibacter	0,08	Leptospira	0,01
Acetobacterium	0,55	Ralstonia	0,08	Sphingopyxis	0,01
Ruminiclostridium 1	0,50	Pseudolabrys	0,06	Pelomonas	0,01
Acidovorax	0,50	Variibacter	0,06	Propionicimonas	0,01
Propioniceella	0,42	Sphingobium	0,05	Geobacter	0,01
Curvibacter	0,38	Desulfosporosinus	0,04	Variovorax	0,01
Desulfotomaculum	0,37	Rhodopseudomonas	0,03	Albidiferax	0,00
Roseococcus	0,36	Smithella	0,02	Methylobacterium	0,00
Achromobacter	0,30	Cupriavidus	0,02	Aerococcus	0,00
Propionivibrio	0,27	Anaerospira	0,02	Ferriphaselus	0,00
Dechloromonas	0,22	Pseudorhodoferrax	0,02	Herminiimonas	0,00
Ammonifex	0,18	Reyranella	0,02	Leifsonia	0,00

Azospira spp., *Pelosinus* spp., *Tessaracoccus* spp., *Erysipelothrix* spp., *Parablastomonas* spp. konnten als nächste Verwandte der bestimmbar, dominanten Bakterien in der Population identifiziert werden. Im Folgenden sollen die wesentlichen Merkmale dieser Bakterien genauer dargestellt werden.

***Azospira* spp.**

Dieses Grundwasserbakterium ist zur Stickstofffixierung fähig.

***Pelosinus* spp.**

Diese Bakterien wurden zuerst in chlorversuchtem Grundwasser gefunden. Es handelt sich um anaerobe Bakterien, welche Gram-negativ und mobil sind. Sie sind zur Fermentation fähig.

***Tessaracoccus* spp.**

Ein gram-negatives anaerobes Bakterium aus der Familie der Propionibacteriaceae. Verschiedene Vertreter konnten aus Rohöl-Proben tief unter der Erde isoliert werden. Es besitzt die Fähigkeit zur Nitratreduktion.



Erysipelothrix spp.

Erysipelothrix kann in Abwasser, in Fischedärmen und in Boden, welcher durch tierische Fäkalien verunreinigt wurde gefunden werden. Diese Bakterien sind nicht in der Lage, für eine lange Zeit in der externen Umgebung zu überleben, da sie dort keine passenden Lebensbedingungen vorfinden.

Parablastomonas spp.

Ein Gram-negatives Umweltbakterium, welches beweglich ist.

3.3.2.4 Wasserchemische Analyse 1 vom 16.08.2017

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Systemwasseranalyse aufgeführt.

Laborwerte

Fe part.+gel.	Eisen partikulär u. gelöst	mg/l	0.10 *
Fe gel.	Eisen gelöst	mg/l	0.09
Cu	Kupfer	mg/l	0.00
Zn	Zink	mg/l	0.02
Al	Aluminium	mg/l	0.08
Mn	Mangan	µg/l	9.23
Ni	Nickel	µg/l	43.10
Cr	Chrom	µg/l	12.02
Na	Natrium	mg/l	8.54
K	Kalium	mg/l	1.02
Mg	Magnesium	mg/l	1.16
Ca	Kalzium	mg/l	5.57
Mo	Molybdän	mg/l	n.b.
P	Phosphor	mg/l	0.00
Cl ⁻	Chlorid	mg/l	n.b.
SO ₄ ²⁻	Sulfat	mg/l	n.b.
NO ₃ ⁻	Nitrat	mg/l	n.b.
NPOC	Organischer Kohlenstoff	mg/l	11.7
IC	Anorganischer Kohlenstoff	mg/l	4.3
Zellzahl	Keimbelastung	l ⁻¹	n.b.

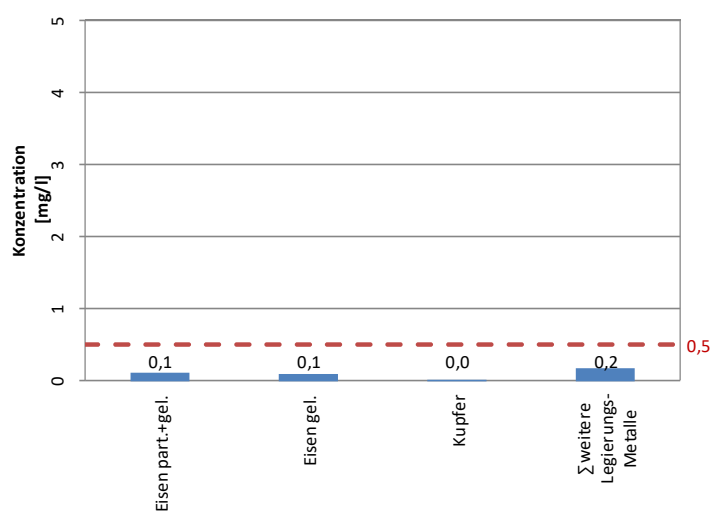
Vor-Ort-Werte

pH	-	9.3
Redoxpotential (gemessen)	mV	-724.5
Sauerstoffgehalt	mg/l	0.059
Leitfähigkeit	µS/cm	117.5
Temperatur	°C	31.1

* 0,00: Wert liegt unterhalb der Nachweisgrenze; n.b. : nicht bestimmt

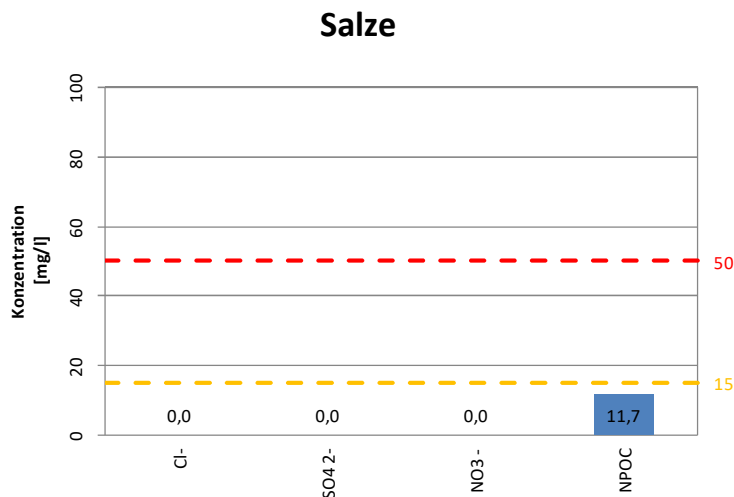


Die folgende Tabelle erläutert die Messergebnisse im Einzelnen einschließlich einer individuellen Bewertung und Handlungsempfehlungen.

Ergebnis**Bewertung und Handlungsempfehlung****Metalle**

Gelöste und partikulär vorkommende Eisenverbindungen, bzw. Kupfer im Systemwasser stellen die Haupt-Korrosionsprodukte dar. Sie sind daher indikativ für aktive Korrosionsprozesse. Gelöstes Eisen stellt die Vorstufe zu partikulären Bestandteilen da. Das Fehlen partikulärer Bestandteile bei einem hohen Anteil gelöster Bestandteile kann verschiedene Ursachen haben: entweder die partikulären Bestandteil werden wirksam gefiltert oder die Korrosionsprozesse sind infolge Sauerstoffmangel zum Erliegen gekommen. Metallgehalte (gelöst) bis zu 0,5 mg/L werden als unkritisch angesehen.

Bewertung: Die Metallgehalte deuten auf eine geringe Eisenkorrosion und auf eine geringe Entzinkung der Buntmetallbauteile hin. Es erfolgt noch keine Kupferkorrosion.

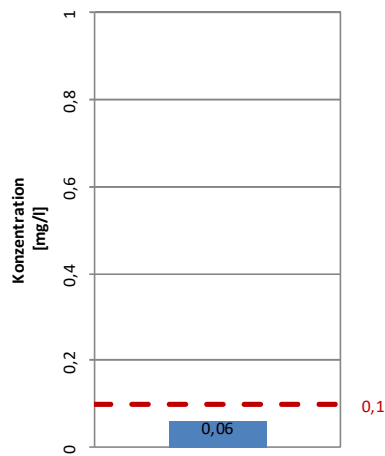


Chlorid, Sulfat und Nitrat fördern als Elektrolyten durch die Erhöhung der Leitfähigkeit die Korrosion. Zusätzlich tragen Nitrat und Sulfat als Nährsalze sowie organischer Kohlenstoff (NPOC) zu einem erhöhten Keim-Wachstum bei. Die Salze werden über das Füllwasser und ggf. über das Nachspeisewasser eingebracht. Organischer Kohlenstoff stammt aus zugesetzten Inhibitoren, geölten und nicht gereinigten Bauteilen oder Kunststoffdichtungen.

Bewertung: Die Herkunft der im geringen Maße nachgewiesenen organischen Kohlenstoffe resultiert vermutlich aus den Mischbettpatronen zur Entsalzung. Die Flächensysteme aus Kunststoff stellen ebenfalls eine potentielle Quelle für organische Kohlenstoffe dar.

Das Vorhandensein von Sauerstoff ist Voraus-

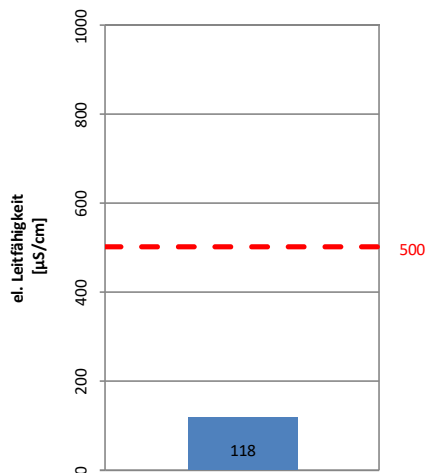
Sauerstoffgehalt



setzung für die nicht-mikrobiell induzierte Korrosion von Eisen und Kupfer. Der Sauerstoffgehalt ist nach Neubefüllung hoch und sinkt in gasdichten Systemen mit der Betriebszeit, weil er durch Korrosionsprozesse aufgebraucht wird. Die Korrosionsprozesse kommen dann zum Erliegen. Aufgrund der Erfahrung nimmt die Korrosionsrate ab einem Sauerstoffgehalt von 0,1 mg/L stark zu. Ein hoher Sauerstoffgehalt bei einem nicht frisch befüllten, geschlossenen System weist auf Gasdiffusion durch dünnwandige Kunststoffrohre, nicht ordnungsgemäße Druckhaltungssysteme oder offene Ausgleichsbehälter hin.

Bewertung: Der Sauerstoffgehalt liegt mit 0,06 mg/L unter dem Grenzwert und weist auf ein ausreichend gasdichtes System hin.

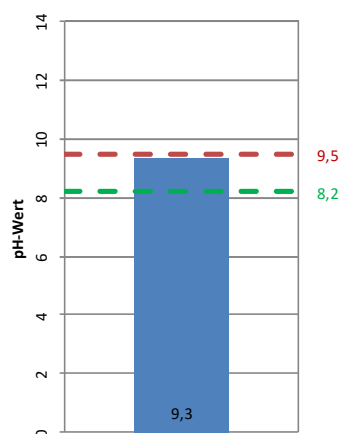
Leitfähigkeit



Die Leitfähigkeit gibt die elektrolytische Eigenschaft des Systemwassers an. Das Korrosionsrisiko steigt mit der Erhöhung der Leitfähigkeit. Entsalztes Wasser weist in der Praxis eine Leitfähigkeit von etwas über 100 µS/cm, Leitungswasser bis zu 1200 µS/cm und mehr auf. In einem Systemwasser ohne Zusatz von Korrosionsschutzmitteln wird eine Leitfähigkeit von < 500 µS/cm zur Vermeidung von Korrosion toleriert.

Bewertung: Die Leitfähigkeit von 118 µS/cm ist deutlich unter dem Grenzwert und unkritisch.

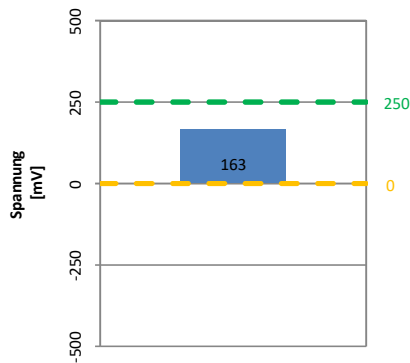
pH - Wert



Der pH-Wert ist ein Hauptindikator für Korrosionsrisiken und sollte zwischen 8,2 und 9,5 liegen. Ist Aluminium im System vorhanden, darf der pH-Wert 8,5 nicht überschreiten.

Bewertung: Der pH-Wert von 9,3 liegt im alkalischen Bereich und hemmt Korrosionsprozesse aber ist ggf. kritisch für Aluminiumbauteile.

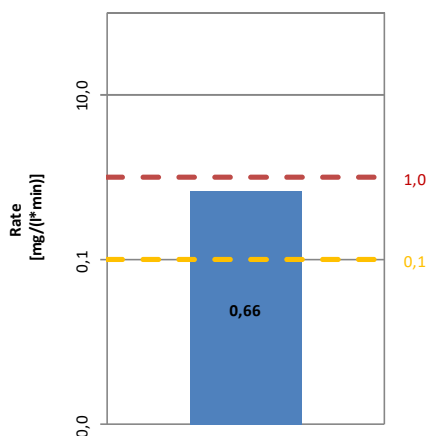
Redoxpotential normiert



Das sauerstoffkorrigierte, auf Standardwasserstoff-elektrode und pH 7 bzw. den Neutralpunkt normierte Redoxpotential gibt in Systemen ohne Wasserbehandlung Aufschluss über den Systemzustand. Es zeigt an, ob sich Eisen(II) als primäres Korrosionsprodukt im System befindet, Sulfid als Produkt mikrobieller Aktivität vorliegt oder der Systemzustand insgesamt unkritisch ist. Ein Redoxpotential über 250 mV ist unkritisch, es liegen keine gelösten Korrosionsprodukte vor. Zwischen 0 mV und 250 mV liegt gelöstes Eisen(II) vor, ein Redoxpotential von unter 0 mV deutet auf sulfatreduzierende Bakterien hin.

Bewertung: Das normierte Redoxpotential von 163 mV weist auf einen guten Systemzustand hin.

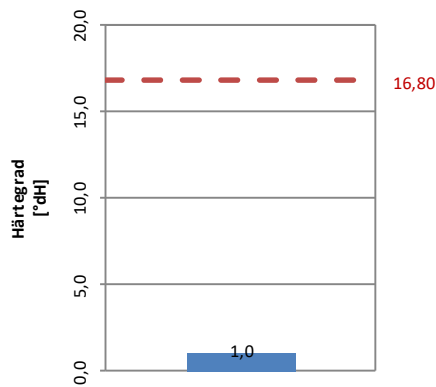
Korrosionsrate



Die Korrosionsrate gibt zum Zeitpunkt der Messung die je Zeiteinheit gebildete Menge der sekundären Korrosionsprodukte an. Aus diesem Wert kann auf Grundlage weiterer anlagenspezifischer Parameter auch der absolute Gesamtertrag an sekundären Korrosionsprodukten und der Materialabtrag in mm/a berechnet werden.

Bewertung: Die berechnete Korrosionsrate von 0,66 mg/(l*min) ist grenzwertig. Der geringe Gehalt an gelösten Metallen bestätigt diesen Befund nicht.

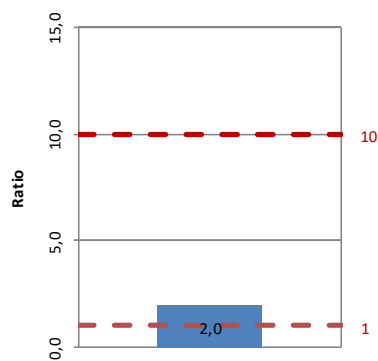
Gesamthärte



Härtebildner bergen die Gefahr der Verkalkung an heißen Bauteilen wie Wärmeübertragern oder Erhitzern. Ihr Grenzwert ist abhängig von dem Vorhandensein entsprechender Anlagenelemente und der Anlagengesamtleistung (gem. VDI 2035 Blatt 1)

Bewertung: Der Wert von 1,0 °dH unterschreitet den Grenzwert nach VDI 2035 Blatt 1 für Anlagen mit einer Leistung von weniger als 50 kW. Es besteht kein Handlungsbedarf.

Stoffmengenanteil $\text{Na}/(\text{Ca}+\text{Mg})$



Das Verhältnis der molaren Konzentrationen von Natrium zu Calcium und Magnesium gibt einen Hinweis auf die Vorbehandlung des Systemwassers. Bei einem Wert unter 1 ist das Wasser unaufbereitet oder vollentsalzt, bei einem Wert über 10 ist es nur enthärtet.

Bewertung: Der gemessene Wert spricht für die Verwendung von verschnittenem vollentsalztem Wasser.

**3.3.2.5 Wasserchemische Analyse 2 vom 04.12.2017**

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Systemwasseranalyse aufgeführt.

Laborwerte

Fe part.+gel.	Eisen partikulär u. gelöst	mg/l	1.08*
Fe gel.	Eisen gelöst	mg/l	0.11
Cu	Kupfer	mg/l	0.06
Zn	Zink	mg/l	1.36
Al	Aluminium	mg/l	0.06
Mn	Mangan	µg/l	20.92
Ni	Nickel	µg/l	67.82
Cr	Chrom	µg/l	25.42
Na	Natrium	mg/l	8.58
K	Kalium	mg/l	1.66
Mg	Magnesium	mg/l	1.58
Ca	Kalzium	mg/l	9.05
Mo	Molybdän	mg/l	n.b.
P	Phosphor	mg/l	0.01
Cl ⁻	Chlorid	mg/l	n.b.
SO ₄ ²⁻	Sulfat	mg/l	n.b.
NO ₃ ⁻	Nitrat	mg/l	n.b.
NPOC	Organischer Kohlenstoff	mg/l	n.b.
IC	Anorganischer Kohlenstoff	mg/l	n.b.
Zellzahl	Keimbelastung	l ⁻¹	n.b.

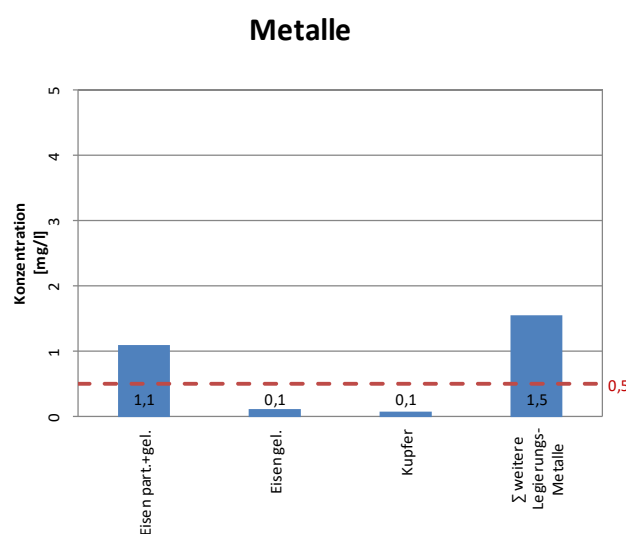
Vor-Ort-Werte

pH	-	9.6
Redoxpotential (gemessen)	mV	-770.5
Sauerstoffgehalt	mg/l	0.043
Leitfähigkeit	µS/cm	143.4
Temperatur	°C	41.0

* 0,00: Wert liegt unterhalb der Nachweisgrenze; n.b. : nicht bestimmt

Die folgende Tabelle erläutert die Messergebnisse im Einzelnen einschließlich einer individuellen Bewertung und Handlungsempfehlungen.

Ergebnis	Bewertung und Handlungsempfehlung
----------	-----------------------------------



Gelöste und partikulär vorkommende Eisenverbindungen, bzw. Kupfer im Systemwasser stellen die Haupt-Korrosionsprodukte dar. Sie sind daher indikativ für aktive Korrosionsprozesse. Gelöstes Eisen stellt die Vorstufe zu partikulären Bestandteilen da. Das Fehlen partikulärer Bestandteile bei einem hohen Anteil gelöster Bestandteile kann verschiedene Ursachen haben: entweder die partikulären Bestandteil werden wirksam gefiltert oder die Korrosionsprozesse sind infolge Sauerstoffmangel zum Erliegen gekommen. Metallgehalte (gelöst) bis zu 0,5 mg/L werden als unkritisch angesehen.

Bewertung: Es sind sehr geringe Mengen gelöstes Eisen vorhanden und höhere Bestandteile an partikulären Bestandteilen. Dies weist darauf hin, dass in der Zwischenzeit stärkere Korrosion stattgefunden hat, die mittlerweile fast abgeklungen ist. Die Gehalte an Zink und Kupfer deuten auf Buntmetallkorrosion hin (Entzinkung und nachfolgend Kupferkorrosion)



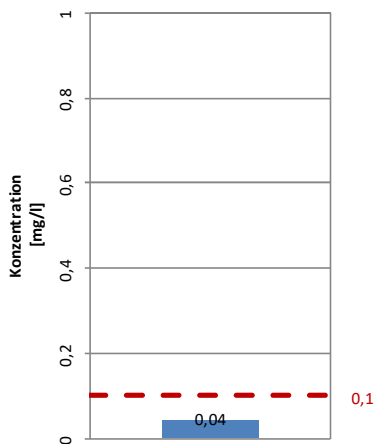
Salze

Nicht bestimmt

Chlorid, Sulfat und Nitrat fördern als Elektrolyten durch die Erhöhung der Leitfähigkeit die Korrosion. Zusätzlich tragen Nitrat und Sulfat als Nährsalze sowie organischer Kohlenstoff (NPOC) zu einem erhöhten Keim-Wachstum bei. Die Salze werden über das Füllwasser und ggf. über das Nachspeisewasser eingebracht. Organischer Kohlenstoff stammt aus zugesetzten Inhibitoren, geölten und nicht gereinigten Bauteilen oder Kunststoff-Dichtungen.

Bewertung: -

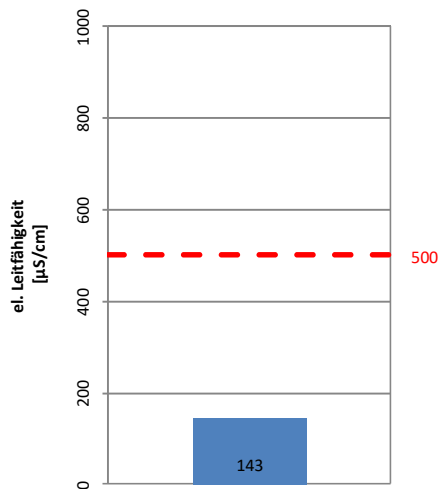
Sauerstoffgehalt



Das Vorhandensein von Sauerstoff ist Voraussetzung für die nicht-mikrobiell induzierte Korrosion von Eisen und Kupfer. Der Sauerstoffgehalt ist nach Neubefüllung hoch und sinkt in gasdichten Systemen mit der Betriebszeit, weil er durch Korrosionsprozesse aufgebraucht wird. Die Korrosionsprozesse kommen dann zum Erliegen. Aufgrund der Erfahrung nimmt die Korrosionsrate ab einem Sauerstoffgehalt von 0,1 mg/L stark zu. Ein hoher Sauerstoffgehalt bei einem nicht frisch befüllten, geschlossenen System weist auf Gasdiffusion durch dünnwandige Kunststoffrohre, nicht ordnungsgemäße Druckhaltungssysteme oder offene Ausgleichsbehälter hin.

Bewertung: Der Sauerstoffgehalt liegt mit 0,04 mg/L unter dem Grenzwert und weist auf ein ausreichend gasdichtes System hin.

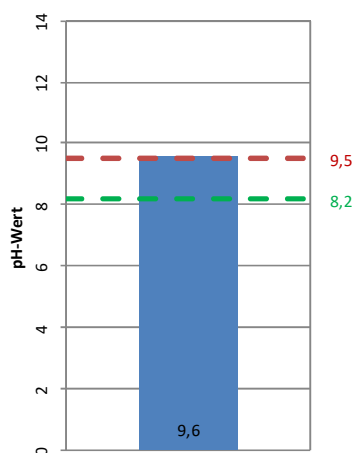
Leitfähigkeit



Die Leitfähigkeit gibt die elektrolytische Eigenschaft des Systemwassers an. Das Korrosionsrisiko steigt mit der Erhöhung der Leitfähigkeit. Entsalztes Wasser weist in der Praxis eine Leitfähigkeit von etwas über 100 µS/cm, Leitungswasser bis zu 1200 µS/cm und mehr auf. In einem Systemwasser ohne Zusatz von Korrosionsschutzmitteln wird eine Leitfähigkeit von < 500 µS/cm zur Vermeidung von Korrosion toleriert.

Bewertung: Die Leitfähigkeit von 143 µS/cm ist deutlich unter dem Grenzwert und unkritisch.

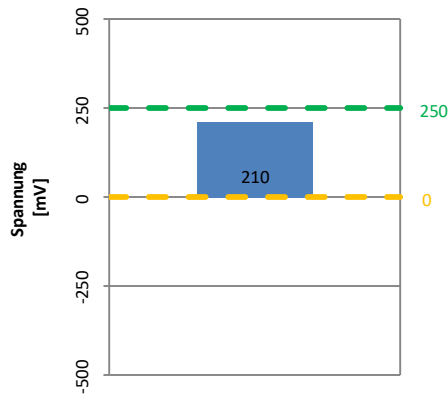
pH - Wert



Der pH-Wert ist ein Hauptindikator für Korrosionsrisiken und sollte zwischen 8,2 und 9,5 liegen. Ist Aluminium im System vorhanden, darf der pH-Wert 8,5 nicht überschreiten.

Bewertung: Der pH-Wert von 9,6 liegt im alkalischen Bereich und hemmt Korrosionsprozesse. Allerdings überschreitet er den Grenzwert für Aluminiumbauteile. Der geringe Gehalt an gelöstem Aluminium weist darauf hin, dass Aluminium bereits in Lösung gegangen ist (0,06 mg/L).

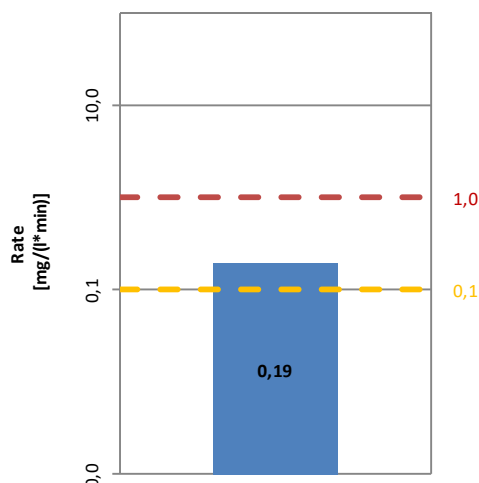
Redoxpotential normiert



Das sauerstoffkorrigierte, auf Standardwasserstoff-elektrode und pH 7 bzw. den Neutralpunkt normierte Redoxpotential gibt in Systemen ohne Wasserbehandlung Aufschluss über den Systemzustand. Es zeigt an, ob sich Eisen(II) als primäres Korrosionsprodukt im System befindet, Sulfid als Produkt mikrobieller Aktivität vorliegt oder der Systemzustand insgesamt unkritisch ist. Ein Redoxpotential über 250 mV ist unkritisch, es liegen keine gelösten Korrosionsprodukte vor. Zwischen 0 mV und 250 mV liegt gelöstes Eisen(II) vor, ein Redoxpotential von unter 0 mV deutet auf sulfatreduzierende Bakterien hin.

Bewertung: Das normierte Redoxpotential von 210 mV weist auf einen guten Systemzustand hin.

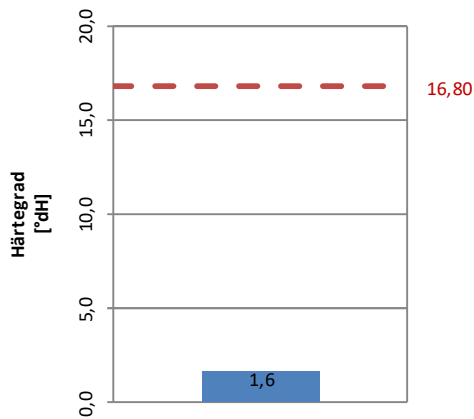
Korrosionsrate



Die Korrosionsrate gibt zum Zeitpunkt der Messung die je Zeiteinheit gebildete Menge der sekundären Korrosionsprodukte an. Aus diesem Wert kann auf Grundlage weiterer anlagenspezifischer Parameter auch der absolute Gesamtertrag an sekundären Korrosionsprodukten und der Materialabtrag in mm/a berechnet werden.

