Abschlussbericht

zum Teilprojekt

"Entwicklung eines Verfahrens zur vollständigen Charakterisierung von Lichtquellen"

des Gesamtprojektes

"Charakterisierung, Modellierung und Propagation der Strahlung realer Lichtquellen in optischen Systemen"

RIOS

Projektpartner: **LEUPHANA**

Projektverantwortlicher: Prof. Dr. rer. nat. H.-D. Sträter

Förderkennzeichen: 13N8421

Projektlaufzeit: Mai 2004 – April 2007

(Verlängert bis Oktober 2007)

Datum: 30. April 2008 (23. Juni. 2008)



1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Auf dem Gebiet des "Optic Designs" steigen die Anforderung an die Forschung und Entwicklung zur Realisierung innovativer Produkte ungemein. Den Fachleuten steht eine Reihe von guten Werkzeugen zur Verfügung, die es erlauben optische Komponenten oder Systeme mit ihren geometrischen Strahlengängen zu berechnen oder zu simulieren. Nach den Methoden des klassischen Ray-Tracings wird ein Programm mit den technischen und physikalischen Eigenschaften diverser optischer Komponenten, wie Lichtquellen; Linsen; Blenden und letztendlich der Schirm, versorgt. Daraufhin kann das Programm das Ergebnis ermitteln.

Am Start der Berechnungskette, den Lichtquellen, gibt es jedoch einen entscheidenden Schwachpunkt. Für die Lichtquellen werden in solchen Programmen idealisierte Muster, Modelle, verwendet wie z.B. eine unendlich große Fläche, die dann das Licht homogen abstrahlt. Reale Lichtquellen verhalten sich als Ganzes aber völlig anders. Das Licht ist in den Intensitäten inhomogen bezüglich Abstrahlwinkel und -ort. Genau an dieser Stelle setzt das Gesamtprojekt "Charakterisierung, Modellierung und Propagation der Strahlung realer Lichtquellen in Optischen Systemen" an. Das Projekt hat sich der Aufgabe gestellt, reale Lichtquellen vollständig zu beschreiben.

Die Leuphana Universität Lüneburg (nachfolgend LUL) hat als Teilprojekt die "Entwicklung eines Verfahrens zur vollständigen Charakterisierung von Lichtquellen" übernommen. Hierbei sollte eine Messapparatur entwickelt werden, die es erlaubt, die verschiedensten inkohärenten Lichtquellen zu vermessen. Angefangen von kleinsten LEDs mit weniger als einem Watt Leistung bis hin zu Höchstdruck-Dampflampen von einigen Kilowatt sollte die Apparatur alle diese Lichtquellen, unter Einsatz verschiedenster Typen von Sensoren, vermessen können. Die Apparatur musste also hohen Ansprüchen an Modularität und Flexibilität genügen.

Als Ergebnis solcher Messungen sollten Roh-Datensätze erstellt werden, die die Lichtquellen in deren spezifischen Eigenschaften beschreiben. Diese Datensätze sollten weiterführend in einem Datensystem an der LUL systematisch für die Projektpartner zum Abruf bereitgestellt werden. Das Format solcher Datensätze sollte innerhalb des Gesamtprojektes erarbeitet werden, ebenso Kompressionsmöglichkeiten der der Datenfülle.

Mit Hilfe solcher Lampen-Datensätze sollten die Projektpartner weiterführend neue Methoden und Verfahren zur Simulation optischer Systeme für das Optic Design entwickeln.



1.2 Vorhabensvoraussetzungen

Das Projekt konnte, nach der Freigabe durch die Projektadministration seitens des VDI, innerhalb der LUL ad hoc gestartet werden. Die Fakultät III (Technik und Umwelt) hatte einen eingerichteten Büroarbeitsplatz und einen zusätzlichen Laborraum für den Aufbau der Messapparatur bereitgestellt.

Neben den planungsmäßigen Beschaffungen für das Projekt war auch die Nutzung des Labors "Technische Optik", mit allen zur Verfügung stehenden Messgeräten oder anderen Komponenten eingeplant.