Bewertung: Die berechnete Korrosionsrate hat im Vergleich zur letzten Analyse etwas abgenommen.

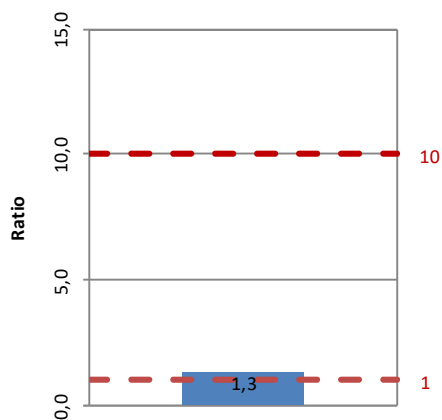
Gesamthärte



Härtebildner bergen die Gefahr der Verkalkung an heißen Bauteilen wie Wärmeübertragern oder Erhitzern. Ihr Grenzwert ist abhängig von dem Vorhandensein entsprechender Anlagenelemente und der Anlagengesamtleistung (gem. VDI 2035 Blatt 1)

Bewertung: Der Wert von 1,6 °dH unterschreitet den Grenzwert nach VDI 2035 Blatt 1 für Anlagen mit einer Leistung von weniger als 50 kW. Es besteht kein Handlungsbedarf.

Stoffmengenanteil $\text{Na}/(\text{Ca}+\text{Mg})$



Das Verhältnis der molaren Konzentrationen von Natrium zu Calcium und Magnesium gibt einen Hinweis auf die Vorbehandlung des Systemwassers. Bei einem Wert unter 1 ist das Wasser unaufbereitet oder vollentsalzt, bei einem Wert über 10 ist es nur enthärtet.

Bewertung: Der gemessene Wert bestätigt die Verwendung von vollentsalztem Wasser.

**3.3.2.6 Wasserchemische Analyse 3 vom 27.02.2018**

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Systemwasseranalyse aufgeführt.

Laborwerte

Fe part.+gel.	Eisen partikulär u. gelöst	mg/l	0.01*
Fe gel.	Eisen gelöst	mg/l	0.01
Cu	Kupfer	mg/l	0.01
Zn	Zink	mg/l	0.00
Al	Aluminium	mg/l	0.08
Mn	Mangan	µg/l	2.53
Ni	Nickel	µg/l	0.00
Cr	Chrom	µg/l	2.46
Na	Natrium	mg/l	8.94
K	Kalium	mg/l	1.28
Mg	Magnesium	mg/l	1.24
Ca	Kalzium	mg/l	6.46
Mo	Molybdän	mg/l	n.b.
P	Phosphor	mg/l	0.04
Cl ⁻	Chlorid	mg/l	n.b.
SO ₄ ²⁻	Sulfat	mg/l	n.b.
NO ₃ ⁻	Nitrat	mg/l	n.b.
NPOC	Organischer Kohlenstoff	mg/l	n.b.
IC	Anorganischer Kohlenstoff	mg/l	n.b.
Zellzahl	Keimbelastung	l ⁻¹	n.b.

Vor-Ort-Werte

pH	-	10.0
Redoxpotential (gemessen)	mV	-796.6
Sauerstoffgehalt	mg/l	0.048
Leitfähigkeit	µS/cm	142.3
Temperatur	°C	39.8

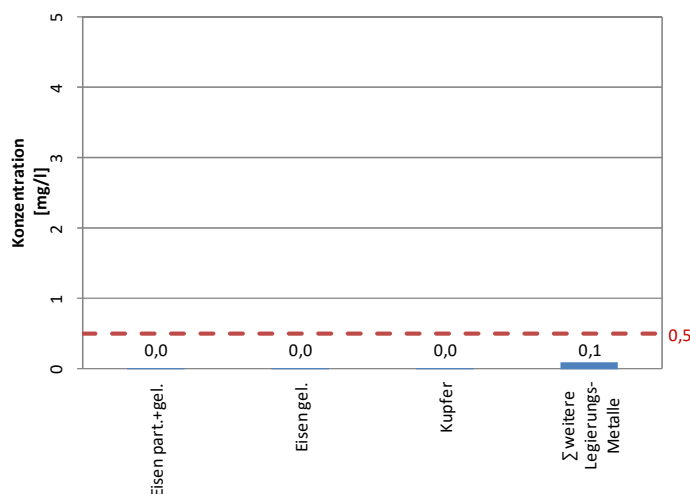
* 0,00: Wert liegt unterhalb der Nachweisgrenze; n.b. : nicht bestimmt

Die folgende Tabelle erläutert die Messergebnisse im Einzelnen einschließlich einer individuellen Bewertung und Handlungsempfehlungen.

Ergebnis

Bewertung und Handlungsempfehlung

Metalle



Gelöste und partikulär vorkommende Eisenverbindungen, bzw. Kupfer im Systemwasser stellen die Haupt-Korrosionsprodukte dar. Sie sind daher indikativ für aktive Korrosionsprozesse. Gelöstes Eisen stellt die Vorstufe zu partikulären Bestandteilen da. Das Fehlen partikulärer Bestandteile bei einem hohen Anteil gelöster Bestandteile kann verschiedene Ursachen haben: entweder die partikulären Bestandteil werden wirksam gefiltert oder die Korrosionsprozesse sind infolge Sauerstoffmangel zum Erliegen gekommen. Metallgehalte (gelöst) bis zu 0,5 mg/L werden als unkritisch angesehen.

Bewertung: Im Vergleich zur vorangegangene Probe sind die geringen Korrosionsvorgänge zum Erliegen gekommen. Im Vergleich zur letzten Probe wird etwas mehr Aluminium nachgewiesen (0,08 statt 0,06 mg/L). Der Gehalt ist jedoch unkritisch.

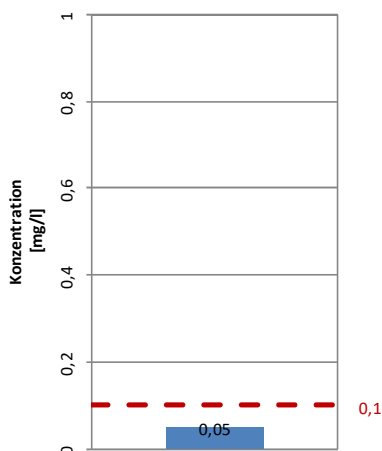
Salze

Nicht bestimmt

Chlorid, Sulfat und Nitrat fördern als Elektrolyten durch die Erhöhung der Leitfähigkeit die Korrosion. Zusätzlich tragen Nitrat und Sulfat als Nährsalze sowie organischer Kohlenstoff (NPOC) zu einem erhöhten Keim-Wachstum bei. Die Salze werden über das Füllwasser und ggf. über das Nachspeisewasser eingebracht. Organischer Kohlenstoff stammt aus zugesetzten Inhibitoren, geölten und nicht gereinigten Bauteilen oder Kunststoff-Dichtungen.

Bewertung: -

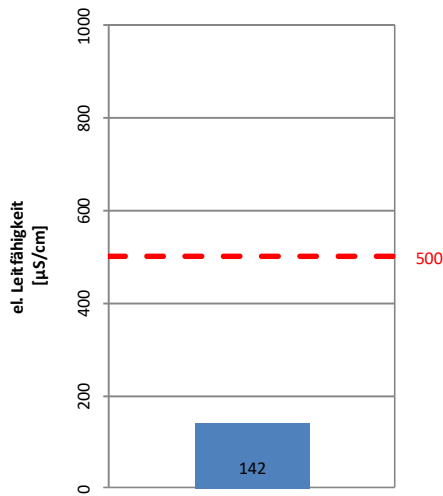
Sauerstoffgehalt



Das Vorhandensein von Sauerstoff ist Voraussetzung für die nicht-mikrobiell induzierte Korrosion von Eisen und Kupfer. Der Sauerstoffgehalt ist nach Neubefüllung hoch und sinkt in gasdichten Systemen mit der Betriebszeit, weil er durch Korrosionsprozesse aufgebraucht wird. Die Korrosionsprozesse kommen dann zum Erliegen. Aufgrund der Erfahrung nimmt die Korrosionsrate ab einem Sauerstoffgehalt von 0,1 mg/L stark zu. Ein hoher Sauerstoffgehalt bei einem nicht frisch befüllten, geschlossenen System weist auf Gasdiffusion durch dünnwandige Kunststoffrohre, nicht ordnungsgemäße Druckhaltungssysteme oder offene Ausgleichsbehälter hin.

Bewertung: Der Sauerstoffgehalt liegt mit 0,05 mg/L unter dem Grenzwert und weist auf ein ausreichend gasdichtes System hin.

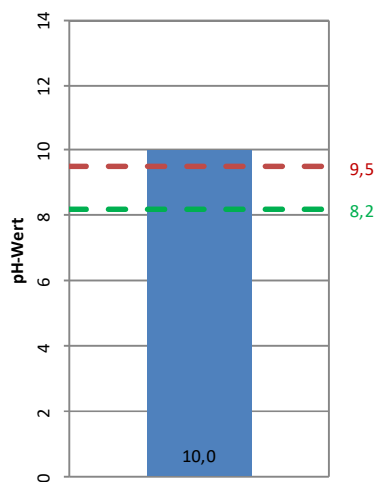
Leitfähigkeit



Die Leitfähigkeit gibt die elektrolytische Eigenschaft des Systemwassers an. Das Korrosionsrisiko steigt mit der Erhöhung der Leitfähigkeit. Entsalztes Wasser weist in der Praxis eine Leitfähigkeit von etwas über 100 $\mu\text{S/cm}$, Leitungswasser bis zu 1200 $\mu\text{S/cm}$ und mehr auf. In einem Systemwasser ohne Zusatz von Korrosionsschutzmitteln wird eine Leitfähigkeit von < 500 $\mu\text{S/cm}$ zur Vermeidung von Korrosion toleriert.

Bewertung: Die Leitfähigkeit von 142 $\mu\text{S/cm}$ ist deutlich unter dem Grenzwert und unkritisch.

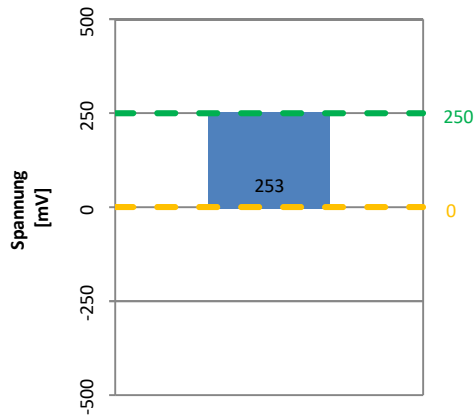
pH - Wert



Der pH-Wert ist ein Hauptindikator für Korrosionsrisiken und sollte zwischen 8,2 und 9,5 liegen. Ist Aluminium im System vorhanden, darf der pH-Wert 8,5 nicht überschreiten.

Bewertung: Der pH-Wert von 10,0 liegt im alkalischen Bereich und hemmt Korrosionsprozesse. Allerdings überschreitet er den Grenzwert für Aluminiumbauteile. Der Gehalt an gelöstem Aluminium weist darauf hin, dass Aluminium bereits in Lösung gegangen ist (0,08 mg/L).

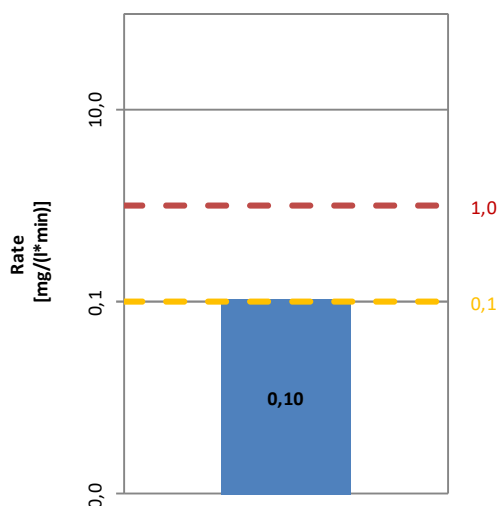
Redoxpotential normiert



Das sauerstoffkorrigierte, auf Standardwasserstoff-elektrode und pH 7 bzw. den Neutralpunkt normierte Redoxpotential gibt in Systemen ohne Wasserbehandlung Aufschluss über den Systemzustand. Es zeigt an, ob sich Eisen(II) als primäres Korrosionsprodukt im System befindet, Sulfid als Produkt mikrobieller Aktivität vorliegt oder der Systemzustand insgesamt unkritisch ist. Ein Redoxpotential über 250 mV ist unkritisch, es liegen keine gelösten Korrosionsprodukte vor. Zwischen 0 mV und 250 mV liegt gelöstes Eisen(II) vor, ein Redoxpotential von unter 0 mV deutet auf sulfatreduzierende Bakterien hin.

Bewertung: Das normierte Redoxpotential von 253 mV weist auf einen guten Systemzustand hin.

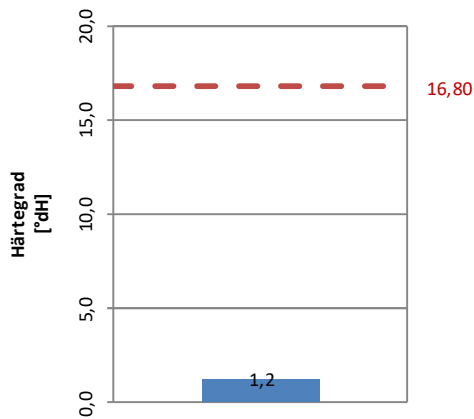
Korrosionsrate



Die Korrosionsrate gibt zum Zeitpunkt der Messung die je Zeiteinheit gebildete Menge der sekundären Korrosionsprodukte an. Aus diesem Wert kann auf Grundlage weiterer anlagenspezifischer Parameter auch der absolute Gesamtertrag an sekundären Korrosionsprodukten und der Materialabtrag in mm/a berechnet werden.

Bewertung: Die Korrosionsrate hat im Vergleich zur letzten Analyse weiter abgenommen. Derzeit finden nur vernachlässigbar geringe Korrosionsvorgänge statt. Die nicht mehr nachweisbaren Metallgehalte (bis auf Aluminium) bestätigen diesen Wert.

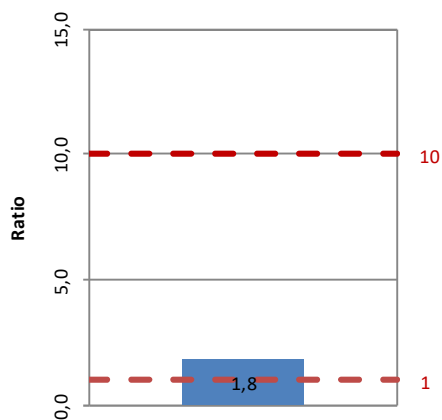
Gesamthärte



Härtebildner bergen die Gefahr der Verkalkung an heißen Bauteilen wie Wärmeübertragern oder Erhitzern. Ihr Grenzwert ist abhängig von dem Vorhandensein entsprechender Anlagenelemente und der Anlagengesamtleistung (gem. VDI 2035 Blatt 1)

Bewertung: Der Wert von 1,2 °dH unterschreitet den Grenzwert nach VDI 2035 Blatt 1 für Anlagen mit einer Leistung von weniger als 50 kW. Es besteht kein Handlungsbedarf.

Stoffmengenanteil $\text{Na}/(\text{Ca}+\text{Mg})$



Das Verhältnis der molaren Konzentrationen von Natrium zu Calcium und Magnesium gibt einen Hinweis auf die Vorbehandlung des Systemwassers. Bei einem Wert unter 1 ist das Wasser unaufbereitet oder vollentsalzt, bei einem Wert über 10 ist es nur enthärtet.

Bewertung: Der gemessene Wert bestätigt die Verwendung von vollentsalztem Wasser.

**3.3.2.7 Wasserchemische Analyse 4 vom 02.05.2018**

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Systemwasseranalyse aufgeführt.

Laborwerte

Fe part.+gel.	Eisen partikulär u. gelöst	mg/l	0.06*
Fe gel.	Eisen gelöst	mg/l	0.01
Cu	Kupfer	mg/l	0.00
Zn	Zink	mg/l	0.05
Al	Aluminium	mg/l	0.17
Mn	Mangan	µg/l	0.19
Ni	Nickel	µg/l	0.00
Cr	Chrom	µg/l	0.00
Na	Natrium	mg/l	8.49
K	Kalium	mg/l	0.96
Mg	Magnesium	mg/l	0.97
Ca	Kalzium	mg/l	4.72
Mo	Molybdän	mg/l	n.b.
P	Phosphor	mg/l	0.03
Cl ⁻	Chlorid	mg/l	n.b.
SO ₄ ²⁻	Sulfat	mg/l	n.b.
NO ₃ ⁻	Nitrat	mg/l	n.b.
NPOC	Organischer Kohlenstoff	mg/l	n.b.
IC	Anorganischer Kohlenstoff	mg/l	n.b.
Zellzahl	Keimbelastung	l ⁻¹	n.b.

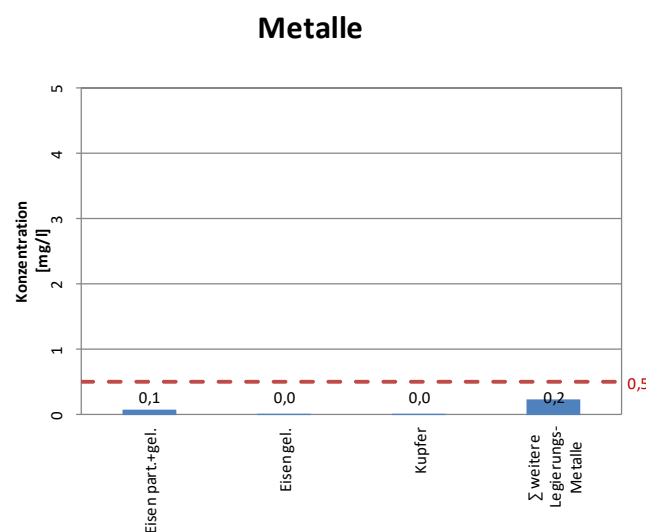
Vor-Ort-Werte

pH	-	10.6
Redoxpotential (gemessen)	mV	-838.6
Sauerstoffgehalt	mg/l	0.071
Leitfähigkeit	µS/cm	119.4
Temperatur	°C	30.7

* 0,00: Wert liegt unterhalb der Nachweisgrenze; n.b. : nicht bestimmt

Die folgende Tabelle erläutert die Messergebnisse im Einzelnen einschließlich einer individuellen Bewertung und Handlungsempfehlungen.

Ergebnis	Bewertung und Handlungsempfehlung
----------	-----------------------------------



Gelöste und partikulär vorkommende Eisenverbindungen, bzw. Kupfer im Systemwasser stellen die Haupt-Korrosions-produkte dar. Sie sind daher indikativ für aktive Korrosions-prozesse. Gelöstes Eisen stellt die Vorstufe zu partikulären Bestandteilen da. Das Fehlen partikulärer Bestandteile bei einem hohen Anteil gelöster Bestandteile kann verschiedene Ursachen haben: entweder die partikulären Bestandteil werden wirksam gefiltert oder die Korrosions-prozesse sind infolge Sauerstoff-mangel zum Erliegen gekommen. Metallgehalte (gelöst) bis zu 0,5 mg/L werden als unkritisch angesehen.

Bewertung: Die Metallgehalte deuten auf eine geringe Eisenkorrosion und auf Entzinkung der Buntmetallbauteile hin. Es erfolgt keine Kupferkorrosion. Weiterhin geht mehr Aluminium in Lösung als zuvor. Grund dafür ist der zu hohe pH-Wert. Trotzdem ist der Gehalt an Aluminium immer noch unkritisch.



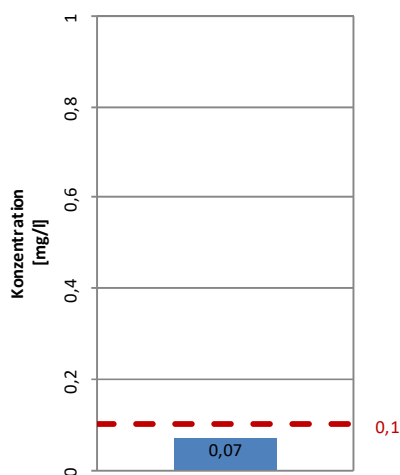
Salze

Nicht bestimmt

Chlorid, Sulfat und Nitrat fördern als Elektrolyten durch die Erhöhung der Leitfähigkeit die Korrosion. Zusätzlich tragen Nitrat und Sulfat als Nährsalze sowie organischer Kohlenstoff (NPOC) zu einem erhöhten Keim-Wachstum bei. Die Salze werden über das Füllwasser und ggf. über das Nachspeisewasser eingebracht. Organischer Kohlenstoff stammt aus zugesetzten Inhibitoren, geölten und nicht gereinigten Bauteilen oder Kunststoff-Dichtungen.

Bewertung: -

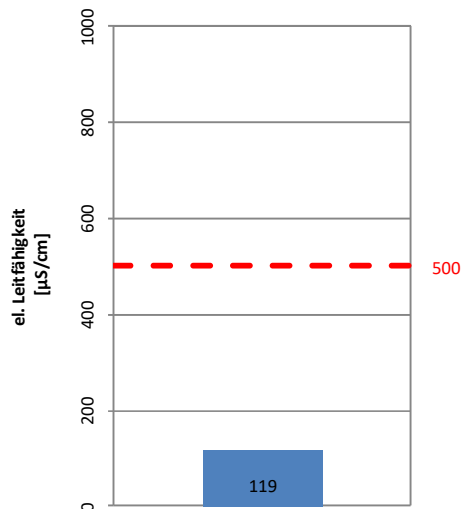
Sauerstoffgehalt



Das Vorhandensein von Sauerstoff ist Voraussetzung für die nicht-mikrobiell induzierte Korrosion von Eisen und Kupfer. Der Sauerstoffgehalt ist nach Neubefüllung hoch und sinkt in gasdichten Systemen mit der Betriebszeit, weil er durch Korrosionsprozesse aufgebraucht wird. Die Korrosionsprozesse kommen dann zum Erliegen. Aufgrund der Erfahrung nimmt die Korrosionsrate ab einem Sauerstoffgehalt von 0,1 mg/L stark zu. Ein hoher Sauerstoffgehalt bei einem nicht frisch befüllten, geschlossenen System weist auf Gasdiffusion durch dünnwandige Kunststoffrohre, nicht ordnungsgemäße Druckhaltungssysteme oder offene Ausgleichsbehälter hin.

Bewertung: Der Sauerstoffgehalt liegt mit 0,07 mg/L unter dem Grenzwert und weist auf ein ausreichend gasdichtes System hin.

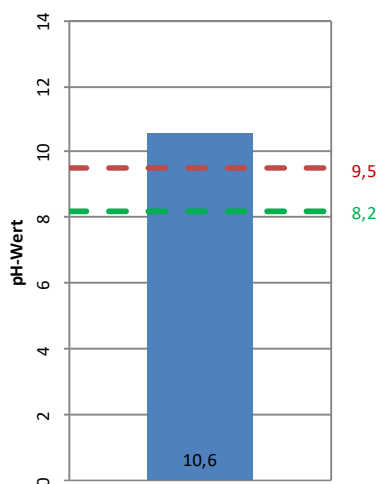
Leitfähigkeit



Die Leitfähigkeit gibt die elektrolytische Eigenschaft des Systemwassers an. Das Korrosionsrisiko steigt mit der Erhöhung der Leitfähigkeit. Entsalztes Wasser weist in der Praxis eine Leitfähigkeit von etwas über 100 µS/cm, Leitungswasser bis zu 1200 µS/cm und mehr auf. In einem Systemwasser ohne Zusatz von Korrosionsschutzmitteln wird eine Leitfähigkeit von < 500 µS/cm zur Vermeidung von Korrosion toleriert.

Bewertung: Die Leitfähigkeit von 119 µS/cm ist deutlich unter dem Grenzwert und unkritisch.

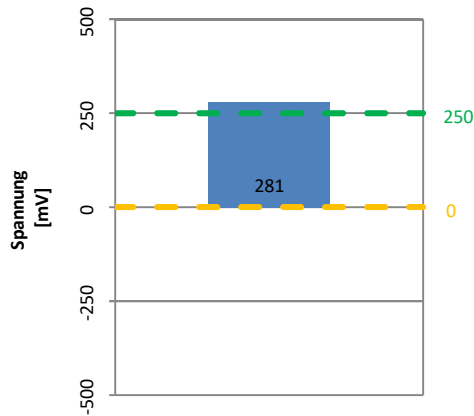
pH - Wert



Der pH-Wert ist ein Hauptindikator für Korrosionsrisiken und sollte zwischen 8,2 und 9,5 liegen. Ist Aluminium im System vorhanden, darf der pH-Wert 8,5 nicht überschreiten.

Bewertung: Der pH-Wert von 10,6 liegt im alkalischen Bereich und hemmt Korrosionsprozesse. Allerdings sind Aluminium-Bauteile gefährdet.

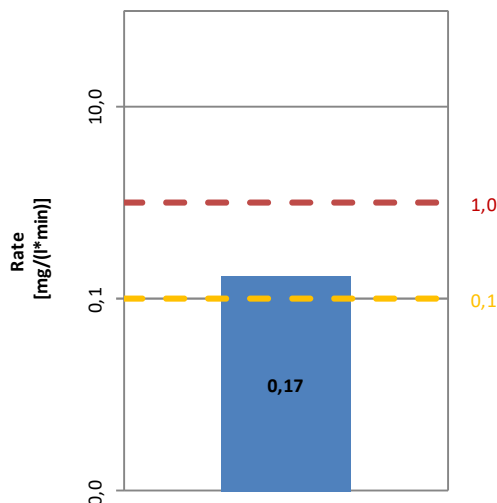
Redoxpotential normiert



Das sauerstoffkorrigierte, auf Standardwasserstoff-elektrode und pH 7 bzw. den Neutralpunkt normierte Redoxpotential gibt in Systemen ohne Wasserbehandlung Aufschluss über den Systemzustand. Es zeigt an, ob sich Eisen(II) als primäres Korrosionsprodukt im System befindet, Sulfid als Produkt mikrobieller Aktivität vorliegt oder der Systemzustand insgesamt unkritisch ist. Ein Redoxpotential über 250 mV ist unkritisch, es liegen keine gelösten Korrosionsprodukte vor. Zwischen 0 mV und 250 mV liegt gelöstes Eisen(II) vor, ein Redoxpotential von unter 0 mV deutet auf sulfatreduzierende Bakterien hin.

Bewertung: Das normierte Redoxpotential von 281 mV weist auf einen guten Systemzustand hin.

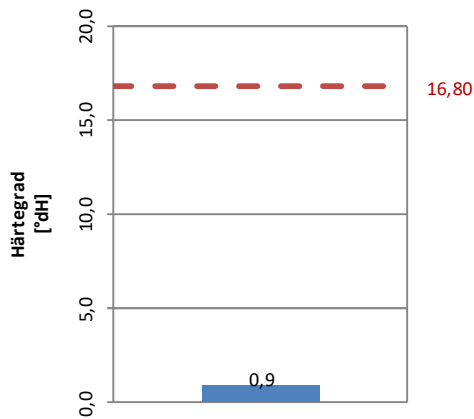
Korrosionsrate



Die Korrosionsrate gibt zum Zeitpunkt der Messung die je Zeiteinheit gebildete Menge der sekundären Korrosionsprodukte an. Aus diesem Wert kann auf Grundlage weiterer anlagenspezifischer Parameter auch der absolute Gesamtertrag an sekundären Korrosionsprodukten und der Materialabtrag in mm/a berechnet werden.

Bewertung: Die Korrosionsrate hat im Vergleich zur letzten Analyse geringfügig zugenommen, befindet sich jedoch weiter auf einem geringen Niveau.

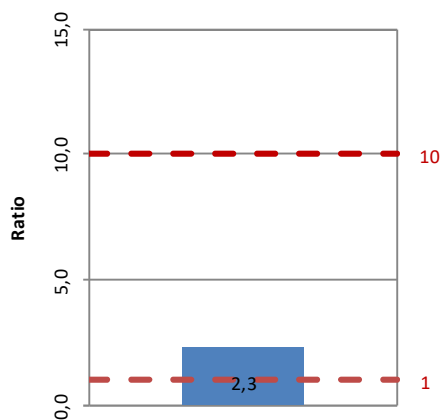
Gesamthärte



Härtebildner bergen die Gefahr der Verkalkung an heißen Bauteilen wie Wärmeübertragern oder Erhitzern. Ihr Grenzwert ist abhängig von dem Vorhandensein entsprechender Anlagenelemente und der Anlagengesamtleistung (gem. VDI 2035 Blatt 1)

Bewertung: Der Wert von 0,9 °dH unterschreitet den Grenzwert nach VDI 2035 Blatt 1 für Anlagen mit einer Leistung von weniger als 50 kW. Es besteht kein Handlungsbedarf.

Stoffmengenanteil $\text{Na}/(\text{Ca}+\text{Mg})$



Das Verhältnis der molaren Konzentrationen von Natrium zu Calcium und Magnesium gibt einen Hinweis auf die Vorbehandlung des Systemwassers. Bei einem Wert unter 1 ist das Wasser unaufbereitet oder vollentsalzt, bei einem Wert über 10 ist es nur enthärtet.

Bewertung: Der gemessene Wert bestätigt die Verwendung von vollentsalztem Wasser.

3.3.3 Objekt 10 (Kühlsystem)

Mikrobiologische Analyse 1 vom 17.07.2014

Im Folgenden sind die Anteile der Spezies auf der Basis Ihrer Stoffwechselfunktionen dargestellt.

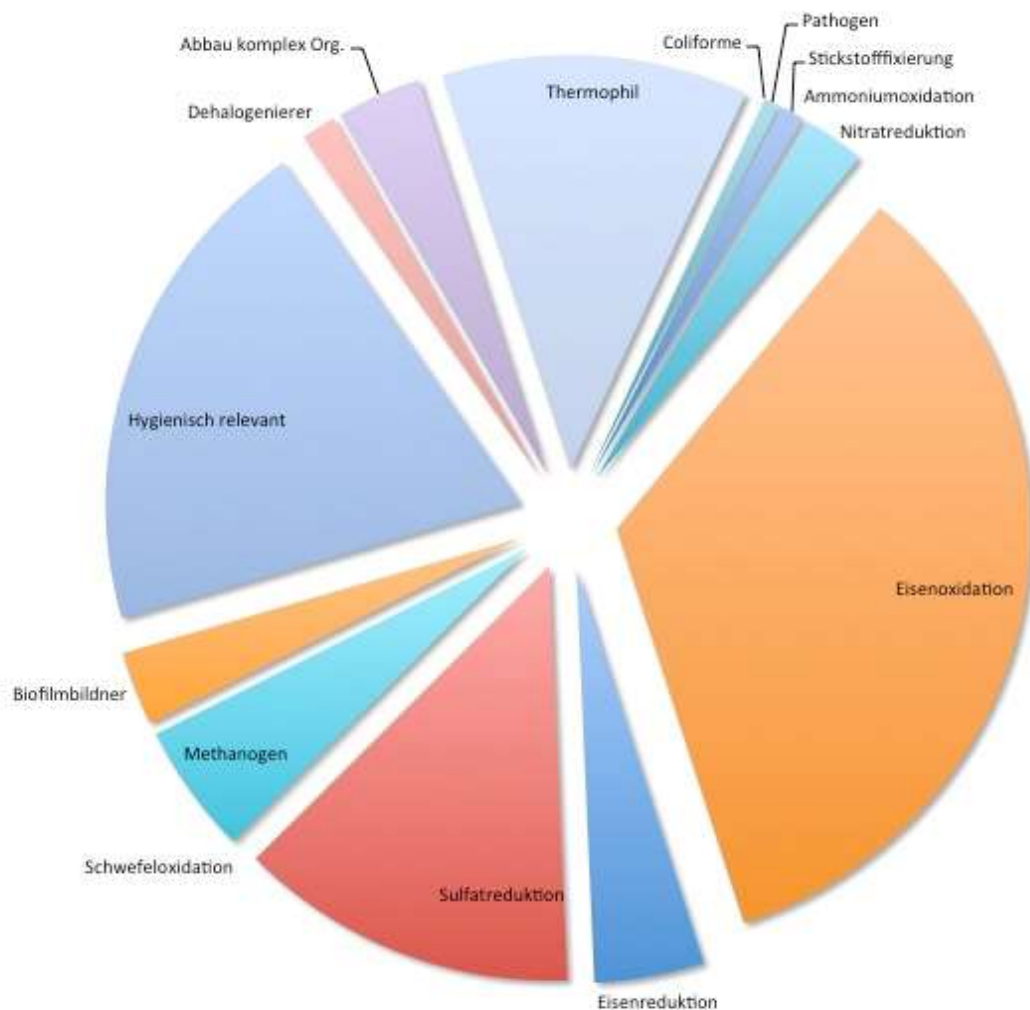


Abb. 83: Anteile der Gattungen auf Basis ihrer Stoffwechselfunktion

Die Probe enthält Eisenoxidierer und viele als thermophil bekannte Organismen und weist ein breites Artenspektrum auf, siehe Abb. 83. Jedoch dominieren eindeutig drei Organismengruppen. *Sediminibacterium* mit 35 %, *Erysipelothrix* mit 21 % und der Sulfatreduzierer *Desulfotomaculum* mit 13 % Anteil an der Gesamtheit aller detektierten Sequenzdaten. Die Probe weist Bakterien auf, die zum Abbau komplexer Organik (*Acetobacterium* und *Propionivibrio*) befähigt sind und organische Säuren bilden. Auch scheint der Eisenkreislauf eine starke Rolle im System zu spielen.

Es konnte auch ein geringerer Anteil an Dehalogenierern detektiert werden, diese sind in der Lage chlorierte organische Moleküle zu verwerten.

Clostridien konnten auch in der Population detektiert werden, diese scheinen jedoch nur in sehr geringem Verhältnis in der gesamten Population vertreten zu sein.

Im Folgenden sind die einzelnen Spezies dargestellt, siehe Tab. 38 Anteile der einzelnen .

Tab. 38 Anteile der einzelnen Gattungen

Gattung	Anteil in %	Gattung	Anteil in %	Gattung	Anteil in %	Gattung	Anteil in %	Gattung	Anteil in %
Sediminibacterium	35,31	Alicyclophilus	0,28	Buttiauxella	0,05	Pedobacter	0,010	Porphyromonas	0,005
Erysipelothrix	21,62	Curtobacterium	0,27	Enterobacter	0,05	Orientia	0,010	Turicibacter	0,005
Desulfotomaculum	13,06	Flavobacterium	0,26	Orenia	0,04	Chlorochromatium	0,010	Roseococcus	0,005
Acetobacterium	5,56	Actinotalea	0,24	Cellulomonas	0,04	Synechococcus	0,010	Gallionella	0,005
Propionivibrio	3,07	Kluyvera	0,24	Stenotrophomonas	0,04	Pelotomaculum	0,010	Alicyclobacillus	0,005
Blastomonas	2,94	Dechloromonas	0,23	Cedecea	0,04	Nitrobacter	0,010	Helcococcus	0,005
Ferribacterium	2,61	Propionibacterium	0,22	Diaphorobacter	0,03	Gelria	0,010	Chitinophaga	0,005
Desulfosporosinus	2,08	Pseudomonas	0,21	Selenihalanaerobacter	0,03	Citrobacter	0,010	Candidatus Phytoplasma	0,005
Acidovorax	1,96	Pelomonas	0,20	Variovorax	0,03	Clostridium	0,010	Bacillus	0,005
Desulfovibrio	1,40	Aflipia	0,19	Zoogloea	0,03	Candidatus Bacilloplasma	0,005	Brachybacterium	0,005
Rhodopseudomonas	1,06	Cupriavidus	0,19	Propionimonas	0,03	Neisseria	0,005	Caminicella	0,005
Azospira	1,04	Cloacibacterium	0,18	Pseudorhodoferrax	0,02	Selenomonas	0,005	Xanthomonas	0,005
Brevundimonas	0,77	Methylobacterium	0,16	Azoarcus	0,02	Gemella	0,005	Sphingopyxis	0,005
Tessaracoccus	0,68	Corynebacterium	0,12	Herbaspirillum	0,02	Prevotella	0,005	Arthrobacter	0,005
Bosea	0,52	Novosphingobium	0,12	Erythrobacter	0,01	Candidatus Solibacter	0,005	Bradyrhizobium	0,005
Staphylococcus	0,49	Aquabacterium	0,09	Psychrobacter	0,01	Flavisolibacter	0,005	Pandoraea	0,005
Marinobacter	0,43	Rhizobium	0,09	Ralstonia	0,01	Brooklawia	0,005	Ochrobactrum	0,005
Acinetobacter	0,38	Microbacterium	0,09	Dialister	0,01	Micrococcus	0,005	Microcystis	0,005
Lutispora	0,34	Leptospira	0,07	Holdemania	0,01	Burkholderia	0,005	Rheinheimera	0,005
Streptococcus	0,31	Kocuria	0,06	Streptomyces	0,01	Thiobacillus	0,005	Nitrospira	0,005

Sediminibacterium spp., *Erysipelothrix* spp., *Desulfotomaculum* spp., *Acetobacterium* spp. und *Propionivibrio* spp. konnten als nächste Verwandte der dominanten Bakterien in der Population identifiziert werden. Im Folgenden sollen die wesentlichen Merkmale dieser Bakterien genauer dargestellt werden.

Bakterien der Gattung ***Sediminibacterium*** sind in der Lage Eisen zu oxidieren und konnten bereits aus korrodierten Eisenleitungen in Grauwassersystemen isoliert werden.

Erysipelothrix können in Abwasser, in Fischdärmen und in kontaminierten Böden gefunden werden. Sie sind vor allem als Pathogen bei Tieren bekannt. Einige Arten können jedoch auch beim Menschen Krankheiten auslösen (Wundrose).

Bakterien der Gattung ***Desulfotomaculum*** gehören auch zur Ordnung der *Clostridiales* und können in der Regel in Grundwasser, im Sedimentgestein oder im Kot von Tieren, bei geringen Sauerstoffkonzentrationen, gefunden werden. Bei *Desulfotomaculum* spp. handelt es sich um sulfatreduzierende Bakterien.



Acetobacterien sind Essigsäurebakterien, welche Methan produzieren können. Daher sind sie unter anderem auch von industriellem Interesse.

Bakterien der Gattung ***Propionivibrio*** sind fermentative Bakterien die auf den Abbau von hydroaromatischen Verbindungen spezialisiert sind.

3.3.3.2 Mikrobiologische Analyse 2 vom 17.11.2015

Im Folgenden werden die Anteile der Spezies auf der Basis Ihrer Stoffwechselfunktionen dargestellt.

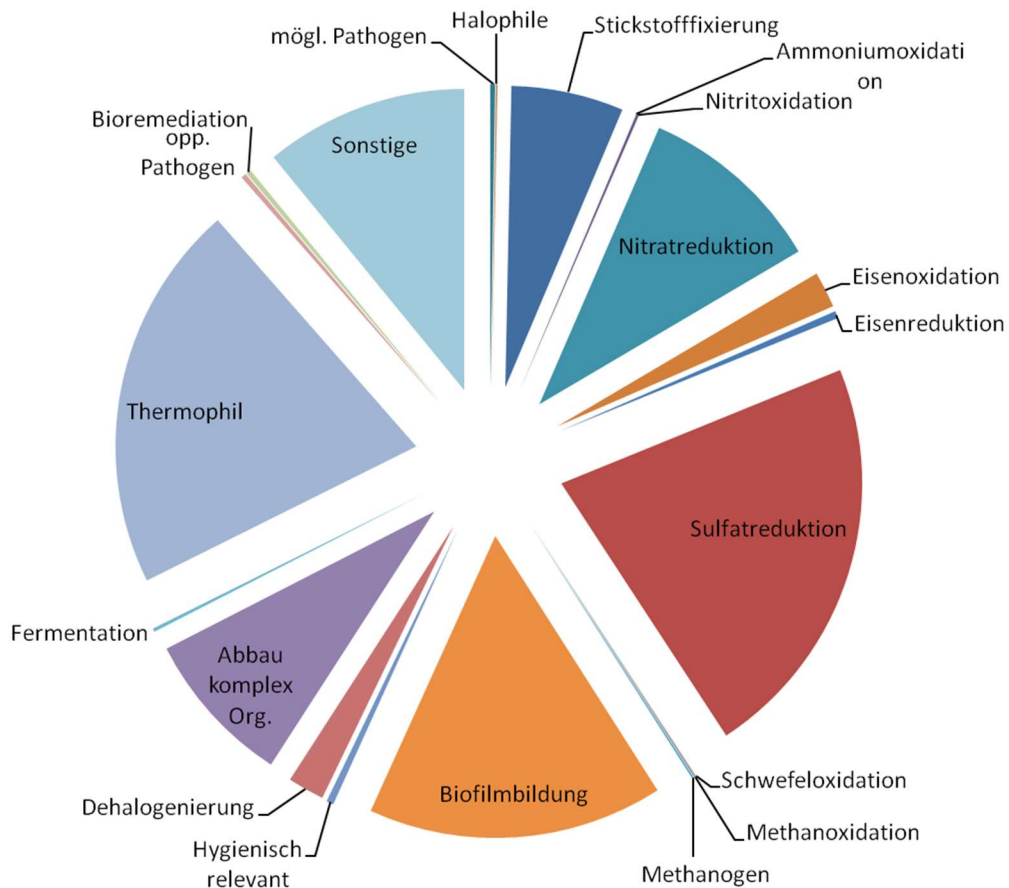


Abb. 84: Anteile der Gattungen auf Basis ihrer Stoffwechselfunktion

Bei dieser Probe sind vor allem thermophile Bakterien, Sulfatreduzierer und Biofilmbildner auffällig, siehe Abb. 84. Die Anwesenheit von Nitratreduzierern und Sulfatreduzierern deutet auf Nachspeisung mit Leitungswasser hin.



Im Folgenden sind die einzelnen Spezies dargestellt, siehe Tab. 39

Tab. 39 Anteile der einzelnen Gattungen

Gattung	Anteil in %	Gattung	Anteil in %	Gattung	Anteil in %
Desulfotomaculum	24,16	Aquabacterium	0,81	Magnetospirillum	0,20
Pseudomonas	9,95	Candidatus Accumulibacter	0,65	Erysipelothrix	0,20
Blastomonas	9,72	Smithella	0,56	Delftia	0,17
Pseudoxanthomonas	7,23	Simplicispira	0,48	Aquicella	0,17
Brevundimonas	6,92	Silanimonas	0,45	Propionibacterium	0,16
Azospira	5,19	Novosphingobium	0,45	Thermodesulfovibrio	0,14
Desulfovibrio	3,08	Roseococcus	0,43	Achromobacter	0,14
Phreatobacter	3,00	Variibacter	0,40	Alicyclophilus	0,14
Desulfurispora	2,52	Rhodanobacter	0,33	Lutispora	0,14
Bradyrhizobium	2,34	Methylothermobacter	0,32	Woodsholea	0,13
Pseudorhodospira	2,11	Variovorax	0,31	Dechloromonas	0,13
Sphingopyxis	1,79	Rhodopseudomonas	0,30	Staphylococcus	0,13
Sulfurovum	1,62	Xanthobacter	0,29	Acetobacterium	0,12
Sediminibacterium	1,41	Ferribacterium	0,25	Candidatus Nitrotoga	0,12
Tepidimonas	1,14	Massilia	0,24	Moraxella	0,12
Caulobacter	1,09	Propionivibrio	0,22	Sphingomonas	0,11
Reyranella	1,05	Geothrix	0,22	Cloacibacterium	0,11
Hydrogenophaga	0,96	vadinBC27 w astew ater-sludge	0,22	Alcaligenes	0,11
Acidovorax	0,95	Bacillus	0,22	Curvibacter	0,09
Phenylobacterium	0,88	Bosea	0,21	Zoogloea	0,09

Desulfotomaculum spp., *Pseudomonas* spp., *Blastomonas* spp., *Pseudoxanthomonas* spp., *Brevundimonas* spp. konnten als nächste Verwandte der bestimmbareren, dominanten Bakterien in der Population identifiziert werden. Im Folgenden sollen die wesentlichen Merkmale dieser Bakterien genauer dargestellt werden.

***Desulfotomaculum* spp.**

Desulfotomaculum spp. können in der Regel in Grundwasser, im Sedimentgestein oder im Kot von Tieren (hauptsächlich Schweinen), wo wenig Sauerstoff vorhanden ist, gefunden werden. Insbesondere *D. alkaliphilum* ist die einzige bekannte obligat alkaliphile Art, wächst nur bei pH-Werten zwischen 8,5 bis 11, und wird häufig in Schweine- und Rindergülle gefunden. Bei *Desulfotomaculum* spp. handelt es sich um sulfatreduzierende Bakterien.

***Pseudomonas* spp.**

Pseudomonaden sind ubiquitäre Bakterien, welche im Boden, in Sümpfen, in küstennahen Lebensräumen und in Tier- und Pflanzengewebe gefunden werden können. Im Allgemeinen können diese Bakterien eine Vielzahl von physischen Bedingungen tolerieren. Einige dieser Arten, wie *Pseudomonas aeruginosa*, sind opportunistische Pathogene. Pseudomonas-Arten sind auch für den Verderb von Milch selbst nach einer Pasteurisation verantwortlich. Pseu-

domonaden sind psychrotrophe Bakterien. Sie sind in der Lage bei niedrigen Temperaturen zu wachsen und sich zu vermehren. Pseudomonaden bilden bevorzugt Biofilme aus.

Blastomonas spp.

Hierbei handelt es sich um eine Gattung von zur Biofilmbildung fähigen Bakterien über die ansonsten wenig bekannt ist.

Pseudoxanthomonas spp.

Hierbei handelt es sich eine Gattung von Bodenbakterien die zur Nitratreduktion fähig sind.

Brevundimonas spp.

Sie sind mit entfernt mit *Caulobacter spp.* verwandt. Sie sind beispielsweise in der Lage Isochinolin abzubauen, einen giftigen Bestandteil in Pestiziden und Korrosionsschutzmitteln.

3.3.3.3 Mikrobiologische Analyse 3 vom 16.08.2017

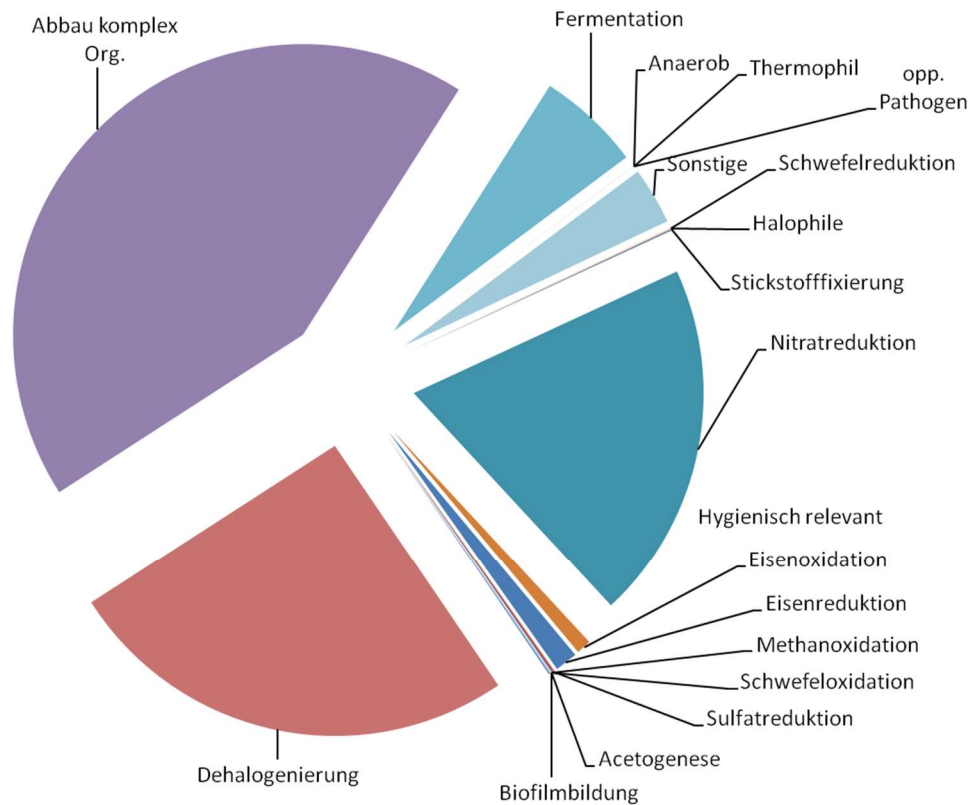


Abb. 85: Anteile der Gattungen auf Basis ihrer Stoffwechselfunktion

Die Probe enthält viele Vertreter, die zum Abbau komplexer organischer Verbindungen fähig sind. Auch Dehalogenierer und Nitratreduzierer sind übermäßig vertreten.

Hydrogenophaga spp., *Sphingobium spp.*, *Smithella spp.*, *Dechloromonas spp.* und *Brevundimonas spp.* dominieren die Population. Vermutlich werden aus den Kunststoffrohren austretende Substanzen abgebaut.

Tab. 40 Anteile der einzelnen Gattungen

Bezeichnung	Anteil in %	Bezeichnung	Anteil in %	Bezeichnung	Anteil in %
Hydrogenophaga	26,14	Reyranella	0,16	Curvibacter	0,01
Sphingobium	16,96	Sulfuritalea	0,16	Fusibacter	0,01
Smithella	16,06	Sphingomonas	0,14	Acidovorax	0,01
Dechloromonas	15,52	Christensenellaceae R-7 group	0,11	Aerococcus	0,01
Lachnospiraceae NC2004 gro	7,41	Desulfuromonas	0,09	Altererythrobacter	0,01
Brevundimonas	4,26	Tepidicella	0,07	Erythrobacter	0,01
Ferrovibrio	2,67	Azospira	0,07	Georgfuchsia	0,01
Proteiniphilum	2,38	Sphingopyxis	0,07	Leptolinea	0,01
Ferribacterium	1,68	Achromobacter	0,06	Methylophilus	0,01
Novosphingobium	1,41	Acetobacterium	0,06	Microcella	0,01
Caulobacter	0,89	Vibrio	0,03	Petrimonas	0,01
Sideroxydans	0,62	Sphingorhabdus	0,03	bacterium enrichment culture clone	0,00
Phenylobacterium	0,57	Bradyrhizobium	0,02	Candidatus Soleaferrea	0,00
Sediminibacterium	0,47	Parablastomonas	0,02	Desulfotomaculum	0,00
Methanobacterium	0,40	Pelosinus	0,01	Gallionella	0,00
Longilinea	0,37	Tessaracoccus	0,01	Methylophaga	0,00
Propionivibrio	0,28	Candidatus Accumulibacter	0,01	Rhizobium	0,00
Pseudorhodoferrax	0,25	Phreatobacter	0,01	Rhodovastum	0,00
Acidocella	0,19	Vallitalea	0,01	Thauera	0,00
Desulfobulbus	0,18	bacterium enrichment culture clone €	0,01	Trichococcus	0,00

Hydrogenophaga spp., *Sphingobium spp.*, *Smithella spp.*, *Dechloromonas spp.*, *Brevundimonas spp.* konnten als nächste Verwandte der bestimmbareren, dominanten Bakterien in der Population identifiziert werden. Im Folgenden sollen die wesentlichen Merkmale dieser Bakterien genauer dargestellt werden.

Hydrogenophaga spp.

Früher den Pseudomonaden zugeordnet. Kommen im Boden, Wasser und Schlamm vor und besitzen eine gelbe Pigmentierung. Das Bakterium ist beweglich und Gram-negativ. Es ist grundsätzlich strikt aerob aber manche der Stämme besitzen die Fähigkeit zur anaeroben Nitratreduktion.

Sphingobium spp.

Novosphingobium ist eine Gattung von Gram-negativen Bakterien, welche in der Lage sind aromatische Verbindungen wie Phenol, Aniline, Nitrobenzol und Phenanthren abzubauen.

Smithella spp.

Es handelt sich hier um ein anaerobes Bakterium, welches in der Lage ist Propionate zu oxidieren. Es kann in methanogenen Umgebungen gefunden werden.



Dechloromonas spp.

Dieses Bakterium kann sowohl komplexe organische Verbindungen als auch Halogenverbindungen abbauen. Es wurde in Papiermühlen isoliert, in welchen es vermutlich Zelluloseabbau betrieben hat. Da zur Herstellung von Papier in der Vergangenheit Chlor verwendet wurde, können dort auch halogenorganische Verbindungen vorkommen.

Brevundimonas spp.

Verwandt mit Caulobacter. Diese Gruppe von Bakterien ist auch dazu fähig Isoquinoline, eine giftige Substanz welche in Pestiziden, Medikamenten, Antioxidanzien und Korrosionsverhinderern verwendet wird, abzubauen.

3.3.3.4 Wasserchemische Analyse 1 vom 16.08.2017

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Systemwasseranalyse aufgeführt.

Laborwerte

Fe part.+gel.	Eisen partikulär u. gelöst	mg/l	1.30 *
Fe gel.	Eisen gelöst	mg/l	0.90
Cu	Kupfer	mg/l	0.00
Zn	Zink	mg/l	0.01
Al	Aluminium	mg/l	0.07
Mn	Mangan	µg/l	87.96
Ni	Nickel	µg/l	42.56
Cr	Chrom	µg/l	11.60
Na	Natrium	mg/l	14.91
K	Kalium	mg/l	2.97
Mg	Magnesium	mg/l	3.64
Ca	Kalzium	mg/l	18.69
Mo	Molybdän	mg/l	n.b
P	Phosphor	mg/l	0.00
Cl ⁻	Chlorid	mg/l	n.b
SO ₄ ²⁻	Sulfat	mg/l	n.b
NO ₃ ⁻	Nitrat	mg/l	n.b
NPOC	Organischer Kohlenstoff	mg/l	42.5
IC	Anorganischer Kohlenstoff	mg/l	7.0
Zellzahl	Keimbelastung	l ⁻¹	n.b

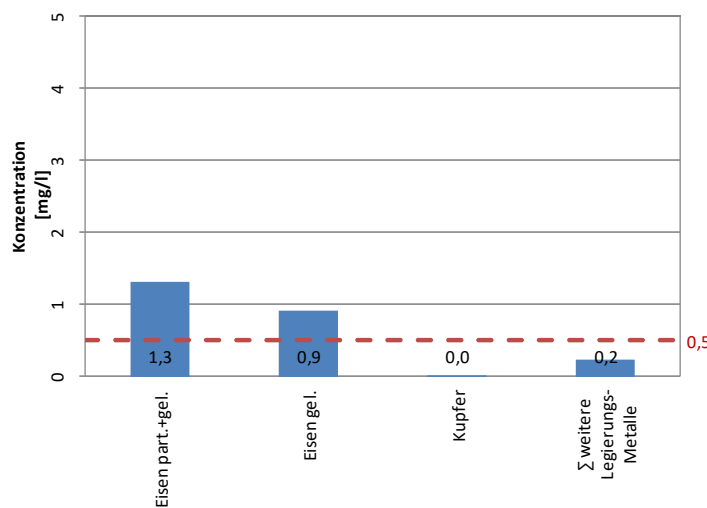
Vor-Ort-Werte

pH	-	8.8
Redoxpotential (gemessen)	mV	-644.0
Sauerstoffgehalt	mg/l	0.088
Leitfähigkeit	µS/cm	182.9
Temperatur	°C	13.0

* 0,00: Wert liegt unterhalb der Nachweisgrenze; n.b. : nicht bestimmt



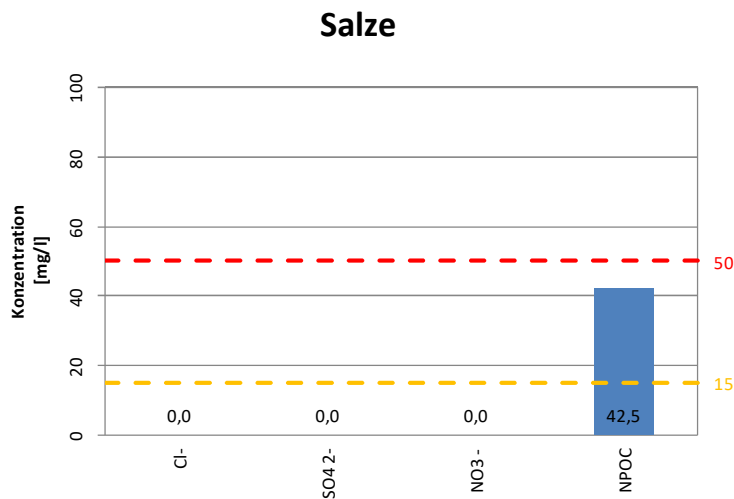
Die folgende Tabelle erläutert die Messergebnisse im Einzelnen einschließlich einer individuellen Bewertung und Handlungsempfehlungen.