Personell konnte mit Herrn Dipl.-Ing (FH) Andreas Zedler, M.Sc. ein auf diesem Gebiet erfahrenen Ingenieur als wissenschaftlicher Mitarbeiter verpflichtet werden. Herr Zedler hatte schon an einem vorigen von der AGIP geförderten Projekt, "Verbesserung eines Verfahrens zur Erzeugung höchster homogener Bestrahlungsstärken", mitgearbeitet.

Zudem haben diverse ausgesuchte studentische Hilfskräfte mitgewirkt, teilweise konnten solche Tätigkeiten als Vorarbeiten zu einer Diplomarbeit verwertet werden.

1.3 Vorhabensplanung und –ablauf

Die Planungen für das Teilprojekt an der LUL, wie aber auch des Gesamtprojektes, konnten, vorteilhaft basierend auf dem AGIP Vorprojekt "Verbesserung eines Verfahrens zur Erzeugung höchster homogener Bestrahlungsstärken" durchgeführt werden.

Es konnten sehr viele Arbeitspakete nach Plan abgearbeitet werden. Nur ein Punkt war gegenüber den Planungen als mittlerweile überholt anzusehen, das Teilprojekt Datenkompression. Schon auf dem ersten Projekt-Meeting wurde über diesen Punkt ausführlich diskutiert. Aufgrund der rasanten Entwicklung in der Informationsverarbeitung, wie der Steigerung der Festplattenkapazität und der Transfergeschwindigkeiten bei Übertragungen, war eine Datenkompression im Laufe der Zeit weniger nützlich und notwendig geworden.

Dies schaffte Spielraum, andere Sachverhalte detailierter zu bearbeiten. Davon hat dann der immer relevanter werdende Punkt der Beschreibung von gepulsten Lichtquellen profitiert.

Von vornherein als schwierig eingestuft waren die Justagenotwendigkeiten der Lichtquellen auf der Messapparatur. Auch hierfür wurde der oben zitierte Spielraum genutzt. Insbesondere wurde eine nahezu ideale Kugellichtquelle für die Justage entwickelt.

Gegenüber den Planungen wurde das Projekt um 6 Monate verlängert werden, um die Projektziele des Teilprojektes an der LUL, aber auch die des Gesamtprojektes, erreichen zu können. Bezüglich des Teilprojektes war die Genauigkeit bei der Justage



für die Messungen der Lichtquellen nicht einzuhalten. Die besonders interessanten Lichtquellen, wie moderne LEDs, weisen Strukturen auf, die innerhalb eines Messvorganges nicht mehr aufzulösen waren. Mit einer Nachführung der Lichtquellen während eines Messvorganges, konnten die Ziele seitens des Teilprojektes dann aber letztendlich erreicht werden.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Als Standard für die Charakterisierung von Lichtquellen wurde die übliche Beschreibung des Nah- und des Fernfeldes angesehen. Hierbei handelt es sich um die üblichen zwei Diagramme, die in Katalogen oder Datenblättern der bekannten Hersteller (OSRAM, Philips, Ushio, Sylvana, etc.) von Lichtquellen bereitgestellt werden. Diese Darstellungsform ist für die Auswahl geeigneter Lichtquellen zur Beleuchtung von Räumen oder Plätzen völlig ausreichend.

Für die Beschreibung von Lichtquellen für den technischen Einsatz sind diese Diagramme als beschränkt geeignet einzustufen. Weitergehende Charakterisierungen von Lichtquellen waren bekannt, aber wurden von wichtigen Lampenherstellern nicht bereitgestellt. Die Beschaffung solcher Daten war dem Anwender der Lampen bzw. dem Konstrukteur der optischen Systeme überlassen

Im Gegensatz dazu sollte dieses Projekt dazu dienen, völlig neue Methoden und Verfahren zu erforschen und zu entwickeln, um Lichtquellen zu beschreiben und zu systematisieren.