Ergebnis**Bewertung und Handlungsempfehlung****Metalle**

Gelöste und partikulär vorkommende Eisenverbindungen, bzw. Kupfer im Systemwasser stellen die Haupt-Korrosions-produkte dar. Sie sind daher indikativ für aktive Korrosions-prozesse. Gelöstes Eisen stellt die Vorstufe zu partikulären Bestandteilen da.

Das Fehlen partikulärer Bestandteile bei einem hohen Anteil gelöster Bestandteile kann verschiedene Ursachen haben: entweder die partikulären Bestandteil werden wirksam gefiltert oder die Korrosions-prozesse sind infolge Sauerstoff-mangel zum Erliegen gekommen. Metallgehalte (gelöst) bis zu 0,5 mg/L werden als unkritisch angesehen.

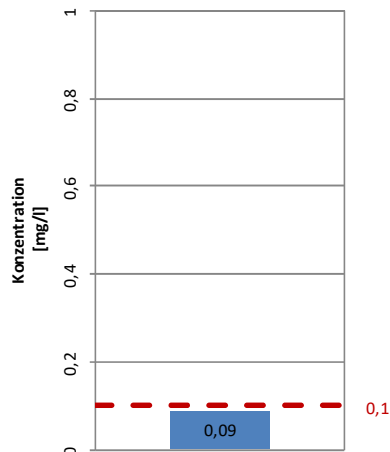
Bewertung: Die Metallgehalte deuten auf eine relevante Eisenkorrosion hin. Es erfolgt noch keine Kupferkorrosion. Weiterhin gehen Zink und Aluminium in Lösung obwohl der pH-Wert in einem unkritischen Bereich liegt.



Chlorid, Sulfat und Nitrat fördern als Elektrolyten durch die Erhöhung der Leitfähigkeit die Korrosion. Zusätzlich tragen Nitrat und Sulfat als Nährsalze sowie organischer Kohlenstoff (NPOC) zu einem erhöhten Keim-Wachstum bei. Die Salze werden über das Füllwasser und ggf. über das Nachspeisewasser eingebracht. Organischer Kohlenstoff stammt aus zugesetzten Inhibitoren, geölten und nicht gereinigten Bauteilen oder Kunststoffdichtungen.

Bewertung: Die erhöhte Konzentration des gelösten organischen Kohlenstoffs ist resultiert vermutlich aus den Mischbettpatronen zur Entsalzung. Die Flächensysteme aus Kunststoff stellen ebenfalls eine potentielle Quelle für organische Kohlenstoffe dar.

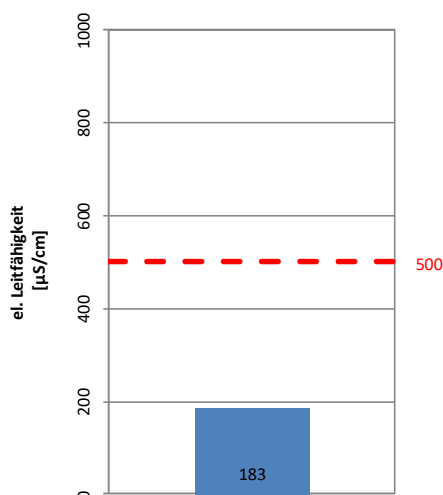
Sauerstoffgehalt



Das Vorhandensein von Sauerstoff ist Voraussetzung für die nicht-mikrobiell induzierte Korrosion von Eisen und Kupfer. Der Sauerstoffgehalt ist nach Neubefüllung hoch und sinkt in gasdichten Systemen mit der Betriebszeit, weil er durch Korrosionsprozesse aufgebraucht wird. Die Korrosionsprozesse kommen dann zum Erliegen. Aufgrund der Erfahrung nimmt die Korrosionsrate ab einem Sauerstoffgehalt von 0,1 mg/L stark zu. Ein hoher Sauerstoffgehalt bei einem nicht frisch befüllten, geschlossenen System weist auf Gasdiffusion durch dünnwandige Kunststoffrohre, nicht ordnungsgemäße Druckhaltungssysteme oder offene Ausgleichsbehälter hin.

Bewertung: Der Sauerstoffgehalt liegt mit 0,09 mg/L unter dem Grenzwert und weist auf ein ausreichend gasdichtes System hin.

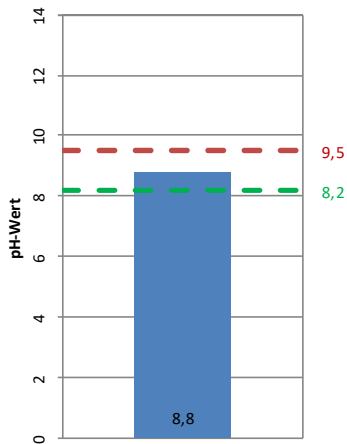
Leitfähigkeit



Die Leitfähigkeit gibt die elektrolytische Eigenschaft des Systemwassers an. Das Korrosionsrisiko steigt mit der Erhöhung der Leitfähigkeit. Entsalztes Wasser weist in der Praxis eine Leitfähigkeit von etwas über 100 µS/cm, Leitungswasser bis zu 1200 µS/cm und mehr auf. In einem Systemwasser ohne Zusatz von Korrosionsschutzmitteln wird eine Leitfähigkeit von < 500 µS/cm zur Vermeidung von Korrosion toleriert.

Bewertung: Die Leitfähigkeit von 183 µS/cm ist deutlich unter dem Grenzwert und unkritisch.

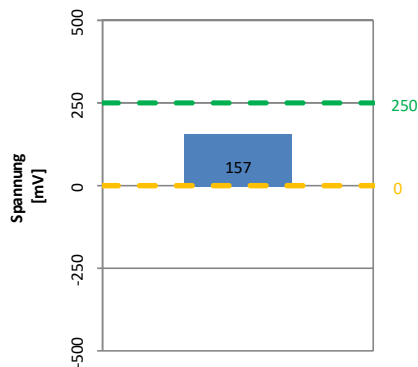
pH - Wert



Der pH-Wert ist ein Hauptindikator für Korrosionsrisiken und sollte zwischen 8,2 und 9,5 liegen. Ist Aluminium im System vorhanden, darf der pH-Wert 8,5 nicht überschreiten.

Bewertung: Der pH-Wert von 8,8 liegt im alkalischen Bereich, hemmt Korrosionsprozesse aber potentiell kritisch für Aluminiumbauteile.

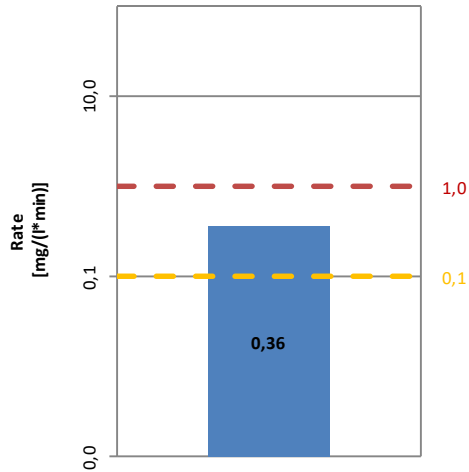
Redoxpotential normiert



Das sauerstoffkorrigierte, auf Standardwasserstoff-elektrode und pH 7 bzw. den Neutralpunkt normierte Redoxpotential gibt in Systemen ohne Wasserbehandlung Aufschluss über den Systemzustand. Es zeigt an, ob sich Eisen(II) als primäres Korrosionsprodukt im System befindet, Sulfid als Produkt mikrobieller Aktivität vorliegt oder der Systemzustand insgesamt unkritisch ist. Ein Redoxpotential über 250 mV ist unkritisch, es liegen keine gelösten Korrosionsprodukte vor. Zwischen 0 mV und 250 mV liegt gelöstes Eisen(II) vor, ein Redoxpotential von unter 0 mV deutet auf sulfatreduzierende Bakterien hin.

Bewertung: Das normierte Redoxpotential von 157 mV weist auf gelöstes Eisen hin. Da aber alle anderen Werte in Ordnung sind führt dies nicht zu einer negativen Bewertung.

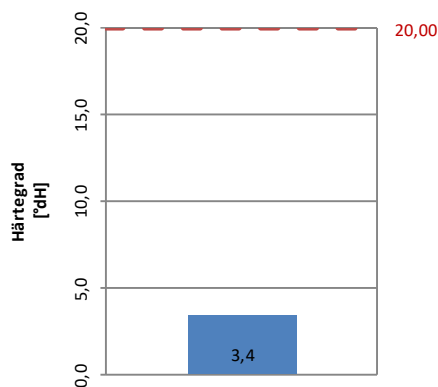
Korrosionsrate



Die Korrosionsrate gibt zum Zeitpunkt der Messung die je Zeiteinheit gebildete Menge der sekundären Korrosionsprodukte an. Aus diesem Wert kann auf Grundlage weiterer anlagenspezifischer Parameter auch der absolute Gesamtertrag an sekundären Korrosionsprodukten und der Materialabtrag in mm/a berechnet werden. Die Grenzwerte bilden Erfahrungswerte ab, die sich aufgrund der Erkenntnisse im Forschungsprojekt ergeben haben.

Bewertung: Derzeitig finden nur geringe Korrosionsvorgänge statt.

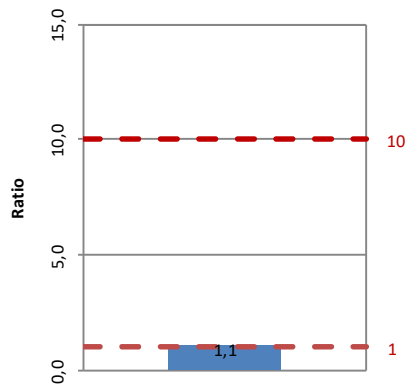
Gesamthärte



Härtebildner bergen die Gefahr der Verkalkung an heißen Bauteilen wie Wärmeübertragern oder Erhitzern. Ihr Grenzwert ist abhängig von dem Vorhandensein entsprechender Anlagenelemente und der Anlagengesamtleistung (gem. VDI 2035 Blatt 1). Für Kühlsysteme begrenzt BTGA 3.003 die Härte auf 20°dH.

Bewertung: Der Wert von 3,4 °dH unterschreitet den Grenzwert für Kühlanlagen nach der BTGA-Regel 3.003 von 20°dH. Es besteht kein Handlungsbedarf.

Stoffmengenanteil $\text{Na}/(\text{Ca}+\text{Mg})$



Das Verhältnis der molaren Konzentrationen von Natrium zu Calcium und Magnesium gibt einen Hinweis auf die Vorbehandlung des Systemwassers. Bei einem Wert unter 1 ist das Wasser unaufbereitet oder vollentsalzt, bei einem Wert über 10 ist es nur enthärtet.

Bewertung: Der gemessene Wert spricht für die Verwendung von vollentsalztem oder unbehandeltem Wasser.

**3.3.3.5 Wasserchemische Analyse 2 vom 04.12.2017**

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Systemwasseranalyse aufgeführt.

Laborwerte

Fe part.+gel.	Eisen partikulär u. gelöst	mg/l	1.38*
Fe gel.	Eisen gelöst	mg/l	0.68
Cu	Kupfer	mg/l	0.02
Zn	Zink	mg/l	0.02
Al	Aluminium	mg/l	0.06
Mn	Mangan	µg/l	132.48
Ni	Nickel	µg/l	65.64
Cr	Chrom	µg/l	26.57
Na	Natrium	mg/l	14.53
K	Kalium	mg/l	3.55
Mg	Magnesium	mg/l	4.82
Ca	Kalzium	mg/l	29.03
Mo	Molybdän	mg/l	n.b.
P	Phosphor	mg/l	0.00
Cl ⁻	Chlorid	mg/l	n.b.
SO ₄ ²⁻	Sulfat	mg/l	n.b.
NO ₃ ⁻	Nitrat	mg/l	n.b.
NPOC	Organischer Kohlenstoff	mg/l	39.8
IC	Anorganischer Kohlenstoff	mg/l	6.0
Zellzahl	Keimbelastung	l ⁻¹	n.b.

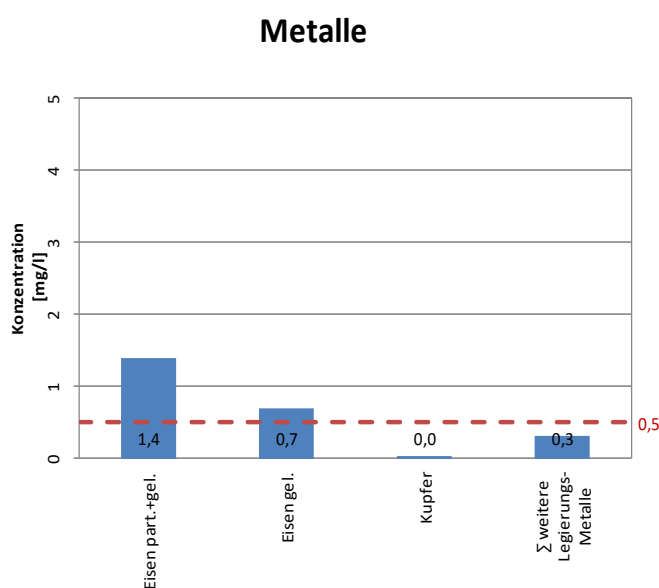
Vor-Ort-Werte

pH	-	8.9
Redoxpotential (gemessen)	mV	-698.0
Sauerstoffgehalt	mg/l	0.095
Leitfähigkeit	µS/cm	177.4
Temperatur	°C	12.5

* 0,00: Wert liegt unterhalb der Nachweisgrenze; n.b. : nicht bestimmt

Die folgende Tabelle erläutert die Messergebnisse im Einzelnen einschließlich einer individuellen Bewertung und Handlungsempfehlungen.

Ergebnis	Bewertung und Handlungsempfehlung
----------	-----------------------------------

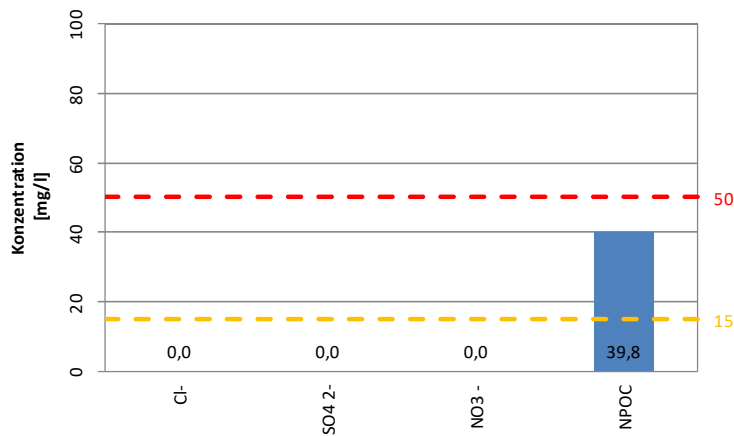


Gelöste und partikulär vorkommende Eisenverbindungen, bzw. Kupfer im Systemwasser stellen die Haupt-Korrosions-produkte dar. Sie sind daher indikativ für aktive Korrosions-prozesse. Gelöstes Eisen stellt die Vorstufe zu partikulären Bestandteilen da. Das Fehlen partikulärer Bestandteile bei einem hohen Anteil gelöster Bestandteile kann verschiedene Ursachen haben: entweder die partikulären Bestandteil werden wirksam gefiltert oder die Korrosions-prozesse sind infolge Sauerstoff-mangel zum Erliegen gekommen. Metallgehalte (gelöst) bis zu 0,5 mg/L werden als unkritisch angesehen.

Bewertung: Es sind gelöstes Eisen und höhere Anteile von partikulärem Eisen vorhanden. Die Gehalte an Zink und Kupfer deuten auf Buntmetallkorrosion hin (Entzinkung und nachfolgend Kupferkorrosion). Weiterhin wurde Aluminium nachgewiesen (Wärmetauscher)

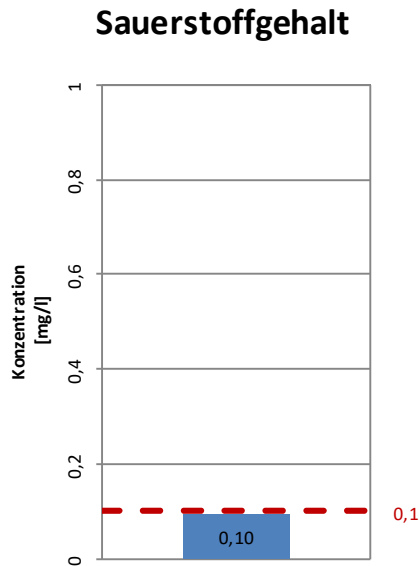


Salze



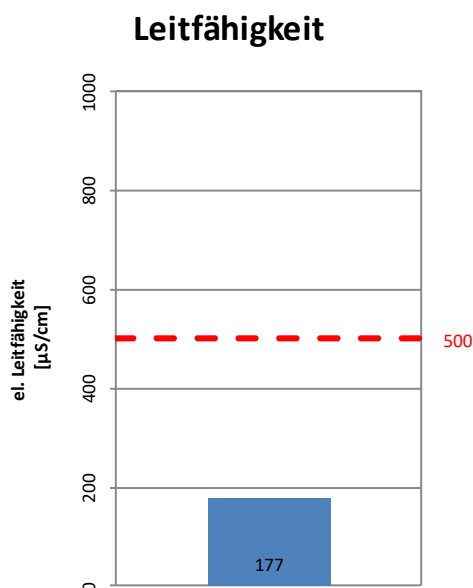
Chlorid, Sulfat und Nitrat fördern als Elektrolyten durch die Erhöhung der Leitfähigkeit die Korrosion. Zusätzlich tragen Nitrat und Sulfat als Nährsalze sowie organischer Kohlenstoff (NPOC) zu einem erhöhten Keim-Wachstum bei. Die Salze werden über das Füllwasser und ggf. über das Nachspeisewasser eingebracht. Organischer Kohlenstoff stammt aus zugesetzten Inhibitoren, geölten und nicht gereinigten Bauteilen oder Kunststoffdichtungen.

Bewertung: Im Vergleich zu vorangegangenen Probe hat sich der NPOC – Gehalt fast nicht verändert.



Das Vorhandensein von Sauerstoff ist Voraussetzung für die nicht-mikrobiell induzierte Korrosion von Eisen und Kupfer. Der Sauerstoffgehalt ist nach Neubefüllung hoch und sinkt in gasdichten Systemen mit der Betriebszeit, weil er durch Korrosionsprozesse aufgebraucht wird. Die Korrosionsprozesse kommen dann zum Erliegen. Aufgrund der Erfahrung nimmt die Korrosionsrate ab einem Sauerstoffgehalt von 0,1 mg/L stark zu. Ein hoher Sauerstoffgehalt bei einem nicht frisch befüllten, geschlossenen System weist auf Gasdiffusion durch dünnwandige Kunststoffrohre, nicht ordnungsgemäße Druckhaltungssysteme oder offene Ausgleichsbehälter hin.

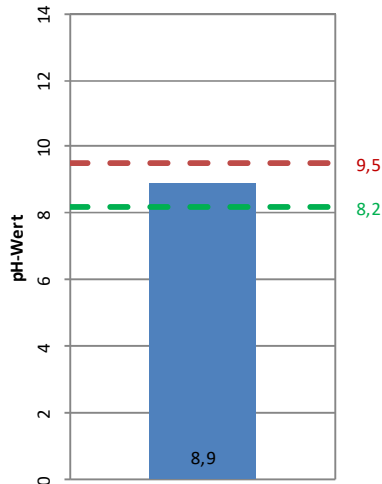
Bewertung: Der Sauerstoffgehalt ist mit 0,1 mg/L grenzwertig.



Die Leitfähigkeit gibt die elektrolytische Eigenschaft des Systemwassers an. Das Korrosionsrisiko steigt mit der Erhöhung der Leitfähigkeit. Entsalztes Wasser weist in der Praxis eine Leitfähigkeit von etwas über 100 µS/cm, Leitungswasser bis zu 1200 µS/cm und mehr auf. In einem Systemwasser ohne Zusatz von Korrosionsschutzmitteln wird eine Leitfähigkeit von < 500 µS/cm zur Vermeidung von Korrosion toleriert.

Bewertung: Die Leitfähigkeit von 177 µS/cm ist deutlich unter dem Grenzwert und unkritisch.

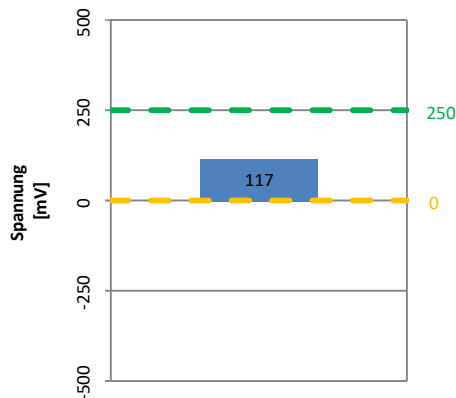
pH - Wert



Der pH-Wert ist ein Hauptindikator für Korrosionsrisiken und sollte zwischen 8,2 und 9,5 liegen. Ist Aluminium im System vorhanden, darf der pH-Wert 8,5 nicht überschreiten.

Bewertung: Der pH-Wert von 8,9 liegt im alkalischen Bereich und hemmt Korrosionsprozesse. Kaum eine Veränderung zur vorangegangenen Messung.

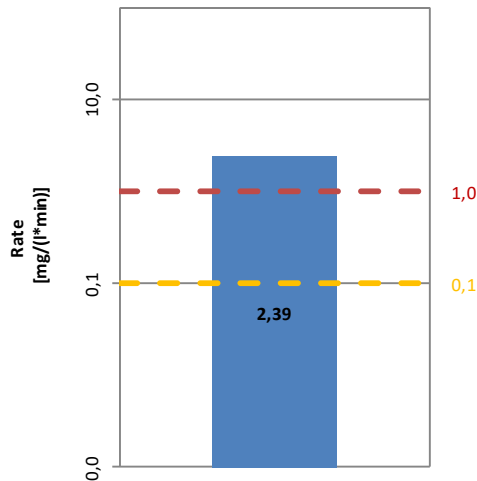
Redoxpotential normiert



Das sauerstoffkorrigierte, auf Standardwasserstoffelektrode und pH 7 bzw. den Neutralpunkt normierte Redoxpotential gibt in Systemen ohne Wasserbehandlung Aufschluss über den Systemzustand. Es zeigt an, ob sich Eisen(II) als primäres Korrosionsprodukt im System befindet, Sulfid als Produkt mikrobieller Aktivität vorliegt oder der Systemzustand insgesamt unkritisch ist. Ein Redoxpotential über 250 mV ist unkritisch, es liegen keine gelösten Korrosionsprodukte vor. Zwischen 0 mV und 250 mV liegt gelöstes Eisen(II) vor, ein Redoxpotential von unter 0 mV deutet auf sulfatreduzierende Bakterien hin.

Bewertung: Das normierte Redoxpotential von 117 mV weist auf einen guten Systemzustand hin.

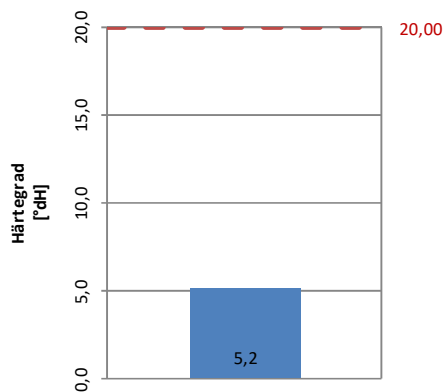
Korrosionsrate



Die Korrosionsrate gibt zum Zeitpunkt der Messung die je Zeiteinheit gebildete Menge der sekundären Korrosionsprodukte an. Aus diesem Wert kann auf Grundlage weiterer anlagenspezifischer Parameter auch der absolute Gesamtertrag an sekundären Korrosionsprodukten und der Materialabtrag in mm/a berechnet werden. Die Grenzwerte bilden Erfahrungswerte ab, die sich aufgrund der Erkenntnisse im Forschungsprojekt ergeben haben.

Bewertung: Die berechnete Korrosionsrate weist (entgegen dem Redoxpotential) auf eine relevante Korrosion hin.

Gesamthärte

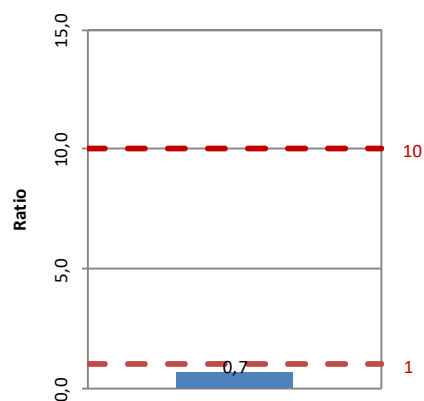


Härtebildner bergen die Gefahr der Verkalkung an heißen Bauteilen wie Wärmeübertragern oder Erhitzern. Ihr Grenzwert ist abhängig von dem Vorhandensein entsprechender Anlagenelemente und der Anlagengesamtleistung (gem. VDI 2035 Blatt 1). Für Kühlsysteme begrenzt BTGA 3.003 die Härte auf 20°dH.

Bewertung: Der Wert von 5,2 °dH unterschreitet den Grenzwert nach BTGA 3.003



Stoffmengenanteil $\text{Na}/(\text{Ca}+\text{Mg})$



Das Verhältnis der molaren Konzentrationen von Natrium zu Calcium und Magnesium gibt einen Hinweis auf die Vorbehandlung des Systemwassers. Bei einem Wert unter 1 ist das Wasser unaufbereitet oder vollentsalzt, bei einem Wert über 10 ist es nur enthärtet.

Bewertung: Der gemessene Wert spricht für die Verwendung von vollentsalztem Wasser.

3.3.3.6 Wasserchemische Analyse 3 vom 27.02.2018

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Systemwasseranalyse aufgeführt.

Laborwerte

Fe part.+gel.	Eisen partikulär u. gelöst	mg/l	1.03*
Fe gel.	Eisen gelöst	mg/l	1.00
Cu	Kupfer	mg/l	0.01
Zn	Zink	mg/l	0.00
Al	Aluminium	mg/l	0.07
Mn	Mangan	µg/l	86.81
Ni	Nickel	µg/l	0.00
Cr	Chrom	µg/l	2.63
Na	Natrium	mg/l	n.b.
K	Kalium	mg/l	3.10
Mg	Magnesium	mg/l	4.06
Ca	Kalzium	mg/l	20.62
Mo	Molybdän	mg/l	n.b.
P	Phosphor	mg/l	0.05
Cl ⁻	Chlorid	mg/l	n.b.
SO ₄ ²⁻	Sulfat	mg/l	n.b.
NO ₃ ⁻	Nitrat	mg/l	n.b.
NPOC	Organischer Kohlenstoff	mg/l	n.b.
IC	Anorganischer Kohlenstoff	mg/l	n.b.
Zellzahl	Keimbelastung	l ⁻¹	n.b.

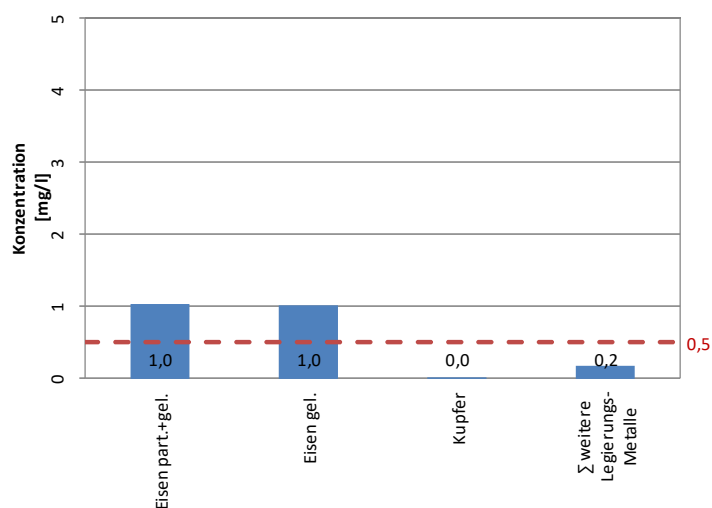
Vor-Ort-Werte

pH	-	8.9
Redoxpotential (gemessen)	mV	-726.1
Sauerstoffgehalt	mg/l	0.102
Leitfähigkeit	µS/cm	174.0
Temperatur	°C	12.3

* 0,00: Wert liegt unterhalb der Nachweisgrenze; n.b. : nicht bestimmt



Die folgende Tabelle erläutert die Messergebnisse im Einzelnen einschließlich einer individuellen Bewertung und Handlungsempfehlungen.

Ergebnis**Bewertung und Handlungsempfehlung****Metalle**

Gelöste und partikulär vorkommende Eisenverbindungen, bzw. Kupfer im Systemwasser stellen die Haupt-Korrosionsprodukte dar. Sie sind daher indikativ für aktive Korrosionsprozesse. Gelöstes Eisen stellt die Vorstufe zu partikulären Bestandteilen da. Das Fehlen partikulärer Bestandteile bei einem hohen Anteil gelöster Bestandteile kann verschiedene Ursachen haben: entweder die partikulären Bestandteil werden wirksam gefiltert oder die Korrosionsprozesse sind infolge Sauerstoffmangel zum Erliegen gekommen. Metallgehalte (gelöst) bis zu 0,5 mg/L werden als unkritisch angesehen.

Bewertung: Es sind hauptsächlich gelöste Eisen-Bestandteile nachweisbar. Dies weist auf aktive Korrosionsprozesse hin.

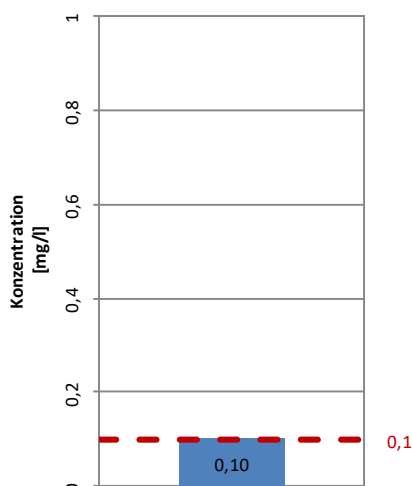
Salze

Nicht bestimmt

Chlorid, Sulfat und Nitrat fördern als Elektrolyten durch die Erhöhung der Leitfähigkeit die Korrosion. Zusätzlich tragen Nitrat und Sulfat als Nährsalze sowie organischer Kohlenstoff (NPOC) zu einem erhöhten Keim-Wachstum bei. Die Salze werden über das Füllwasser und ggf. über das Nachspeisewasser eingebracht. Organischer Kohlenstoff stammt aus zugesetzten Inhibitoren, geölten und nicht gereinigten Bauteilen oder Kunststoff-Dichtungen.

Bewertung: -

Sauerstoffgehalt

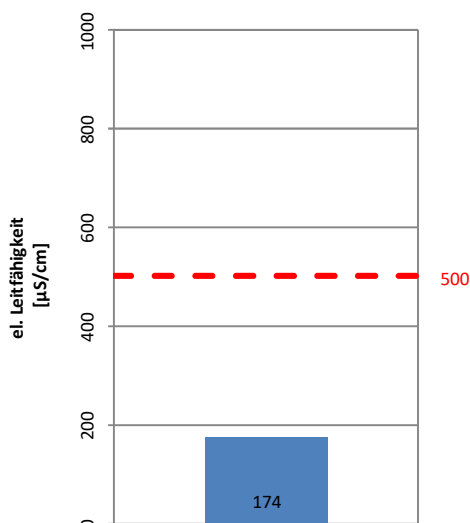


Das Vorhandensein von Sauerstoff ist Voraussetzung für die nicht-mikrobiell induzierte Korrosion von Eisen und Kupfer. Der Sauerstoffgehalt ist nach Neubefüllung hoch und sinkt in gasdichten Systemen mit der Betriebszeit, weil er durch Korrosionsprozesse aufgebraucht wird. Die Korrosionsprozesse kommen dann zum Erliegen. Aufgrund der Erfahrung nimmt die Korrosionsrate ab einem Sauerstoffgehalt von 0,1 mg/L stark zu. Ein hoher Sauerstoffgehalt bei einem nicht frisch befüllten, geschlossenen System weist auf Gasdiffusion durch dünnwandige Kunststoffrohre, nicht ordnungsgemäße Druckhaltungssysteme oder offene Ausgleichsbehälter hin.

Bewertung: Der Sauerstoffgehalt ist mit 0,1 mg/L grenzwertig.



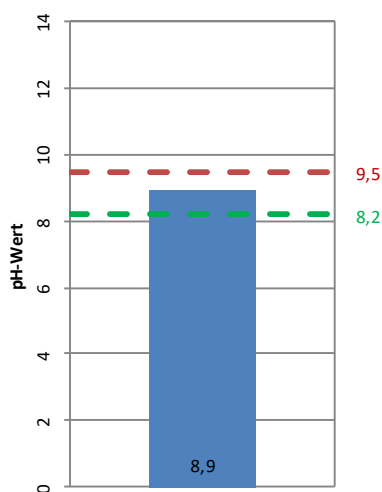
Leitfähigkeit



Die Leitfähigkeit gibt die elektrolytische Eigenschaft des Systemwassers an. Das Korrosionsrisiko steigt mit der Erhöhung der Leitfähigkeit. Entsalztes Wasser weist in der Praxis eine Leitfähigkeit von etwas über 100 µS/cm, Leitungswasser bis zu 1200 µS/cm und mehr auf. In einem Systemwasser ohne Zusatz von Korrosionsschutzmitteln wird eine Leitfähigkeit von < 500 µS/cm zur Vermeidung von Korrosion toleriert.

Bewertung: Die Leitfähigkeit von 174 µS/cm ist deutlich unter dem Grenzwert und unkritisch.

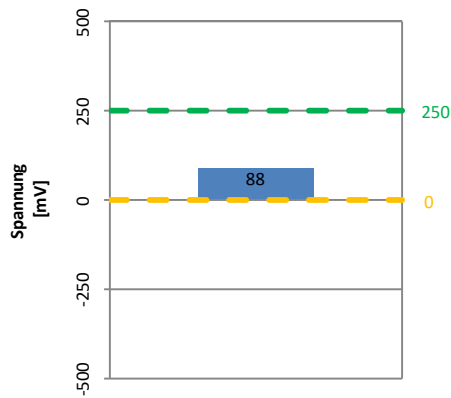
pH - Wert



Der pH-Wert ist ein Hauptindikator für Korrosionsrisiken und sollte zwischen 8,2 und 9,5 liegen. Ist Aluminium im System vorhanden, darf der pH-Wert 8,5 nicht überschreiten.

Bewertung: Der pH-Wert von 8,9 liegt im alkalischen Bereich und hemmt Korrosionsprozesse. Er könnte jedoch bereits Aluminiumkorrosion befördern.

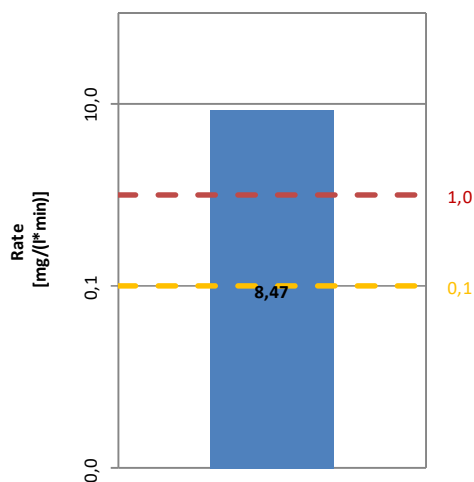
Redoxpotential normiert



Das sauerstoffkorrigierte, auf Standardwasserstoff-elektrode und pH 7 bzw. den Neutralpunkt normierte Redoxpotential gibt in Systemen ohne Wasserbehandlung Aufschluss über den Systemzustand. Es zeigt an, ob sich Eisen(II) als primäres Korrosionsprodukt im System befindet, Sulfid als Produkt mikrobieller Aktivität vorliegt oder der Systemzustand insgesamt unkritisch ist. Ein Redoxpotential über 250 mV ist unkritisch, es liegen keine gelösten Korrosionsprodukte vor. Zwischen 0 mV und 250 mV liegt gelöstes Eisen(II) vor, ein Redoxpotential von unter 0 mV deutet auf sulfat-reduzierende Bakterien hin.

Bewertung: Das normierte Redoxpotential von 95 mV weist auf gelöstes Eisen und aktive Korrosionsprozesse hin.

Korrosionsrate

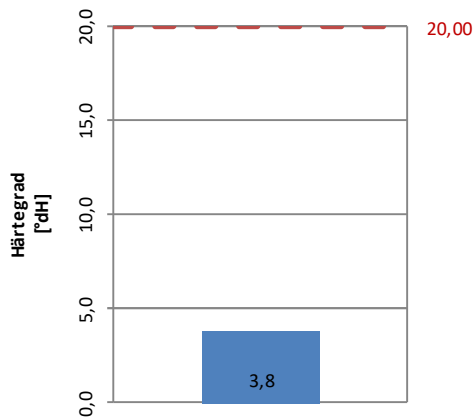


Die Korrosionsrate gibt zum Zeitpunkt der Messung die je Zeiteinheit gebildete Menge der sekundären Korrosionsprodukte an. Aus diesem Wert kann auf Grundlage weiterer anlagenspezifischer Parameter auch der absolute Gesamtertrag an sekundären Korrosionsprodukten und der Materialabtrag in mm/a berechnet werden. Die Grenzwerte bilden Erfahrungswerte ab, die sich aufgrund der Erkenntnisse im Forschungsprojekt ergeben haben.

Bewertung: Die berechnete Korrosionsrate zeigt einen hohen Wert, der aktive Korrosionsprozesse bestätigt. Der deutlich erhöhte Wert weist auf mögliche mikrobiologische Prozesse hin!



Gesamthärte



Härtebildner bergen die Gefahr der Verkalkung an heißen Bauteilen wie Wärmeübertragern oder Erhitzern. Ihr Grenzwert ist abhängig von dem Vorhandensein entsprechender Anlagenelemente und der Anlagengesamtleistung (gem. VDI 2035 Blatt 1). Für Kühlsysteme begrenzt BTGA 3.003 die Härte auf 20°dH.

Bewertung: Der Wert von 3,8 °dH unterschreitet den Grenzwert nach BTGA 3.003.

Stoffmengenanteil $\text{Na}/(\text{Ca}+\text{Mg})$

Nicht bestimmt

Das Verhältnis der molaren Konzentrationen von Natrium zu Calcium und Magnesium gibt einen Hinweis auf die Vorbehandlung des Systemwassers. Bei einem Wert unter 1 ist das Wasser un-aufbereitet oder vollentsalzt, bei einem Wert über 10 ist es nur enthärtet.

Bewertung: -

3.3.3.7 Wasserchemische Analyse 4 vom 02.05.2018

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Systemwasseranalyse aufgeführt.

Laborwerte

Fe part.+gel.	Eisen partikulär u. gelöst	mg/l	1.15 *
Fe gel.	Eisen gelöst	mg/l	0.69
Cu	Kupfer	mg/l	0.00
Zn	Zink	mg/l	0.00
Al	Aluminium	mg/l	0.12
Mn	Mangan	µg/l	64.44
Ni	Nickel	µg/l	0.00
Cr	Chrom	µg/l	0.00
Na	Natrium	mg/l	16.02
K	Kalium	mg/l	2.87
Mg	Magnesium	mg/l	3.67
Ca	Kalzium	mg/l	16.06
Mo	Molybdän	mg/l	n.b
P	Phosphor	mg/l	0.04
Cl ⁻	Chlorid	mg/l	n.b
SO ₄ ²⁻	Sulfat	mg/l	n.b
NO ₃ ⁻	Nitrat	mg/l	n.b
NPOC	Organischer Kohlenstoff	mg/l	n.b
IC	Anorganischer Kohlenstoff	mg/l	n.b
Zellzahl	Keimbelastung	l ⁻¹	n.b

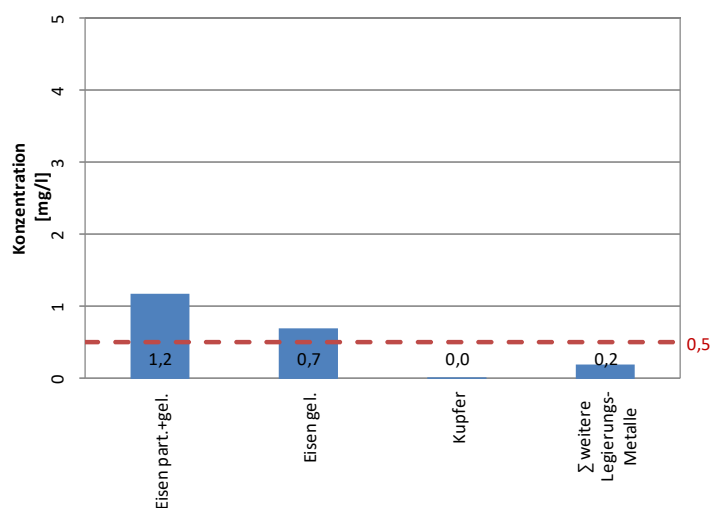
Vor-Ort-Werte

pH	-	8.9
Redoxpotential (gemessen)	mV	-745.4
Sauerstoffgehalt	mg/l	0.100
Leitfähigkeit	µS/cm	174.3
Temperatur	°C	12.6

* 0,00: Wert liegt unterhalb der Nachweisgrenze; n.b. : nicht bestimmt



Die folgende Tabelle erläutert die Messergebnisse im Einzelnen einschließlich einer individuellen Bewertung und Handlungsempfehlungen.

Ergebnis**Bewertung und Handlungsempfehlung****Metalle**

Gelöste und partikulär vorkommende Eisenverbindungen, bzw. Kupfer im Systemwasser stellen die Haupt-Korrosionsprodukte dar. Sie sind daher indikativ für aktive Korrosionsprozesse. Gelöstes Eisen stellt die Vorstufe zu partikulären Bestandteilen da. Das Fehlen partikulärer Bestandteile bei einem hohen Anteil gelöster Bestandteile kann verschiedene Ursachen haben: entweder die partikulären Bestandteil werden wirksam gefiltert oder die Korrosionsprozesse sind infolge Sauerstoffmangel zum Erliegen gekommen. Metallgehalte (gelöst) bis zu 0,5 mg/L werden als unkritisch angesehen.

Bewertung: Die Eisengehalte weisen auf relevante Korrosion hin. Weiterhin finden sich steigende Aluminiumgehalte im Umlaufwasser.

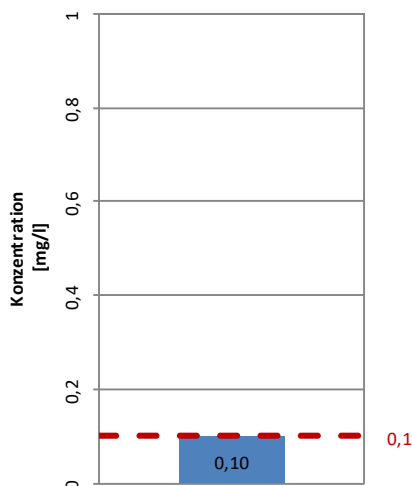
Salze

Nicht bestimmt

Chlorid, Sulfat und Nitrat fördern als Elektrolyten durch die Erhöhung der Leitfähigkeit die Korrosion. Zusätzlich tragen Nitrat und Sulfat als Nährsalze sowie organischer Kohlenstoff (NPOC) zu einem erhöhten Keim-Wachstum bei. Die Salze werden über das Füllwasser und ggf. über das Nachspeisewasser eingebracht. Organischer Kohlenstoff stammt aus zugesetzten Inhibitoren, geölten und nicht gereinigten Bauteilen oder Kunststoff-Dichtungen.

Bewertung: -

Sauerstoffgehalt

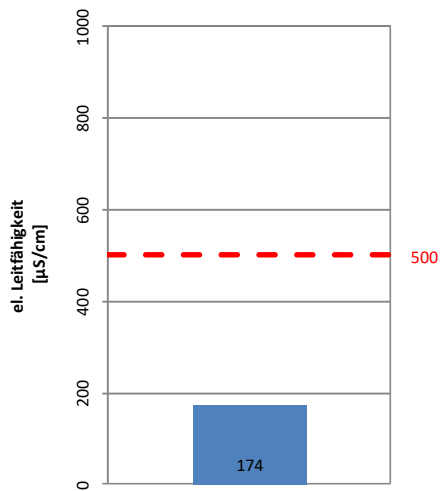


Das Vorhandensein von Sauerstoff ist Voraussetzung für die nicht-mikrobiell induzierte Korrosion von Eisen und Kupfer. Der Sauerstoffgehalt ist nach Neubefüllung hoch und sinkt in gasdichten Systemen mit der Betriebszeit, weil er durch Korrosionsprozesse aufgebraucht wird. Die Korrosionsprozesse kommen dann zum Erliegen. Aufgrund der Erfahrung nimmt die Korrosionsrate ab einem Sauerstoffgehalt von 0,1 mg/L stark zu. Ein hoher Sauerstoffgehalt bei einem nicht frisch befüllten, geschlossenen System weist auf Gasdiffusion durch dünnwandige Kunststoffrohre, nicht ordnungsgemäße Druckhaltungssysteme oder offene Ausgleichsbehälter hin.

Bewertung: Der Sauerstoffgehalt ist mit 0,1 mg/L weiterhin unverändert und grenzwertig.



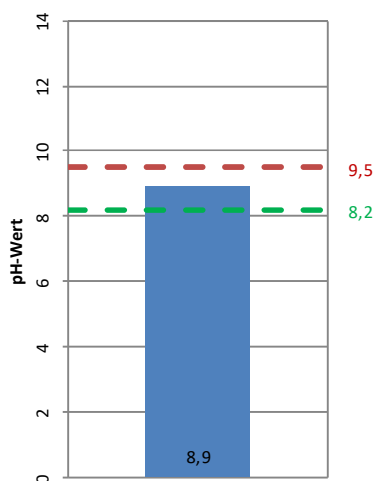
Leitfähigkeit



Die Leitfähigkeit gibt die elektrolytische Eigenschaft des Systemwassers an. Das Korrosionsrisiko steigt mit der Erhöhung der Leitfähigkeit. Entsalztes Wasser weist in der Praxis eine Leitfähigkeit von etwas über 100 µS/cm, Leitungswasser bis zu 1200 µS/cm und mehr auf. In einem Systemwasser ohne Zusatz von Korrosionsschutzmitteln wird eine Leitfähigkeit von < 500 µS/cm zur Vermeidung von Korrosion toleriert.

Bewertung: Die Leitfähigkeit von 174 µS/cm ist deutlich unter dem Grenzwert und unkritisch.

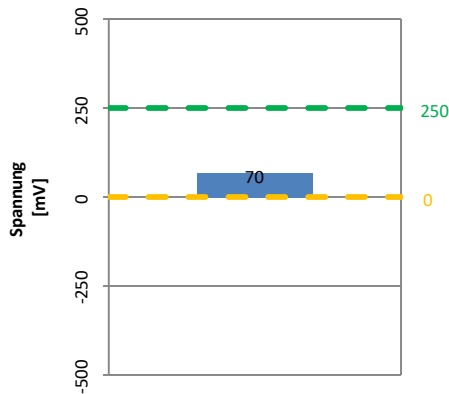
pH - Wert



Der pH-Wert ist ein Hauptindikator für Korrosionsrisiken und sollte zwischen 8,2 und 9,5 liegen. Ist Aluminium im System vorhanden, darf der pH-Wert 8,5 nicht überschreiten.

Bewertung: Der pH-Wert von 8,9 liegt im alkalischen Bereich und hemmt Korrosionsprozesse. Er könnte jedoch Aluminiumkorrosion befördern.

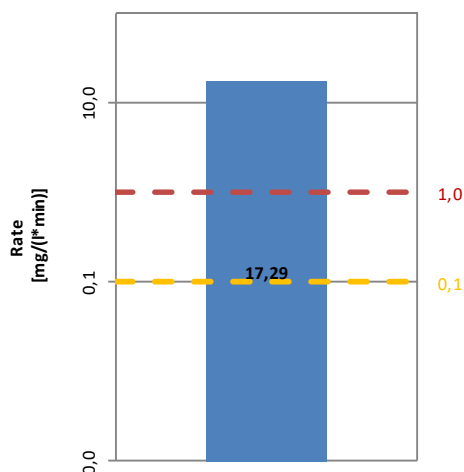
Redoxpotential normiert



Das sauerstoffkorrigierte, auf Standardwasserstoff-elektrode und pH 7 bzw. den Neutralpunkt normierte Redoxpotential gibt in Systemen ohne Wasserbehandlung Aufschluss über den Systemzustand. Es zeigt an, ob sich Eisen(II) als primäres Korrosionsprodukt im System befindet, Sulfid als Produkt mikrobieller Aktivität vorliegt oder der Systemzustand insgesamt unkritisch ist. Ein Redoxpotential über 250 mV ist unkritisch, es liegen keine gelösten Korrosionsprodukte vor. Zwischen 0 mV und 250 mV liegt gelöstes Eisen(II) vor, ein Redoxpotential von unter 0 mV deutet auf sulfat-reduzierende Bakterien hin.

Bewertung: Das normierte Redoxpotential von 70 mV weist auf einen zunehmend schlechteren Systemzustand hin.

Korrosionsrate

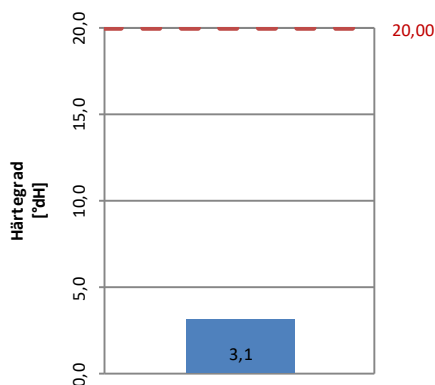


Die Korrosionsrate gibt zum Zeitpunkt der Messung die je Zeiteinheit gebildete Menge der sekundären Korrosionsprodukte an. Aus diesem Wert kann auf Grundlage weiterer anlagenspezifischer Parameter auch der absolute Gesamtertrag an sekundären Korrosionsprodukten und der Materialabtrag in mm/a berechnet werden. Die Grenzwerte bilden Erfahrungswerte ab, die sich aufgrund der Erkenntnisse im Forschungsprojekt ergeben haben.

Bewertung: Die berechnete Korrosionsrate steigt weiter an und bestätigt einen zunehmenden Korrosionstrend, vermutlich durch mikrobiologische Prozesse, der sich auch in den zunehmenden Eisengehalten zeigt.



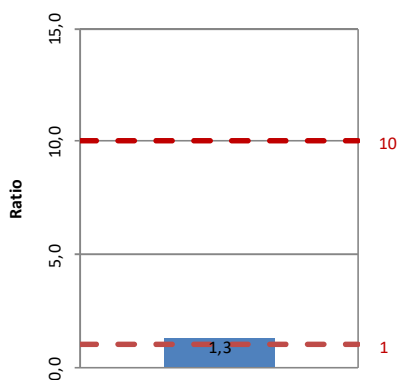
Gesamthärte



Härtebildner bergen die Gefahr der Verkalkung an heißen Bauteilen wie Wärmeübertragern oder Erhitzern. Ihr Grenzwert ist abhängig von dem Vorhandensein entsprechender Anlagenelemente und der Anlagengesamtleistung (gem. VDI 2035 Blatt 1). Für Kühlsysteme begrenzt BTGA 3.003 die Härte auf 20°dH.

Bewertung: Der Wert von 3,1 °dH unterschreitet den Grenzwert nach BTGA 3.003.

Stoffmengenanteil Na/(Ca+Mg)



Das Verhältnis der molaren Konzentrationen von Natrium zu Calcium und Magnesium gibt einen Hinweis auf die Vorbehandlung des Systemwassers. Bei einem Wert unter 1 ist das Wasser unaufbereitet oder vollentsalzt, bei einem Wert über 10 ist es nur enthärtet.

Bewertung: Der gemessene Wert spricht für die Verwendung von vollentsalztem Wasser.

3.3.4 Objekt 11

Mikrobiologische Analyse 1 vom 20.04.2016

Im Folgenden sind die Anteile der Spezies auf der Basis Ihrer Stoffwechselfunktionen dargestellt.

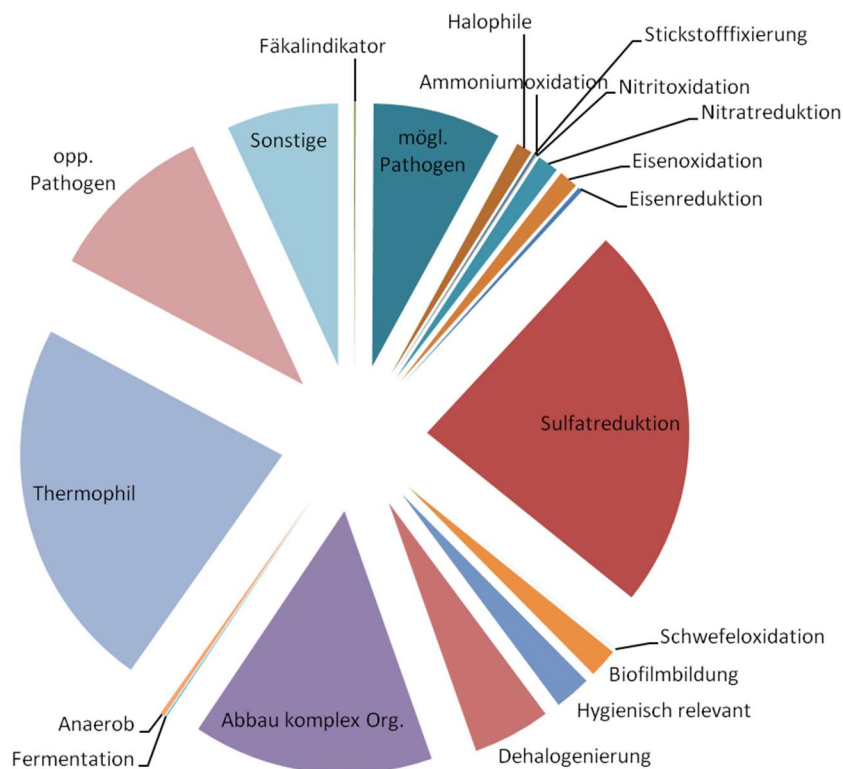


Abb. 86: Anteile der einzelnen Gattungen auf Basis ihrer Stoffwechselfunktionen

Bei dieser Probe sind vor allem die Sulfat-reduzierenden Bakterien, die thermophilen Bakterien aber auch die Spezialisten für den Abbau komplexer organischer Verbindungen auffällig. Bei der Sulfatreduktion entsteht hochkorrosiver elementarer Schwefel. Dementsprechend wurde bei den chemischen Analysen geringe Mengen korrodiertes Eisen gefunden. Es ist außerdem, auffällig, dass viele pathogene, opportunistische pathogene und hygienisch relevante Bakterien zu finden sind. Das Vorkommen dieser Bakteriengruppen deutet darauf hin, dass es Bereiche im System mit Stagnation gibt, in denen die Temperatur um 37 °C liegt. Die meisten pathogenen Keime entwickeln sich bei der Körpertemperatur des Menschen am Besten. Bei höheren Temperaturen entwickeln sich auch thermophile Bakterien.

Die Ergebnisse des Sequenzabgleichs sind in Tab. 41 dargestellt. Die Zahl hinter dem lateinischen Namen beschreibt hierbei den Anteil der ermittelten Sequenzen, deren nächster Verwandter das jeweilige Bakterium ist.



Tab. 41 Anteile der einzelnen Gattungen

Gattung	Anteil in %	Gattung	Anteil in %	Gattung	Anteil in %
Desulfotomaculum	36,08	Desulfovibrio	0,49	Rhodobacter	0,12
Propionibacterium	13,28	Caloramator	0,45	Microbacterium	0,12
Streptococcus	8,35	Bacillus	0,44	Veillonella	0,11
Sphingobium	7,26	Paracoccus	0,42	Neisseria	0,11
Syntrophus	5,07	Phenylobacterium	0,39	Azospira	0,10
Clostridium	3,47	Legionella	0,38	Desulfurispora	0,09
Pseudomonas	2,87	Cellulomonas	0,38	Flavobacterium	0,09
Corynebacterium	2,78	Carboxydocella	0,36	Tissierella Soehngenia	0,08
Novosphingobium	1,95	Dehalobacter Syntrophobotulus	0,29	Polaromonas	0,07
Sediminibacterium	1,84	Brevundimonas	0,28	Brachybacterium	0,07
Desulfosporosinus	1,59	Paenibacillus	0,25	Gemmata	0,06
Treponema	1,57	Chryseobacterium	0,24	Pseudoalteromonas	0,06
Achromobacter	1,22	Propionicimonas	0,23	Rhodoplanes	0,05
Staphylococcus	1,20	Sulfuritalea	0,20	Mycobacterium	0,05
Flavisolibacter	0,95	Sphingobacterium	0,19	Coprococcus	0,05
Hydrogenophaga	0,62	Desulfomicrobium	0,16	Thauera	0,05
Acinetobacter	0,56	Methylothera	0,16	Bdellovibrio	0,03
Mycoplana	0,56	Prevotella	0,14	Agrococcus	0,03
Burkholderia	0,53	Enterococcus	0,13	Enhydrobacter	0,03
Georgenia	0,51	Leptospira	0,12	Dechloromonas	0,03

Desulfotomaculum spp., *Propionibacterium spp.*, *Streptococcus spp.*, *Sphingobium spp.*, *Syntrophus spp.* konnten als nächste Verwandte der bestimmbareren, dominanten Bakterien in der Population identifiziert werden. Im Folgenden sollen die wesentlichen Merkmale dieser Bakterien genauer dargestellt werden.

Desulfotomaculum spp.

Desulfotomaculum können in der Regel in Grundwasser, im Sedimentgestein oder im Kot von Tieren (hauptsächlich Schweinen), wo wenig Sauerstoff vorhanden ist gefunden werden. Insbesondere *D. alkaliphilum* ist die einzige bekannte obligat alkaliphile Art, wächst nur in pH-Wert zwischen 8,5 bis 11, und wird häufig in Schweine- und Rindergülle gefunden. Bei Desulfotomaculum handelt es sich um Sulfatreduzierende Bakterien.

Propionibacterium spp.

Propionibacterium acnes ist ein langsam wachsendes grampositives, anaerobes Bakterium. Das Bakterium ist ein Teil der Hautflora und Kommensal, aber auch als sekundärer Faktor an der Pathogenese der Akne beteiligt. Es handelt sich um ein opportunistisches pathogenes Bakterium. *Propionibacterium acnes* betreibt einen chemoorganotrophen und heterotrophen Stoffwechsel, er benutzt organische Verbindungen als Energiequelle und ebenso zum Auf-

bau zelleigener Stoffe. Es kann in einer Fermentation verschiedene Substrate zur Energiegewinnung verwerten. Da ein Hauptprodukt dieser Gärung die Propionsäure ist, wird dieser Stoffwechselweg als Propionsäuregärung bezeichnet. Weitere Produkte dieser Gärung sind Essigsäure und Kohlenstoffdioxid (CO₂).

Streptococcus spp.

Hierbei handelt es sich um grampositive, fakultativ anaerobe, aerotolerante, chemoorganotrophe und fermentative Bakterien die hauptsächlich Kohlenhydrate verwerten und dabei hauptsächlich Milchsäure homofermentativ bilden. Sie sind Katalase-negativ, Oxidase-negativ und nicht proteolytisch. Einige Streptokokken können leichte bis schwere Erkrankungen von Tieren und Menschen verursachen.

Sphingobium spp.

Es handelt sich hierbei um ein gewöhnliches Bodenbakterium, welches in der Lage ist, komplexe organische Verbindungen wie z.B. Chloraromaten, Phenole und Pentachlorophenol abzubauen.

Syntrophus spp.

Bakterien der Gattung Syntrophus können in anaeroben Umgebungen gefunden werden wie z.B. Klärschlamm. Sie sind fähig komplexe organische Verbindungen abzubauen und werden oft bei biologischen Sanierungen (Bioremediation) als abbauende Organismen erkannt.

3.3.4.2 Mikrobiologische Analyse 2 vom 16.08.2017

Im Folgenden sind die Anteile der Spezies auf der Basis Ihrer Stoffwechselfunktionen dargestellt.

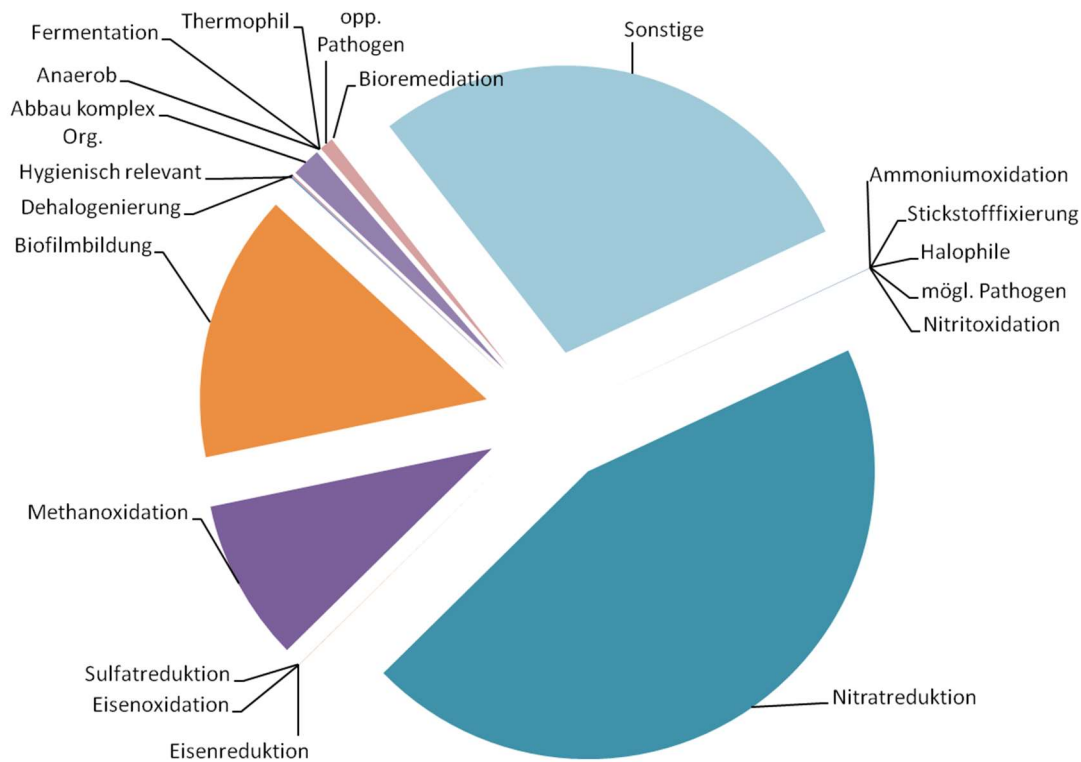


Abb. 87: Anteile der einzelnen Gattungen auf Basis ihrer Stoffwechselfunktionen

Während bei der vorangegangenen Probe Sulfatreduzierer dominierten, haben nun Nitratreduzierer den größten Anteil. Bei der Nitratreduktion fallen Säuren an, die je nach Menge in der Lage sind den pH-Wert des Umlaufwassers abzusenken und das Korrosionsrisiko zu erhöhen. Ein derartiger pH-Wert-Abfall wurde aber in diesem Zeitraum nicht beobachtet. Aufgrund der Verwendung von entsalztem Wasser und einer geringen Nahrungsmenge dürften die absoluten Keimzahlen gering sein. Auch die Biofilmbildung ist in dieser Probe möglich, was vor allem an dem Vorkommen von Pseudomonaden liegt. Biofilme bilden ein eigenes Milieu in dem nicht nur der pH-Wert sinkt sondern sich auch andere Kulturen entwickeln können.

Die Ergebnisse des Sequenzabgleichs sind in Tab. 42 dargestellt.

Tab. 42 Anteile der einzelnen Gattungen

Bezeichnung	Anteil in %	Bezeichnung	Anteil in %	Bezeichnung	Anteil in %
Achromobacter	44,60	Fonticella	0,03	Bryum argenteum var. argenteum	0,00
Sphingopyxis	23,76	Cellulomonas	0,02	Gallionella	0,00
Pseudomonas	15,12	Arachidicoccus	0,02	Altererythrobacter	0,00
Methylophilus	9,14	Ruminococcaceae UCG-014	0,02	Anaeromyxobacter	0,00
Sphingobacterium	1,75	Agromyces	0,02	Gordonia	0,00
Georgenia	1,61	Rhizobium	0,01	Levilinea	0,00
Microbacterium	0,94	Novosphingobium	0,01	Luteimonas	0,00
Microcella	0,92	Chryseoglobus	0,01	Methylobacter	0,00
Aerococcus	0,73	Parablastomonas	0,01	Mobilitalea	0,00
Brevundimonas	0,50	Acidovorax	0,01	Pelosinus	0,00
Agrococcus	0,18	Cupriavidus	0,01	Pseudorhodoferax	0,00
Sphingomonas	0,10	Caproiciproducens	0,01	Rikenellaceae RC9 gut group	0,00
Trichococcus	0,09	Sediminibacterium	0,01	Sedimentibacter	0,00
Chryseobacterium	0,06	Azospira	0,00	Blastomonas	0,00
Shewanella	0,06	Caulobacter	0,00	Curvibacter	0,00
Yonghaparkia	0,05	Burkholderia-Paraburkholderia	0,00	Ensifer	0,00
Sphingobium	0,05	Tessaracoccus	0,00	Erysipelothrix	0,00
Zimmermannella	0,05	Lachnospirillum 5	0,00	Herminiimonas	0,00
Desemzia	0,03	Dechloromonas	0,00	Hydrogenophaga	0,00
Methylotenera	0,03	Ruminiclostridium 1	0,00	Phenylobacterium	0,00

Achromobacter spp., *Sphingopyxis* spp., *Pseudomonas* spp., *Methylophilus* spp., *Sphingobacterium* spp. konnten als nächste Verwandte der bestimmaren, dominanten Bakterien in der Population identifiziert werden. Im Folgenden sollen die wesentlichen Merkmale dieser Bakterien genauer dargestellt werden.

***Achromobacter* spp.**

Achromobacter ist eine Bakterien-Gattung aus der Familie der Alcaligenaceae, die zur Ordnung der Burkholderiales gehört. Es handelt sich um gram-negative, stäbchenförmige Bakterien. Der Katalase- und Oxidase-Test fällt positiv aus. Sie sind durch peritriche Geißeln beweglich und kommen im Boden und Wasser vor. Einige Arten sind Wasserstoffoxidierer, man spricht auch von Knallgasbakterien. Sie sind in der Lage Nitrat und Nitrit zu reduzieren.

***Sphingopyxis* spp.**

Konnte in einem Salzsee in Korea zum ersten Mal isoliert werden. Das Bakterium ist gelb pigmentiert und benötigt Meersalze für das Wachstum.



Pseudomonas spp.

Pseudomonaden sind ubiquitäre Bakterien, welche im Boden, in Sümpfen, in küstennahen Lebensräumen und in Tier- und Pflanzengewebe gefunden werden können. Im Allgemeinen können diese Bakterien eine Vielzahl von physischen Bedingungen tolerieren. Pseudomonaden bilden bevorzugt Biofilme aus.

Methylophilus spp.

Gehört zu der Gruppe der Methylophilaceae und ist in der Lage Methanol zu verwerten. Das Bakterium ist stäbchenförmig und gram-negativ.

Sphingobacterium spp.

Es handelt es sich um Gram-negative, unbewegliche Bakterien. Die Bakterien sind chemotroph und aerob.

3.3.4.3 Wasserchemische Analyse 1 vom 22.03.2017

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Systemwasseranalyse aufgeführt.

Laborwerte

Fe part.+gel.	Eisen partikulär u. gelöst	mg/l	0,13 *
Fe gel.	Eisen gelöst	mg/l	n.b
Cu	Kupfer	mg/l	0,06
Zn	Zink	mg/l	0,00
Al	Aluminium	mg/l	0,10
Mn	Mangan	µg/l	25,69
Ni	Nickel	µg/l	n.b
Cr	Chrom	µg/l	14,58
Na	Natrium	mg/l	13,01
K	Kalium	mg/l	2,94
Mg	Magnesium	mg/l	3,23
Ca	Kalzium	mg/l	7,09
Mo	Molybdän	mg/l	0,20
P	Phosphor	mg/l	0,00
Cl ⁻	Chlorid	mg/l	n.b
SO ₄ ²⁻	Sulfat	mg/l	n.b
NO ₃ ⁻	Nitrat	mg/l	n.b
NPOC	Organischer Kohlenstoff	mg/l	n.b
IC	Anorganischer Kohlenstoff	mg/l	n.b
Zellzahl	Keimbelastung	l ⁻¹	n.b

Vor-Ort-Werte

pH	-	9,4
Redoxpotential (gemessen)	mV	-422,8
Sauerstoffgehalt	mg/l	0,000
Leitfähigkeit	µS/cm	96,6
Temperatur	°C	7,4

* 0,00: Wert liegt unterhalb der Nachweisgrenze; n.b. : nicht bestimmt



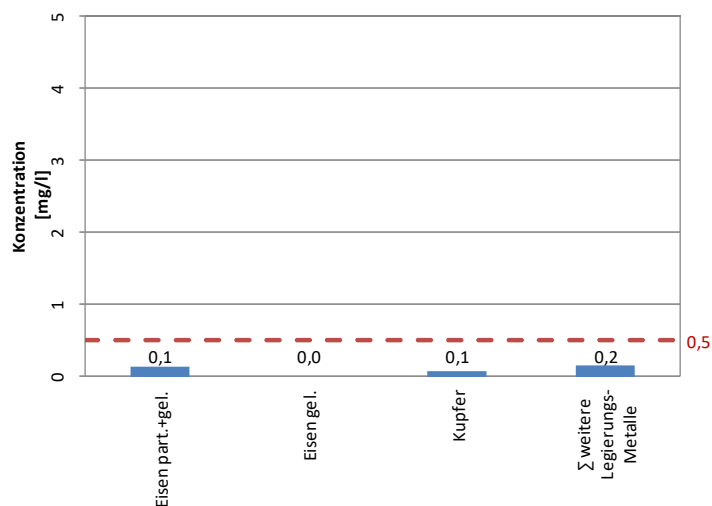
Bewertung

Die folgende Tabelle erläutert die Messergebnisse im Einzelnen einschließlich einer individuellen Bewertung und Handlungsempfehlungen.

Ergebnis

Bewertung und Handlungsempfehlung

Metalle



Gelöste und partikulär vorkommende Eisenverbindungen, bzw. Kupfer im Systemwasser stellen die Haupt-Korrosionsprodukte dar. Sie sind daher indikativ für aktive Korrosionsprozesse. Gelöstes Eisen stellt die Vorstufe zu partikulären Bestandteilen da. Das Fehlen partikulärer Bestandteile bei einem hohen Anteil gelöster Bestandteile kann verschiedene Ursachen haben: entweder die partikulären Bestandteil werden wirksam gefiltert oder die Korrosionsprozesse sind infolge Sauerstoffmangel zum Erliegen gekommen. Metallgehalte (gelöst) bis zu 0,5 mg/L werden als unkritisch angesehen.

Bewertung: Es sind sehr geringe Mengen an partikulärem Eisen nachweisbar. Gelöstes Eisen wurde nicht bestimmt.

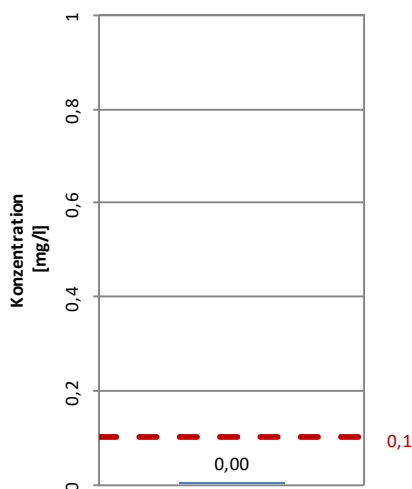
Salze

Nicht bestimmt

Chlorid, Sulfat und Nitrat fördern als Elektrolyten durch die Erhöhung der Leitfähigkeit die Korrosion. Zusätzlich tragen Nitrat und Sulfat als Nährsalze sowie organischer Kohlenstoff (NPOC) zu einem erhöhten Keim-Wachstum bei. Die Salze werden über das Füllwasser und ggf. über das Nachspeisewasser eingebracht. Organischer Kohlenstoff stammt aus zugesetzten Inhibitoren, geölten und nicht gereinigten Bauteilen oder Kunststoff-Dichtungen.

Bewertung: -

Sauerstoffgehalt

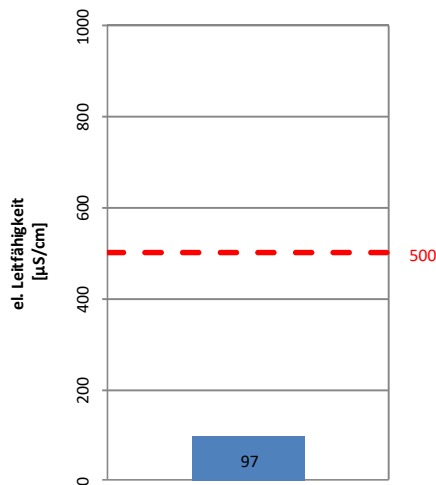


Das Vorhandensein von Sauerstoff ist Voraussetzung für die nicht-mikrobiell induzierte Korrosion von Eisen und Kupfer. Der Sauerstoffgehalt ist nach Neubefüllung hoch und sinkt in gasdichten Systemen mit der Betriebszeit, weil er durch Korrosionsprozesse aufgebraucht wird. Die Korrosionsprozesse kommen dann zum Erliegen. Aufgrund der Erfahrung nimmt die Korrosionsrate ab einem Sauerstoffgehalt von 0,1 mg/L stark zu. Ein hoher Sauerstoffgehalt bei einem nicht frisch befüllten, geschlossenen System weist auf Gasdiffusion durch dünnwandige Kunststoffrohre, nicht ordnungsgemäße Druckhaltungssysteme oder offene Ausgleichsbehälter hin.

Bewertung: Der Sauerstoffgehalt ist mit 0,00 mg/L unter der Nachweisgrenze. Ein Messfehler wird nicht ausgeschlossen.



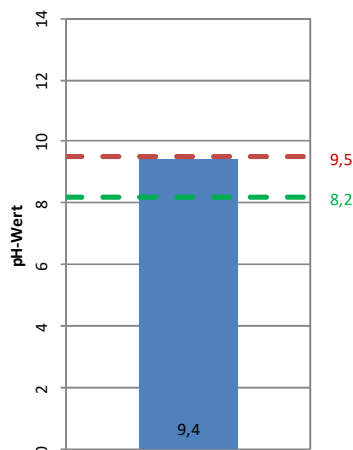
Leitfähigkeit



Die Leitfähigkeit gibt die elektrolytische Eigenschaft des Systemwassers an. Das Korrosionsrisiko steigt mit der Erhöhung der Leitfähigkeit. Entsalztes Wasser weist in der Praxis eine Leitfähigkeit von etwas über 100 µS/cm, Leitungswasser bis zu 1200 µS/cm und mehr auf. In einem Systemwasser ohne Zusatz von Korrosionsschutzmitteln wird eine Leitfähigkeit von < 500 µS/cm zur Vermeidung von Korrosion toleriert.

Bewertung: Die Leitfähigkeit ist mit 97 µS/cm sehr gering und deutet auf die Verwendung voll-entsalztem Wassers hin.

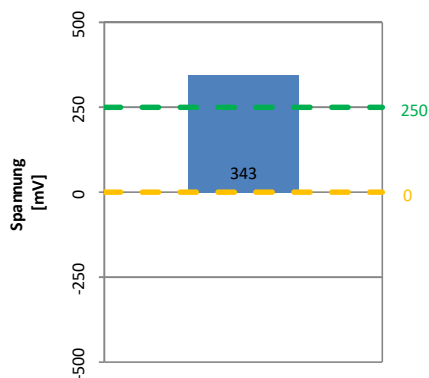
pH - Wert



Der pH-Wert ist ein Hauptindikator für Korrosionsrisiken und sollte zwischen 8,2 und 9,5 liegen. Ist Aluminium im System vorhanden, darf der pH-Wert 8,5 nicht überschreiten.

Bewertung: Der pH-Wert von 9,4 ist ausreichend hoch und weist eine Schutzfunktion gegen Korrosion auf. Allerdings unterliegen bei pH-Werten oberhalb 8,5 Aluminium-Werkstoffe dem Risiko der Korrosion (es wurden geringe Mengen Aluminium nachgewiesen).

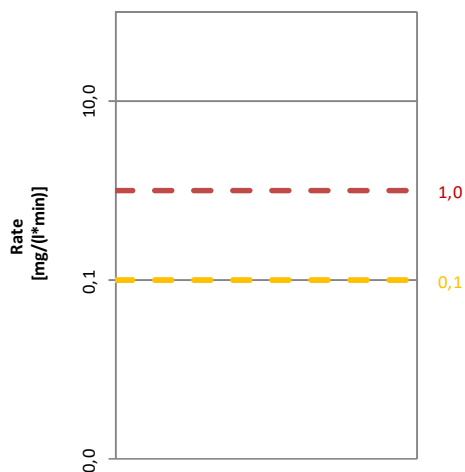
Redoxpotential normiert



Das sauerstoffkorrigierte, auf Standardwasserstoffelektrode und pH 7 bzw. den Neutralpunkt normierte Redoxpotential gibt in Systemen ohne Wasserbehandlung Aufschluss über den Systemzustand. Es zeigt an, ob sich Eisen(II) als primäres Korrosionsprodukt im System befindet, Sulfid als Produkt mikrobieller Aktivität vorliegt oder der Systemzustand insgesamt unkritisch ist. Ein Redoxpotential über 250 mV ist unkritisch, es liegen keine gelösten Korrosionsprodukte vor. Zwischen 0 mV und 250 mV liegt gelöstes Eisen(II) vor, ein Redoxpotential von unter 0 mV deutet auf sulfatreduzierende Bakterien hin.

Bewertung: Das normierte Redoxpotential von 343 mV ist unbedenklich.

Korrosionsrate

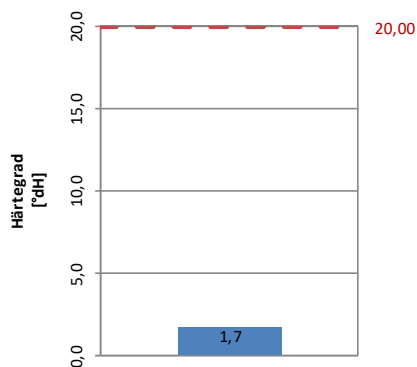


Die Korrosionsrate gibt zum Zeitpunkt der Messung die je Zeiteinheit theoretisch gebildete Menge der sekundären Korrosionsprodukte an. Aus diesem Wert kann u.U. auf Grundlage weiterer anlagenspezifischer Parameter auch der absolute Gesamtertrag an sekundären Korrosionsprodukten und der Materialabtrag in mm/a berechnet werden. Bei der Korrosionsrate handelt es sich um einen neu entwickelten Indikatorwert, dessen Aussagekraft und Praxisbezug noch ermittelt werden muss.

Bewertung: Die theoretische Korrosionsrate beträgt 0,0 mg/(l*min). Dieser Wert ist ohne Bedeutung, da wahrscheinlich der Sauerstoffgehalt falsch gemessen wurde.



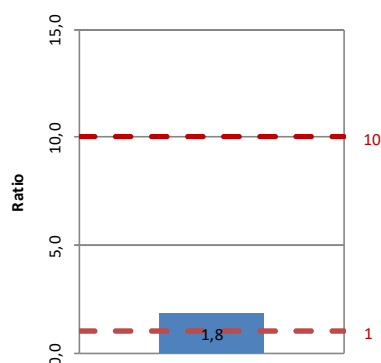
Gesamthärte



Härtebildner bergen die Gefahr der Verkalkung an heißen Bauteilen wie Wärmeüberträgern oder Erhitzern. Ihr Grenzwert ist abhängig von dem Vorhandensein entsprechender Anlagenelemente und der Anlagengesamtleistung (gem. VDI 2035 Blatt 1)

Bewertung: Der Wert von 1,7 °dH unterschreitet den Grenzwert für Kühlanlagen bei weitem.

Stoffmengenanteil $\text{Na}/(\text{Ca}+\text{Mg})$



Das Verhältnis der molaren Konzentrationen von Natrium zu Calcium und Magnesium gibt einen Hinweis auf die Vorbehandlung des Systemwassers. Bei einem Wert unter 1 ist das Wasser unaufbereitet oder voll-entsalzt, bei einem Wert über 10 ist es nur enthärtet.

Bewertung: Der Wert von 1,8 weist auf die Verwendung von verschnittenem vollentsalztem Wasser hin.

3.3.4.4 Wasserchemische Analyse 2 vom 16.08.2017

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Systemwasseranalyse aufgeführt.

Laborwerte

Fe part.+gel.	Eisen partikulär u. gelöst	mg/l	0,74 *
Fe gel.	Eisen gelöst	mg/l	0,13
Cu	Kupfer	mg/l	0,05
Zn	Zink	mg/l	0,02
Al	Aluminium	mg/l	0,12
Mn	Mangan	µg/l	35,39
Ni	Nickel	µg/l	51,25
Cr	Chrom	µg/l	15,33
Na	Natrium	mg/l	11,45
K	Kalium	mg/l	2,68
Mg	Magnesium	mg/l	3,02
Ca	Kalzium	mg/l	7,15
Mo	Molybdän	mg/l	n.b
P	Phosphor	mg/l	0,00
Cl ⁻	Chlorid	mg/l	n.b
SO ₄ ²⁻	Sulfat	mg/l	n.b
NO ₃ ⁻	Nitrat	mg/l	n.b
NPOC	Organischer Kohlenstoff	mg/l	2,7
IC	Anorganischer Kohlenstoff	mg/l	9,1
Zellzahl	Keimbelastung	l ⁻¹	n.b

Vor-Ort-Werte

pH	-	9,4
Redoxpotential (gemessen)	mV	-619,0
Sauerstoffgehalt	mg/l	0,030
Leitfähigkeit	µS/cm	111,6
Temperatur	°C	12,1

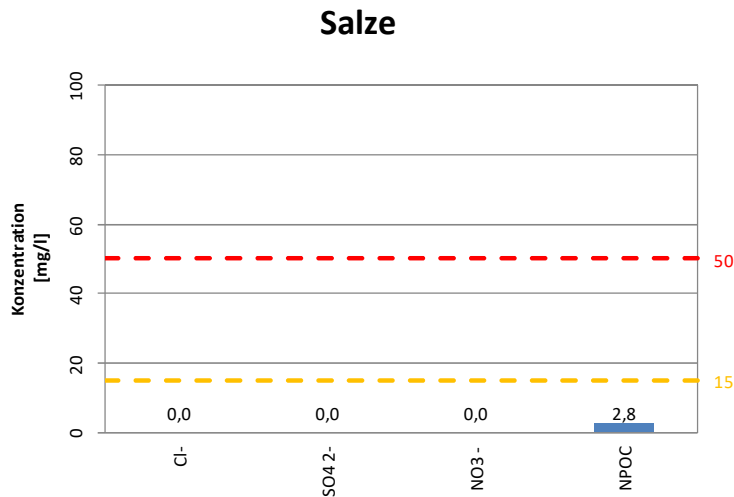
* 0,00: Wert liegt unterhalb der Nachweisgrenze; n.b. : nicht bestimmt



Bewertung

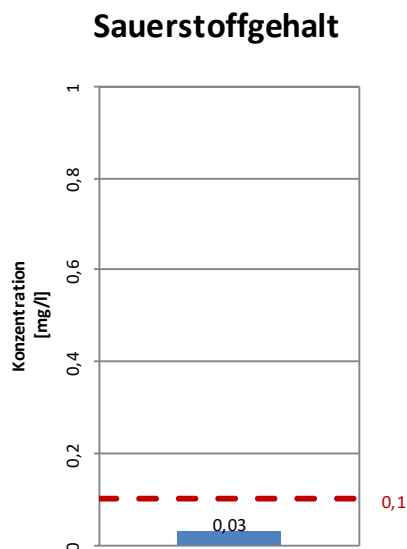
Die folgende Tabelle erläutert die Messergebnisse im Einzelnen einschließlich einer individuellen Bewertung und Handlungsempfehlungen.

Ergebnis	Bewertung und Handlungsempfehlung										
Metalle <table border="1"><thead><tr><th>Metall</th><th>Konzentration [mg/l]</th></tr></thead><tbody><tr><td>Eisen part.+gel.</td><td>0,8</td></tr><tr><td>Eisen gel.</td><td>0,1</td></tr><tr><td>Kupfer</td><td>0,1</td></tr><tr><td>Σ weitere Legierungs-Metalle</td><td>0,3</td></tr></tbody></table>	Metall	Konzentration [mg/l]	Eisen part.+gel.	0,8	Eisen gel.	0,1	Kupfer	0,1	Σ weitere Legierungs-Metalle	0,3	Gelöste und partikulär vorkommende Eisenverbindungen, bzw. Kupfer im Systemwasser stellen die Haupt-Korrosionsprodukte dar. Sie sind daher indikativ für aktive Korrosionsprozesse. Gelöstes Eisen stellt die Vorstufe zu partikulären Bestandteilen da. Das Fehlen partikulärer Bestandteile bei einem hohen Anteil gelöster Bestandteile kann verschiedene Ursachen haben: entweder die partikulären Bestandteil werden wirksam gefiltert oder die Korrosionsprozesse sind infolge Sauerstoffmangel zum Erliegen gekommen. Metallgehalte (gelöst) bis zu 0,5 mg/L werden als unkritisch angesehen. Bewertung: Es sind leicht erhöhte Mengen an partikulärem Eisen und sehr geringe Mengen an gelöstem Eisen und Kupfer nachweisbar. Weiterhin wurde Zink nachgewiesen. Zink und Kupfer stammen aus Buntmetall-fittingen.
Metall	Konzentration [mg/l]										
Eisen part.+gel.	0,8										
Eisen gel.	0,1										
Kupfer	0,1										
Σ weitere Legierungs-Metalle	0,3										



Chlorid, Sulfat und Nitrat fördern als Elektrolyten durch die Erhöhung der Leitfähigkeit die Korrosion. Zusätzlich tragen Nitrat und Sulfat als Nährsalze sowie organischer Kohlenstoff (NPOC) zu einem erhöhten Keim-Wachstum bei. Die Salze werden über das Füllwasser und ggf. über das Nachspeisewasser eingebracht. Organischer Kohlenstoff stammt aus zugesetzten Inhibitoren, geölten und nicht gereinigten Bauteilen oder Kunststoffdichtungen.

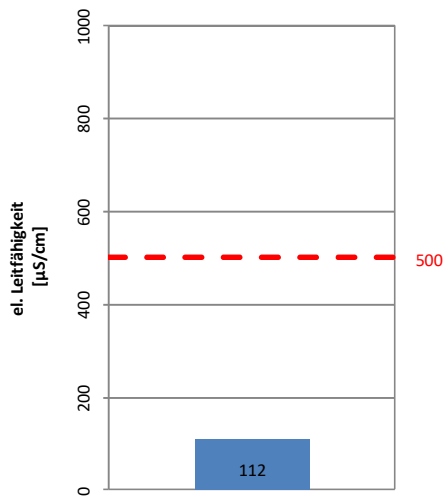
Bewertung: Gehalte wurden außer für NPOC nicht bestimmt. NPOC ist unauffällig.



Das Vorhandensein von Sauerstoff ist Voraussetzung für die nicht-mikrobiell induzierte Korrosion von Eisen und Kupfer. Der Sauerstoffgehalt ist nach Neubefüllung hoch und sinkt in gasdichten Systemen mit der Betriebszeit, weil er durch Korrosionsprozesse aufgebraucht wird. Die Korrosionsprozesse kommen dann zum Erliegen. Aufgrund der Erfahrung nimmt die Korrosionsrate ab einem Sauerstoffgehalt von 0,1 mg/L stark zu. Ein hoher Sauerstoffgehalt bei einem nicht frisch befüllten, geschlossenen System weist auf Gasdiffusion durch dünnwandige Kunststoffrohre, nicht ordnungsgemäße Druckhaltungssysteme oder offene Ausgleichsbehälter hin.

Bewertung: Der Sauerstoffgehalt ist mit 0,03 mg/L sehr gering und deutet auf ein verhältnismäßig sauerstoffdichtes System hin.

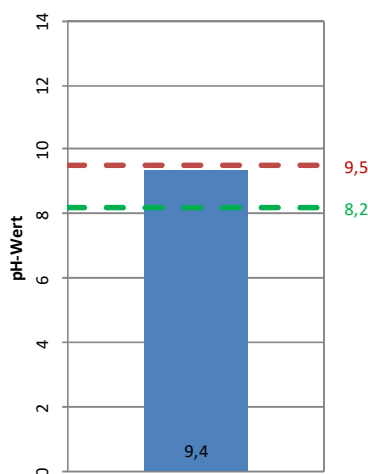
Leitfähigkeit



Die Leitfähigkeit gibt die elektrolytische Eigenschaft des Systemwassers an. Das Korrosionsrisiko steigt mit der Erhöhung der Leitfähigkeit. Entsalztes Wasser weist in der Praxis eine Leitfähigkeit von etwas über 100 µS/cm, Leitungswasser bis zu 1200 µS/cm und mehr auf. In einem Systemwasser ohne Zusatz von Korrosionsschutzmitteln wird eine Leitfähigkeit von < 500 µS/cm zur Vermeidung von Korrosion toleriert.

Bewertung: Die Leitfähigkeit ist mit 112 µS/cm sehr gering und deutet auf die Verwendung voll-entsalztem Wassers hin. Seit der letzten Beprobung (97 µS/cm) wurde wahrscheinlich etwas Standortwasser nachgespeist.

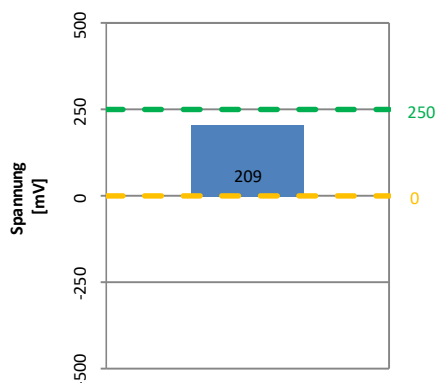
pH - Wert



Der pH-Wert ist ein Hauptindikator für Korrosionsrisiken und sollte zwischen 8,2 und 9,5 liegen. Ist Aluminium im System vorhanden, darf der pH-Wert 8,5 nicht überschreiten.

Bewertung: Der pH-Wert von 9,4 ist ausreichend hoch und weist eine Schutzfunktion gegen Korrosion auf. Allerdings unterliegen bei pH-Werten oberhalb 8,5 Aluminium-Werkstoffe dem Risiko der Korrosion (es wurde geringe Mengen Aluminium nachgewiesen).

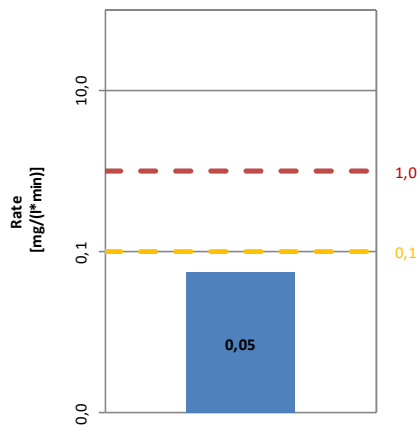
Redoxpotential normiert



Das sauerstoffkorrigierte, auf Standardwasserstoffelektrode und pH 7 bzw. den Neutralpunkt normierte Redoxpotential gibt in Systemen ohne Wasserbehandlung Aufschluss über den Systemzustand. Es zeigt an, ob sich Eisen(II) als primäres Korrosionsprodukt im System befindet, Sulfid als Produkt mikrobieller Aktivität vorliegt oder der Systemzustand insgesamt unkritisch ist. Ein Redoxpotential über 250 mV ist unkritisch, es liegen keine gelösten Korrosionsprodukte vor. Zwischen 0 mV und 250 mV liegt gelöstes Eisen(II) vor, ein Redoxpotential von unter 0 mV deutet auf sulfatreduzierende Bakterien hin.

Bewertung: Das normierte Redoxpotential von 209 mV weist auf die Anwesenheit des primären Korrosionsproduktes Eisen(II) hin, was durch die wasserchemische Untersuchung bestätigt wird. Dies deutet auf aktive Korrosionsprozesse in geringem Umfang hin.

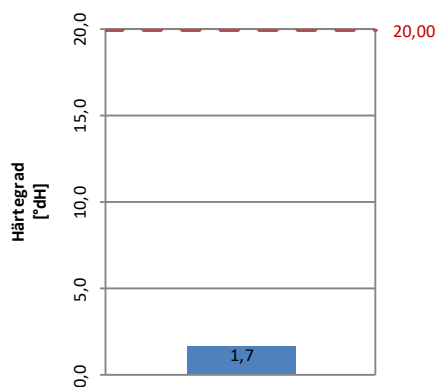
Korrosionsrate



Die Korrosionsrate gibt zum Zeitpunkt der Messung die je Zeiteinheit theoretisch gebildete Menge der sekundären Korrosionsprodukte an. Aus diesem Wert kann u.U. auf Grundlage weiterer anlagenspezifischer Parameter auch der absolute Gesamtertrag an sekundären Korrosionsprodukten und der Materialabtrag in mm/a berechnet werden. Bei der Korrosionsrate handelt es sich um einen neu entwickelten Indikatorwert, dessen Aussagekraft und Praxisbezug noch ermittelt werden muss.

Bewertung: Die theoretische Korrosionsrate beträgt 0,05 mg/(l*min). Dieser Wert ist ohne Bedeutung, da wahrscheinlich der Sauerstoffgehalt falsch gemessen wurde.

Gesamthärte

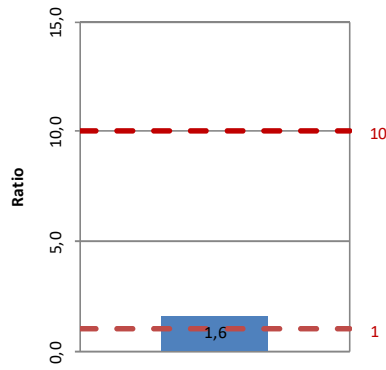


Härtebildner bergen die Gefahr der Verkalkung an heißen Bauteilen wie Wärmeübertragern oder Erhitzern. Ihr Grenzwert ist abhängig von dem Vorhandensein entsprechender Anlagenelemente und der Anlagengesamtleistung (gem. VDI 2035 Blatt 1)

Bewertung: Der Wert von 1,7 °dH unterschreitet den Grenzwert für Kühlanlagen.



Stoffmengenanteil $\text{Na}/(\text{Ca}+\text{Mg})$



Das Verhältnis der molaren Konzentrationen von Natrium zu Calcium und Magnesium gibt einen Hinweis auf die Vorbehandlung des Systemwassers. Bei einem Wert unter 1 ist das Wasser unaufbereitet oder voll-entsalzt, bei einem Wert über 10 ist es nur enthärtet.

Bewertung: Der Wert von 1,6 weist auf die Verwendung verschnittenem vollentsalztem Wasser hin.

3.3.4.5 Wasserchemische Analyse 3 vom 04.12.2017

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Systemwasseranalyse aufgeführt.

Laborwerte

Fe part.+gel.	Eisen partikulär u. gelöst	mg/l	0,15 *
Fe gel.	Eisen gelöst	mg/l	0,22
Cu	Kupfer	mg/l	0,02
Zn	Zink	mg/l	0,02
Al	Aluminium	mg/l	0,13
Mn	Mangan	µg/l	37,84
Ni	Nickel	µg/l	70,61
Cr	Chrom	µg/l	29,05
Na	Natrium	mg/l	11,83
K	Kalium	mg/l	3,22
Mg	Magnesium	mg/l	3,39
Ca	Kalzium	mg/l	8,72
Mo	Molybdän	mg/l	n.b
P	Phosphor	mg/l	0,00
Cl ⁻	Chlorid	mg/l	n.b
SO ₄ ²⁻	Sulfat	mg/l	n.b
NO ₃ ⁻	Nitrat	mg/l	n.b
NPOC	Organischer Kohlenstoff	mg/l	1,9
IC	Anorganischer Kohlenstoff	mg/l	1,9
Zellzahl	Keimbelastung	l ⁻¹	n.b

Vor-Ort-Werte

pH	-	9,4
Redoxpotential (gemessen)	mV	-631,1
Sauerstoffgehalt	mg/l	0,040
Leitfähigkeit	µS/cm	105,7
Temperatur	°C	10,4

* 0,00: Wert liegt unterhalb der Nachweisgrenze; n.b. : nicht bestimmt

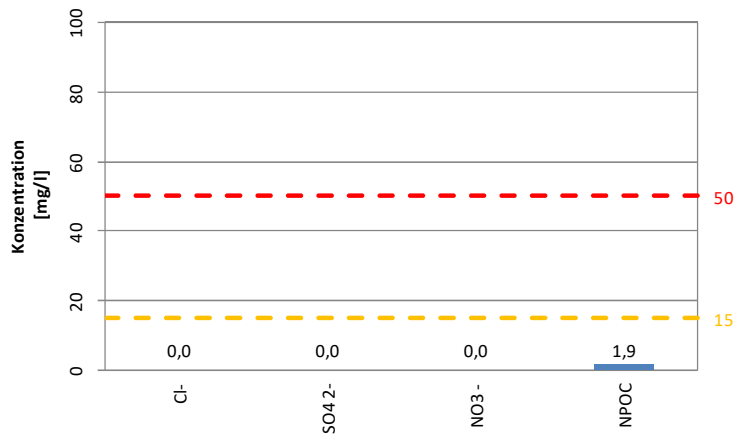


Bewertung

Die folgende Tabelle erläutert die Messergebnisse im Einzelnen einschließlich einer individuellen Bewertung und Handlungsempfehlungen.

Ergebnis	Bewertung und Handlungsempfehlung										
Metalle <table border="1"><thead><tr><th>Metall</th><th>Konzentration [mg/l]</th></tr></thead><tbody><tr><td>Eisen part.+gel.</td><td>0,2</td></tr><tr><td>Eisen gel.</td><td>0,2</td></tr><tr><td>Kupfer</td><td>0,0</td></tr><tr><td>Σ weitere Legierungs-Metalle</td><td>0,3</td></tr></tbody></table>	Metall	Konzentration [mg/l]	Eisen part.+gel.	0,2	Eisen gel.	0,2	Kupfer	0,0	Σ weitere Legierungs-Metalle	0,3	Gelöste und partikulär vorkommende Eisenverbindungen, bzw. Kupfer im Systemwasser stellen die Haupt-Korrosionsprodukte dar. Sie sind daher indikativ für aktive Korrosionsprozesse. Gelöstes Eisen stellt die Vorstufe zu partikulären Bestandteilen da. Das Fehlen partikulärer Bestandteile bei einem hohen Anteil gelöster Bestandteile kann verschiedene Ursachen haben: entweder die partikulären Bestandteil werden wirksam gefiltert oder die Korrosionsprozesse sind infolge Sauerstoffmangel zum Erliegen gekommen. Metallgehalte (gelöst) bis zu 0,5 mg/L werden als unkritisch angesehen. Bewertung: Es sind leicht erhöhte Mengen an partikulärem Eisen und sehr geringe Mengen an gelöstem Eisen und Kupfer nachweisbar. Der Gehalt an Zink ist seit der letzten Beprobung etwas zurückgegangen.
Metall	Konzentration [mg/l]										
Eisen part.+gel.	0,2										
Eisen gel.	0,2										
Kupfer	0,0										
Σ weitere Legierungs-Metalle	0,3										

Salze

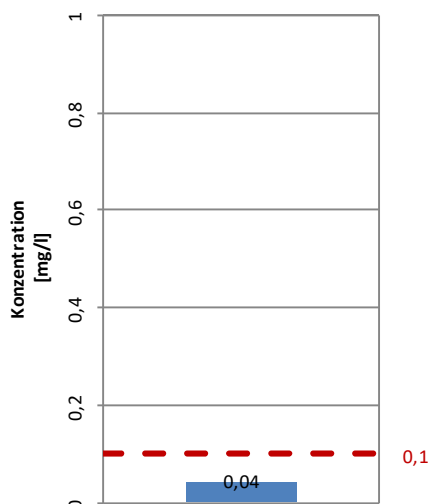


Chlorid, Sulfat und Nitrat fördern als Elektrolyten durch die Erhöhung der Leitfähigkeit die Korrosion. Zusätzlich tragen Nitrat und Sulfat als Nährsalze sowie organischer Kohlenstoff (NPOC) zu einem erhöhten Keim-Wachstum bei. Die Salze werden über das Füllwasser und ggf. über das Nachspeisewasser eingebracht. Organischer Kohlenstoff stammt aus zugesetzten Inhibitoren, geölten und nicht gereinigten Bauteilen oder Kunststoffdichtungen.

Bewertung: Gehalte wurden bis NPOC nicht bestimmt. NPOC ist unauffällig.



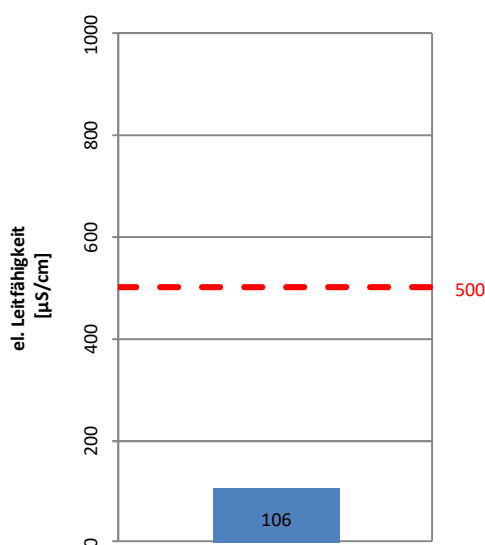
Sauerstoffgehalt



Das Vorhandensein von Sauerstoff ist Voraussetzung für die nicht-mikrobiell induzierte Korrosion von Eisen und Kupfer. Der Sauerstoffgehalt ist nach Neubefüllung hoch und sinkt in gasdichten Systemen mit der Betriebszeit, weil er durch Korrosionsprozesse aufgebraucht wird. Die Korrosionsprozesse kommen dann zum Erliegen. Aufgrund der Erfahrung nimmt die Korrosionsrate ab einem Sauerstoffgehalt von 0,1 mg/L stark zu. Ein hoher Sauerstoffgehalt bei einem nicht frisch befüllten, geschlossenen System weist auf Gasdiffusion durch dünnwandige Kunststoffrohre, nicht ordnungsgemäße Druckhaltungssysteme oder offene Ausgleichsbehälter hin.

Bewertung: Der Sauerstoffgehalt ist mit 0,04 mg/L sehr gering und deutet auf ein verhältnismäßig sauerstoffdichtes System hin.

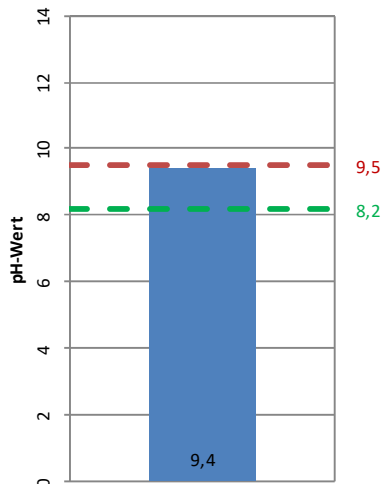
Leitfähigkeit



Die Leitfähigkeit gibt die elektrolytische Eigenschaft des Systemwassers an. Das Korrosionsrisiko steigt mit der Erhöhung der Leitfähigkeit. Entsalztes Wasser weist in der Praxis eine Leitfähigkeit von etwas über 100 µS/cm, Leitungswasser bis zu 1200 µS/cm und mehr auf. In einem Systemwasser ohne Zusatz von Korrosionsschutzmitteln wird eine Leitfähigkeit von < 500 µS/cm zur Vermeidung von Korrosion toleriert.

Bewertung: Die Leitfähigkeit ist mit 106 µS/cm sehr gering und deutet auf die Verwendung von vollentsalztem Wassers hin.

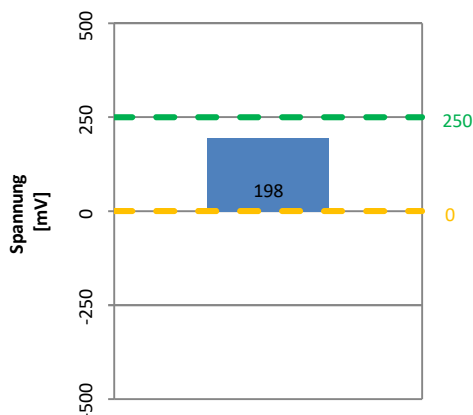
pH - Wert



Der pH-Wert ist ein Hauptindikator für Korrosionsrisiken und sollte zwischen 8,2 und 9,5 liegen. Ist Aluminium im System vorhanden, darf der pH-Wert 8,5 nicht überschreiten.

Bewertung: Der pH-Wert von 9,4 ist ausreichend hoch und weist eine Schutzfunktion gegen Korrosion auf. Allerdings unterliegen bei pH-Werten oberhalb 8,5 Aluminium-Werkstoffe dem Risiko der Korrosion (es wurde geringe Mengen Aluminium nachgewiesen).

Redoxpotential normiert

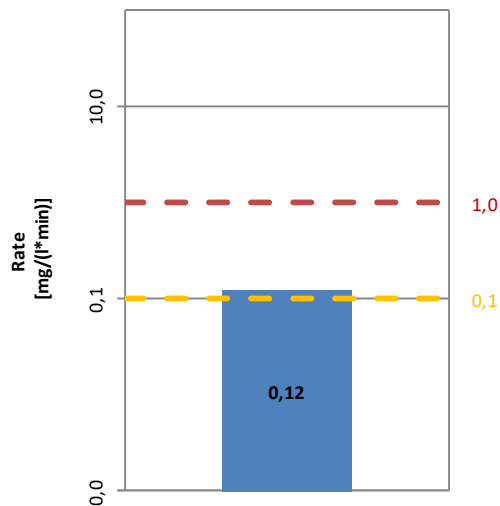


Das sauerstoffkorrigierte, auf Standardwasserstoffelektrode und pH 7 bzw. den Neutralpunkt normierte Redoxpotential gibt in Systemen ohne Wasserbehandlung Aufschluss über den Systemzustand. Es zeigt an, ob sich Eisen(II) als primäres Korrosionsprodukt im System befindet, Sulfid als Produkt mikrobieller Aktivität vorliegt oder der Systemzustand insgesamt unkritisch ist. Ein Redoxpotential über 250 mV ist unkritisch, es liegen keine gelösten Korrosionsprodukte vor. Zwischen 0 mV und 250 mV liegt gelöstes Eisen(II) vor, ein Redoxpotential von unter 0 mV deutet auf sulfat-reduzierende Bakterien hin.

Bewertung: Das normierte Redoxpotential von 198 mV weist auf die Anwesenheit des primären Korrosionsproduktes Eisen(II) hin, was durch die wasserchemische Untersuchung bestätigt wird. Dies deutet auf aktive Korrosionsprozesse in geringem Umfang hin.



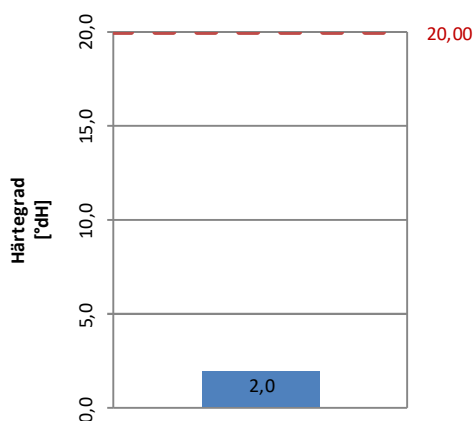
Korrosionsrate



Die Korrosionsrate gibt zum Zeitpunkt der Messung die je Zeiteinheit theoretisch gebildete Menge der sekundären Korrosionsprodukte an. Aus diesem Wert kann u.U. auf Grundlage weiterer anlagenspezifischer Parameter auch der absolute Gesamtertrag an sekundären Korrosionsprodukten und der Materialabtrag in mm/a berechnet werden. Bei der Korrosionsrate handelt es sich um einen neu entwickelten Indikatorwert, dessen Aussagekraft und Praxisbezug noch ermittelt werden muss.

Bewertung: Die theoretische Korrosionsrate beträgt 0,12 mg/(l*min). Dieser Wert ist ohne Bedeutung, da wahrscheinlich der Sauerstoffgehalt falsch gemessen wurde.

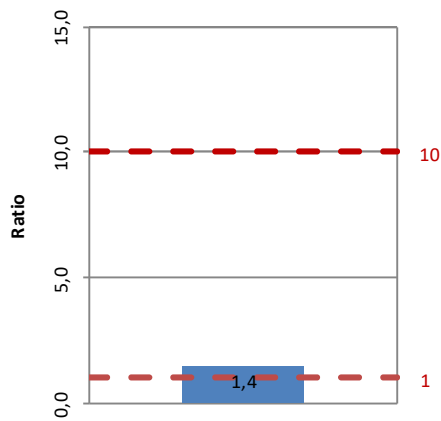
Gesamthärte



Härtebildner bergen die Gefahr der Verkalkung an heißen Bauteilen wie Wärmeübertragern oder Erhitzern. Ihr Grenzwert ist abhängig von dem Vorhandensein entsprechender Anlagenelemente und der Anlagengesamtleistung (gem. VDI 2035 Blatt 1)

Bewertung: Der Wert von 2,0 °dH unterschreitet den Grenzwert für Kühlanlagen.

Stoffmengenanteil $\text{Na}/(\text{Ca}+\text{Mg})$



Das Verhältnis der molaren Konzentrationen von Natrium zu Calcium und Magnesium gibt einen Hinweis auf die Vorbehandlung des Systemwassers. Bei einem Wert unter 1 ist das Wasser un-aufbereitet oder voll-entsalzt, bei einem Wert über 10 ist es nur enthärtet.

Bewertung: Der Wert von 1,4 weist auf die Verwendung verschnittenem vollentsalztem Wasser hin.

**3.3.4.6 Wasserchemische Analyse 4 vom 27.02.2018**

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Systemwasseranalyse aufgeführt.

Laborwerte

Fe part.+gel.	Eisen partikulär u. gelöst	mg/l	0,02 *
Fe gel.	Eisen gelöst	mg/l	0,03
Cu	Kupfer	mg/l	0,01
Zn	Zink	mg/l	0,01
Al	Aluminium	mg/l	0,04
Mn	Mangan	µg/l	16,35
Ni	Nickel	µg/l	0,00
Cr	Chrom	µg/l	0,00
Na	Natrium	mg/l	14,07
K	Kalium	mg/l	3,60
Mg	Magnesium	mg/l	3,54
Ca	Kalzium	mg/l	7,34
Mo	Molybdän	mg/l	n.b
P	Phosphor	mg/l	0,05
Cl ⁻	Chlorid	mg/l	n.b
SO ₄ ²⁻	Sulfat	mg/l	n.b
NO ₃ ⁻	Nitrat	mg/l	n.b
NPOC	Organischer Kohlenstoff	mg/l	n.b
IC	Anorganischer Kohlenstoff	mg/l	n.b
Zellzahl	Keimbelastung	l ⁻¹	n.b

Vor-Ort-Werte

pH	-	9,4
Redoxpotential (gemessen)	mV	-621,1
Sauerstoffgehalt	mg/l	0,050
Leitfähigkeit	µS/cm	100,8
Temperatur	°C	8,9

* 0,00: Wert liegt unterhalb der Nachweisgrenze; n.b. : nicht bestimmt

Bewertung

Die folgende Tabelle erläutert die Messergebnisse im Einzelnen einschließlich einer individuellen Bewertung und Handlungsempfehlungen.

Ergebnis	Bewertung und Handlungsempfehlung										
Metalle <table border="1"><thead><tr><th>Metall</th><th>Konzentration [mg/l]</th></tr></thead><tbody><tr><td>Eisen part.+gel.</td><td>0,0</td></tr><tr><td>Eisen gel.</td><td>0,0</td></tr><tr><td>Kupfer</td><td>0,0</td></tr><tr><td>Σ weitere Legierungs-Metalle</td><td>0,1</td></tr></tbody></table>	Metall	Konzentration [mg/l]	Eisen part.+gel.	0,0	Eisen gel.	0,0	Kupfer	0,0	Σ weitere Legierungs-Metalle	0,1	Gelöste und partikulär vorkommende Eisenverbindungen, bzw. Kupfer im Systemwasser stellen die Haupt-Korrosionsprodukte dar. Sie sind daher indikativ für aktive Korrosionsprozesse. Gelöstes Eisen stellt die Vorstufe zu partikulären Bestandteilen da. Das Fehlen partikulärer Bestandteile bei einem hohen Anteil gelöster Bestandteile kann verschiedene Ursachen haben: entweder die partikulären Bestandteil werden wirksam gefiltert oder die Korrosionsprozesse sind infolge Sauerstoffmangel zum Erliegen gekommen. Metallgehalte (gelöst) bis zu 0,5 mg/L werden als unkritisch angesehen. Bewertung: Es wurden keine relevanten Mengen an gelösten Metalle nachgewiesen.
Metall	Konzentration [mg/l]										
Eisen part.+gel.	0,0										
Eisen gel.	0,0										
Kupfer	0,0										
Σ weitere Legierungs-Metalle	0,1										

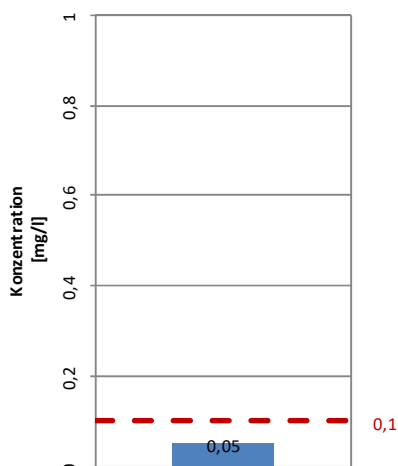
Salze

Nicht bestimmt

Chlorid, Sulfat und Nitrat fördern als Elektrolyten durch die Erhöhung der Leitfähigkeit die Korrosion. Zusätzlich tragen Nitrat und Sulfat als Nährsalze sowie organischer Kohlenstoff (NPOC) zu einem erhöhten Keim-Wachstum bei. Die Salze werden über das Füllwasser und ggf. über das Nachspeisewasser eingebracht. Organischer Kohlenstoff stammt aus zugesetzten Inhibitoren, geölten und nicht gereinigten Bauteilen oder Kunststoff-Dichtungen.

Bewertung: -

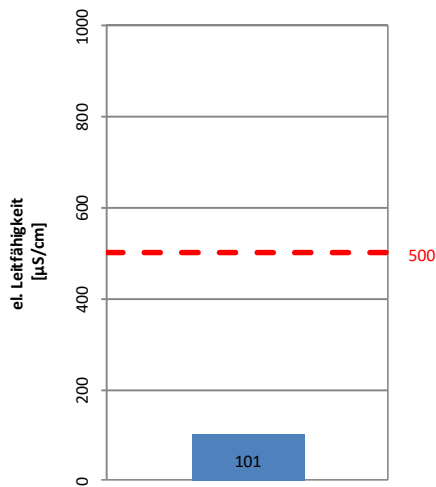
Sauerstoffgehalt



Das Vorhandensein von Sauerstoff ist Voraussetzung für die nicht-mikrobiell induzierte Korrosion von Eisen und Kupfer. Der Sauerstoffgehalt ist nach Neubefüllung hoch und sinkt in gasdichten Systemen mit der Betriebszeit, weil er durch Korrosionsprozesse aufgebraucht wird. Die Korrosionsprozesse kommen dann zum Erliegen. Aufgrund der Erfahrung nimmt die Korrosionsrate ab einem Sauerstoffgehalt von 0,1 mg/L stark zu. Ein hoher Sauerstoffgehalt bei einem nicht frisch befüllten, geschlossenen System weist auf Gasdiffusion durch dünnwandige Kunststoffrohre, nicht ordnungsgemäße Druckhaltungssysteme oder offene Ausgleichsbehälter hin.

Bewertung: Der Sauerstoffgehalt ist mit 0,05 mg/L leicht erhöht und deutet auf das Eindringen geringer Mengen Sauerstoff hin.

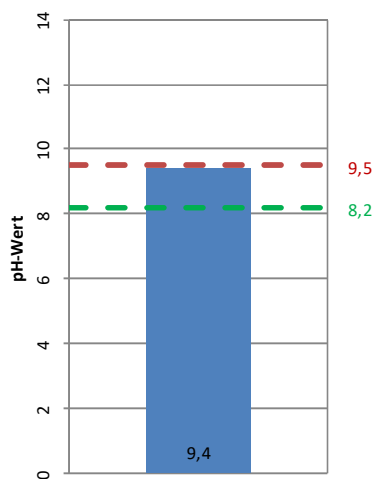
Leitfähigkeit



Die Leitfähigkeit gibt die elektrolytische Eigenschaft des Systemwassers an. Das Korrosionsrisiko steigt mit der Erhöhung der Leitfähigkeit. Entsalztes Wasser weist in der Praxis eine Leitfähigkeit von etwas über 100 µS/cm, Leitungswasser bis zu 1200 µS/cm und mehr auf. In einem Systemwasser ohne Zusatz von Korrosionsschutzmitteln wird eine Leitfähigkeit von < 500 µS/cm zur Vermeidung von Korrosion toleriert.

Bewertung: Die Leitfähigkeit ist mit 101 µS/cm sehr gering und deutet auf die Verwendung von vollentsalztem Wassers hin.

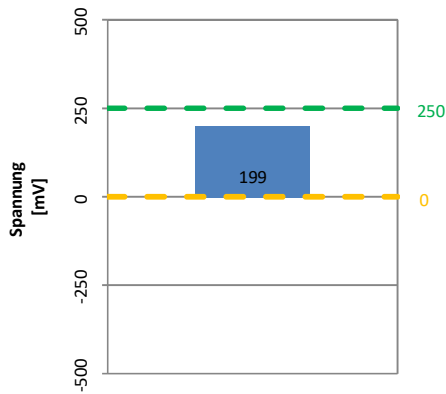
pH - Wert



Der pH-Wert ist ein Hauptindikator für Korrosionsrisiken und sollte zwischen 8,2 und 9,5 liegen. Ist Aluminium im System vorhanden, darf der pH-Wert 8,5 nicht überschreiten.

Bewertung: Der pH-Wert von 9,4 ist ausreichend hoch und weist eine Schutzfunktion gegen Korrosion auf. Allerdings unterliegen bei pH-Werten oberhalb 8,5 Aluminium-Werkstoffe dem Risiko der Korrosion (es wurden geringe Mengen Aluminium nachgewiesen).

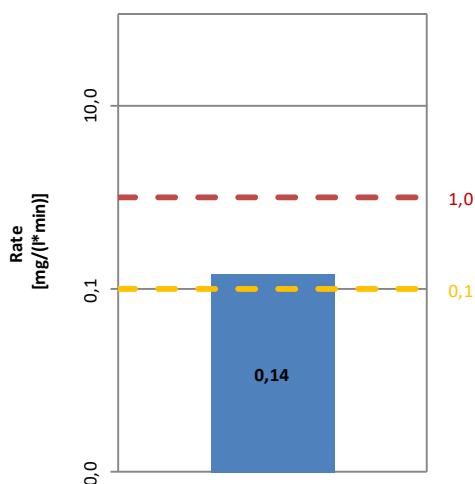
Redoxpotential normiert



Das sauerstoffkorrigierte, auf Standardwasserstoffelektrode und pH 7 bzw. den Neutralpunkt normierte Redoxpotential gibt in Systemen ohne Wasserbehandlung Aufschluss über den Systemzustand. Es zeigt an, ob sich Eisen(II) als primäres Korrosionsprodukt im System befindet, Sulfid als Produkt mikrobieller Aktivität vorliegt oder der Systemzustand insgesamt unkritisch ist. Ein Redoxpotential über 250 mV ist unkritisch, es liegen keine gelösten Korrosionsprodukte vor. Zwischen 0 mV und 250 mV liegt gelöstes Eisen(II) vor, ein Redoxpotential von unter 0 mV deutet auf sulfatreduzierende Bakterien hin.

Bewertung: Das normierte Redoxpotential von 199 mV weist auf die Anwesenheit des primären Korrosionsproduktes Eisen(II) hin, was durch die wasserchemische Untersuchung eingeschränkt bestätigt wird. Die nachgewiesenen Metallgehalte sind sehr gering.

Korrosionsrate



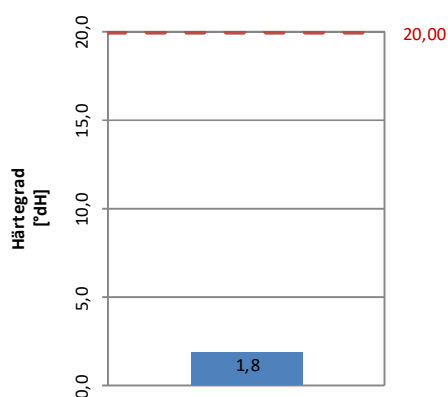
Die Korrosionsrate gibt zum Zeitpunkt der Messung die je Zeiteinheit theoretisch gebildete Menge der sekundären Korrosionsprodukte an. Aus diesem Wert kann u.U. auf Grundlage weiterer anlagenspezifischer Parameter auch der absolute Gesamtertrag an sekundären Korrosionsprodukten und der Materialabtrag in mm/a berechnet werden. Bei der Korrosionsrate handelt es sich um einen neu entwickelten Indikatorwert, dessen Aussagekraft und Praxisbezug noch ermittelt werden muss.

Bewertung: Die theoretische Korrosionsrate

beträgt 0,14 mg/(l*min). Dieser Wert ist ohne Bedeutung, da wahrscheinlich der Sauerstoffgehalt falsch gemessen wurde.



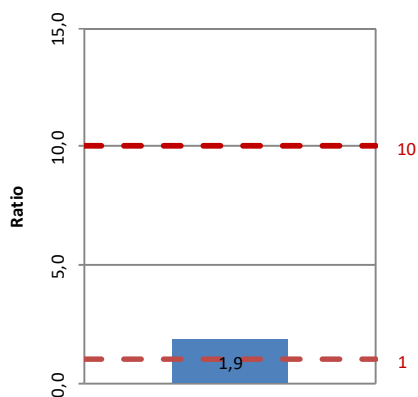
Gesamthärte



Härtebildner bergen die Gefahr der Verkalkung an heißen Bauteilen wie Wärmeüberträgern oder Erhitzern. Ihr Grenzwert ist abhängig von dem Vorhandensein entsprechender Anlagenelemente und der Anlagengesamtleistung (gem. VDI 2035 Blatt 1)

Bewertung: Der Wert von 1,8 °dH unterschreitet den Grenzwert für Kühlanlagen bei weitem.

Stoffmengenanteil Na/(Ca+Mg)



Das Verhältnis der molaren Konzentrationen von Natrium zu Calcium und Magnesium gibt einen Hinweis auf die Vorbehandlung des Systemwassers. Bei einem Wert unter 1 ist das Wasser unaufbereitet oder voll-entsalzt, bei einem Wert über 10 ist es nur enthärtet.

Bewertung: Der Wert von 1,9 weist auf die Verwendung verschnittenem vollentsalztem Wasser hin.

3.3.4.7 Wasserchemische Analyse 5 vom 03.04.2018

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Systemwasseranalyse aufgeführt.

Laborwerte

Fe part.+gel.	Eisen partikulär u. gelöst	mg/l	0,07 *
Fe gel.	Eisen gelöst	mg/l	0,05
Cu	Kupfer	mg/l	0,02
Zn	Zink	mg/l	0,00
Al	Aluminium	mg/l	0,09
Mn	Mangan	µg/l	23,19
Ni	Nickel	µg/l	0,00
Cr	Chrom	µg/l	0,00
Na	Natrium	mg/l	12,14
K	Kalium	mg/l	3,38
Mg	Magnesium	mg/l	3,34
Ca	Kalzium	mg/l	7,16
Mo	Molybdän	mg/l	n.b
P	Phosphor	mg/l	0,00
Cl ⁻	Chlorid	mg/l	n.b
SO ₄ ²⁻	Sulfat	mg/l	n.b
NO ₃ ⁻	Nitrat	mg/l	n.b
NPOC	Organischer Kohlenstoff	mg/l	n.b
IC	Anorganischer Kohlenstoff	mg/l	n.b
Zellzahl	Keimbelastung	l ⁻¹	n.b

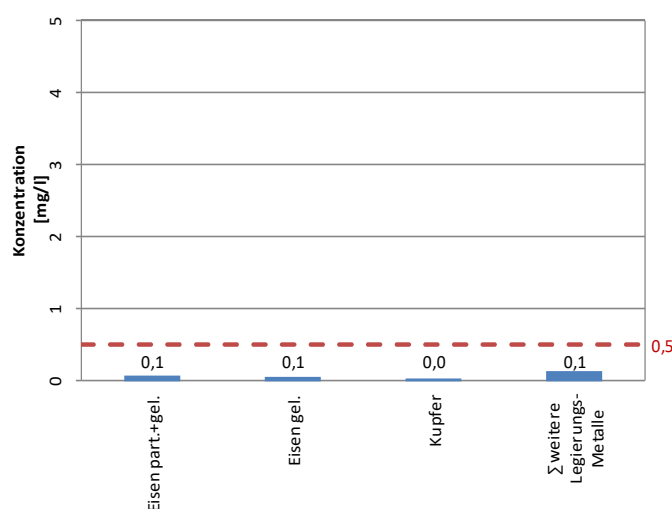
Vor-Ort-Werte

pH	-	9,2
Redoxpotential (gemessen)	mV	-621,0
Sauerstoffgehalt	mg/l	0,050
Leitfähigkeit	µS/cm	100,9
Temperatur	°C	8,9

* 0,00: Wert liegt unterhalb der Nachweisgrenze; n.b. : nicht bestimmt



Die folgende Tabelle erläutert die Messergebnisse im Einzelnen einschließlich einer individuellen Bewertung und Handlungsempfehlungen.

Ergebnis**Bewertung und Handlungsempfehlung****Metalle**

Gelöste und partikulär vorkommende Eisenverbindungen, bzw. Kupfer im Systemwasser stellen die Haupt-Korrosionsprodukte dar. Sie sind daher indikativ für aktive Korrosionsprozesse. Gelöstes Eisen stellt die Vorstufe zu partikulären Bestandteilen da. Das Fehlen partikulärer Bestandteile bei einem hohen Anteil gelöster Bestandteile kann verschiedene Ursachen haben: entweder die partikulären Bestandteil werden wirksam gefiltert oder die Korrosionsprozesse sind infolge Sauerstoffmangel zum Erliegen gekommen. Metallgehalte (gelöst) bis zu 0,5 mg/L werden als unkritisch angesehen.

Bewertung: Es sind sehr geringe Mengen an partikulärem und gelöstem Eisen nachweisbar. Im Vergleich zur letzten Beprobung sind die Gehalte wieder etwas gestiegen.

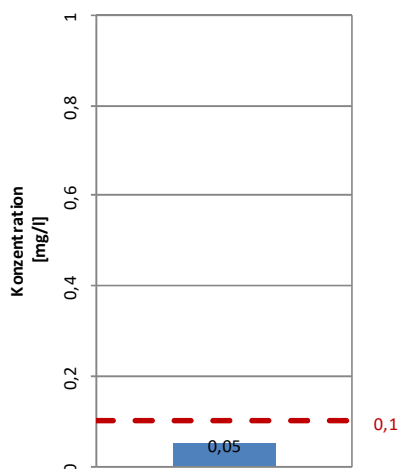
Salze

Nicht bestimmt

Chlorid, Sulfat und Nitrat fördern als Elektrolyten durch die Erhöhung der Leitfähigkeit die Korrosion. Zusätzlich tragen Nitrat und Sulfat als Nährsalze sowie organischer Kohlenstoff (NPOC) zu einem erhöhten Keim-Wachstum bei. Die Salze werden über das Füllwasser und ggf. über das Nachspeisewasser eingebracht. Organischer Kohlenstoff stammt aus zugesetzten Inhibitoren, geölten und nicht gereinigten Bauteilen oder Kunststoff-Dichtungen.

Bewertung: -

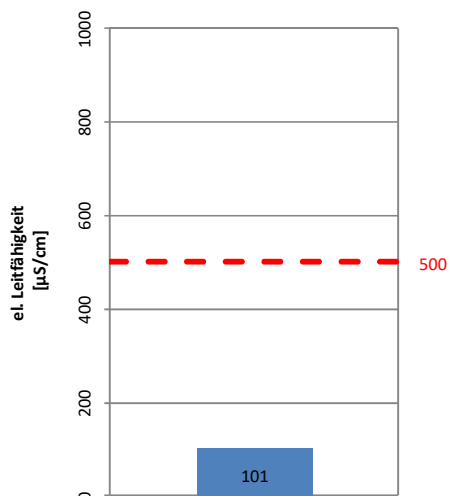
Sauerstoffgehalt



Das Vorhandensein von Sauerstoff ist Voraussetzung für die nicht-mikrobiell induzierte Korrosion von Eisen und Kupfer. Der Sauerstoffgehalt ist nach Neubefüllung hoch und sinkt in gasdichten Systemen mit der Betriebszeit, weil er durch Korrosionsprozesse aufgebraucht wird. Die Korrosionsprozesse kommen dann zum Erliegen. Aufgrund der Erfahrung nimmt die Korrosionsrate ab einem Sauerstoffgehalt von 0,1 mg/L stark zu. Ein hoher Sauerstoffgehalt bei einem nicht frisch befüllten, geschlossenen System weist auf Gasdiffusion durch dünnwandige Kunststoffrohre, nicht ordnungsgemäße Druckhaltungssysteme oder offene Ausgleichsbehälter hin.

Bewertung: Der Sauerstoffgehalt ist mit 0,05 mg/L leicht erhöht und deutet auf das Eindringen geringer Mengen Sauerstoff hin.

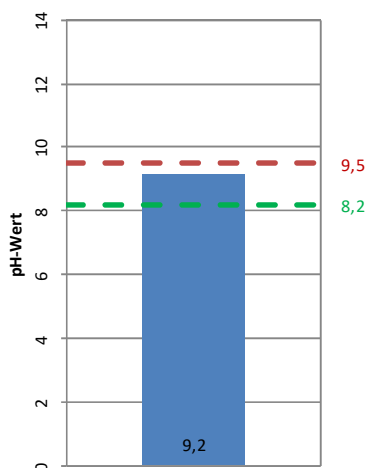
Leitfähigkeit



Die Leitfähigkeit gibt die elektrolytische Eigenschaft des Systemwassers an. Das Korrosionsrisiko steigt mit der Erhöhung der Leitfähigkeit. Entsalztes Wasser weist in der Praxis eine Leitfähigkeit von etwas über 100 µS/cm, Leitungswasser bis zu 1200 µS/cm und mehr auf. In einem Systemwasser ohne Zusatz von Korrosionsschutzmitteln wird eine Leitfähigkeit von < 500 µS/cm zur Vermeidung von Korrosion toleriert.

Bewertung: Die Leitfähigkeit ist mit 101 µS/cm sehr gering und deutet auf die Verwendung vollentsalztem Wassers hin.

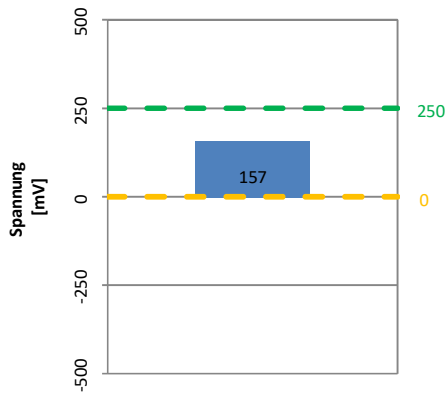
pH - Wert



Der pH-Wert ist ein Hauptindikator für Korrosionsrisiken und sollte zwischen 8,2 und 9,5 liegen. Ist Aluminium im System vorhanden, darf der pH-Wert 8,5 nicht überschreiten.

Bewertung: Der pH-Wert von 9,4 ist ausreichend hoch und weist eine Schutzfunktion gegen Korrosion auf. Allerdings unterliegen bei pH-Werten oberhalb 8,5 Aluminium-Werkstoffe dem Risiko der Korrosion (es wurden geringe Mengen Aluminium nachgewiesen)

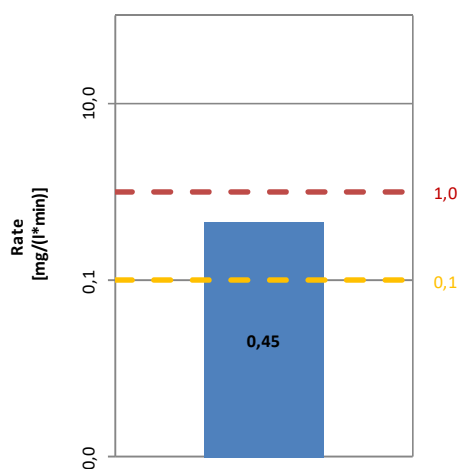
Redoxpotential normiert



Das sauerstoffkorrigierte, auf Standardwasserstoffelektrode und pH 7 bzw. den Neutralpunkt normierte Redoxpotential gibt in Systemen ohne Wasserbehandlung Aufschluss über den Systemzustand. Es zeigt an, ob sich Eisen(II) als primäres Korrosionsprodukt im System befindet, Sulfid als Produkt mikrobieller Aktivität vorliegt oder der Systemzustand insgesamt unkritisch ist. Ein Redoxpotential über 250 mV ist unkritisch, es liegen keine gelösten Korrosionsprodukte vor. Zwischen 0 mV und 250 mV liegt gelöstes Eisen(II) vor, ein Redoxpotential von unter 0 mV deutet auf sulfatreduzierende Bakterien hin.

Bewertung: Das normierte Redoxpotential von 157 mV weist auf die Anwesenheit des primären Korrosionsproduktes Eisen(II) hin, was durch die wasserchemische Untersuchung eingeschränkt bestätigt wird. Die nachgewiesenen Metallgehalte sind sehr gering.

Korrosionsrate



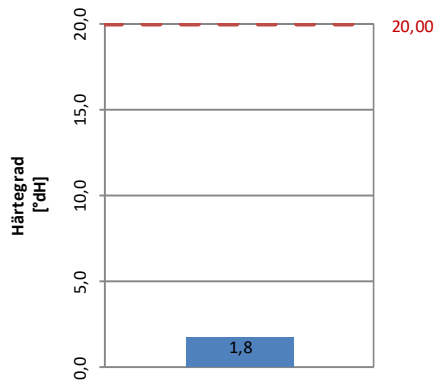
Die Korrosionsrate gibt zum Zeitpunkt der Messung die je Zeiteinheit theoretisch gebildete Menge der sekundären Korrosionsprodukte an. Aus diesem Wert kann u.U. auf Grundlage weiterer anlagenspezifischer Parameter auch der absolute Gesamtertrag an sekundären Korrosionsprodukten und der Materialabtrag in mm/a berechnet werden. Bei der Korrosionsrate handelt es sich um einen neu entwickelten Indikatorwert, dessen Aussagekraft und Praxisbezug noch ermittelt werden muss.

Bewertung: Die theoretische Korrosionsrate



beträgt 0,45 mg/(l*min). Dieser Wert ist ohne Bedeutung, da wahrscheinlich der Sauerstoffgehalt falsch gemessen wurde.

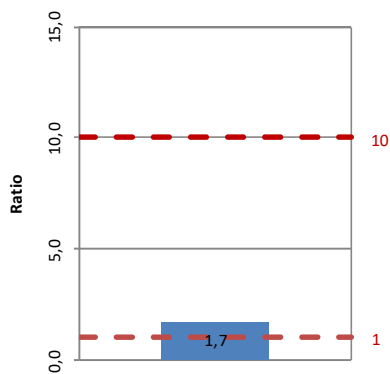
Gesamthärte



Härtebildner bergen die Gefahr der Verkalkung an heißen Bauteilen wie Wärmeübertragern oder Erhitzern. Ihr Grenzwert ist abhängig von dem Vorhandensein entsprechender Anlagenelemente und der Anlagengesamtleistung (gem. VDI 2035 Blatt 1)

Bewertung: Der Wert von 1,8 °dH unterschreitet den Grenzwert für Kühlanlagen bei weitem.

Stoffmengenanteil $\text{Na}/(\text{Ca}+\text{Mg})$



Das Verhältnis der molaren Konzentrationen von Natrium zu Calcium und Magnesium gibt einen Hinweis auf die Vorbehandlung des Systemwassers. Bei einem Wert unter 1 ist das Wasser unaufbereitet oder vollentsalzt, bei einem Wert über 10 ist es nur enthärtet.

Bewertung: Der Wert von 1,7 weist auf die Verwendung verschnittenem vollentsalztem Wasser hin.



Projektleitung

Oliver Opel
Prof. Dr. rer. nat. Dipl. Umweltwiss.
opel@fh-westkueste.de
Fon: +49 481 8555-375
Fax: +49 481 8555-301
Mobil: +49 170 5853010

Mani Zargari
Dipl.-Ing.
zargari@igs.bau.tu-bs.de
Fon: +49 531 391 3581
Fax: +49 531 391 8125
Mobil: +49 173 6471987

Fachhochschule Westküste

Fachbereich Technik

Fritz-Thiedemann-Ring 20
25746 Heide
www.fh-westkueste.de

SIZ energie+

Mühlenpfordtstraße 23
38106 Braunschweig
<http://siz-energie-plus.de/>

Das Projekt wird bearbeitet in einer Kooperation aus

Leuphana Universität Lüneburg

Fakultät Nachhaltigkeit
Nachhaltigkeitsforschung Energie

Universitätsallee 1
21335 Lüneburg
Fon: +49 4131 677-2952
Fax: +49 4131 677-2822
opel@leuphana.de
www.leuphana.de

SIZ energie+

Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Norbert Fisch
Dr.-Ing. Stefan Plesser

Mühlenpfordtstraße 23
38106 Braunschweig
Fon: +49 531 3913555
Fax: +49 531 3918125
su1725@stw.de
<http://siz-energie-plus.de/>
IBAN: DE17 6007 0070 0112 5814 00
BIC: DEUTDESSXXX
St.-Nr. 99143/00355