1.4.1 Bekannte Konstruktionen, Verfahren u. Schutzrechte

Die Verfahren zur weitergehenden Charakterisierung von Lichtquellen basieren für inkohärente Quellen meist auf dem Einsatz sogenannter Goniometer. Diese sind eine altbekannte und bewährte Konstruktion. Die Lichtquelle und/oder der verwendete Sensor können dabei auf zwei unabhängigen Achsen rotatorisch bewegt werden.

Andere Verfahren und Konstruktionen basieren bei näherer Betrachtung auf den zuvor erwähnten. Schutzrechte hierzu sind nicht bekannt.



1.4.2 Recherche

Innerhalb dieses Projektes sollten völlig neue Methoden und Verfahren entwickelt werden, die es bis dato nicht gab oder nur angedacht waren. Die Projektpartner stellen höchste Ansprüche an das Optic Design. Bei den Planungen zeigte sich schnell, wo Notwendigkeiten herrschen und wo diese mit den üblichen Methoden nicht erfüllt werden können. Hieraus resultierend wurde die Erfahrung der Projektbeteiligten für die Feindefinition des Projektes an erste Stelle gesetzt.

Die klassische Recherche in der Literatur konnte hier aus Aktualitätsgründen nicht weiterhelfen. Hier wurde ergänzend das Internet genutzt, um Erfahrungsquellen zur Lichtvermessung zu ermitteln.

Beim deutschen Patentamt wurde ebenfalls recherchiert, sehr oft reichten die Abstracts, um Zweifel an einer Verletzung von Schutzrechten zu beseitigen.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Projektpartnern

Innerhalb des Projektes gab es seitens der LUL eine intensive Zusammenarbeit mit den anderen Partnern. Für die planungsmäßigen Vermessungen unterschiedlicher Lichtquellen seitens der LUL lieferten die Partner diverse Lichtquellen für die Untersuchung verschiedenster Fragestellungen bezüglich ihrer Aufgabenbereiche.

Es wurden ganze Lichtquellensätze vermessen, um z.B. die Frage zu klären, wie unterschiedlich eine Abstrahlcharakteristik innerhalb einer Serie von Lichtquellen ist. Die Linos Photonics GmbH & Co hat hierzu diverse Sätze von Lichtquellen zur Verfügung gestellt.

Eine ergänzende Fragestellung, war die nach dem Einfluss einer Voroptik, z.B. das Gehäuse einer LED. Hierzu wurden von der LightTrans GmbH geschlossene und geöffnete LEDs beigestellt.

Die Agfa Gevaert HealthCare GmbH benötigte für ihre Arbeiten die Datensätze diverser Lichtquellen.

Andere Partner forderten diverse Bilddatensätze sporadisch an, um deren Arbeiten mit der Vermessung von den realen Lichtquellen zu verifizieren. Grundsätzlich konnten alle Datensätze von jedem Projektpartner angefordert werden.

Die Zusammenarbeit mit den Partnern war durchweg sehr fruchtbar, insbesondere müssen die vielen Diskussionen mit den Projektpartnern hervorgehoben werden.



2 Ausführliche Projektdarstellung

2.1 Erzielte Ergebnisse mit Zuwendungsverwendung

Das Teilprojekt der Universität Lüneburg lässt sich zunächst grob in fünf Abschnitte einteilen:

- 1. Detaildefinition der Aufgabe
- 2. Schaffung der erforderlichen Messmöglichkeiten
- 3. Durchführung von Messungen
- 4. Optimierung der Messtechnik
- 5. Aufarbeitung der Ergebnisse

Dem entsprechend gliedern sich die gewonnenen Erkenntnisse. Die fettgedruckte Gliederung entspricht der obigen **Liste**. Die Gliederungspunkte, die sich auf den Antrag beziehen, sind nicht fett gedruckt und eingerückt.

2.1.1 Ergebnisse bei der Detaildefinition der Aufgabe

Bei der Detaildefinition der Aufgabe gab es erwartungsgemäß keine neuen Erkenntnisse, da die Aufgabenstellung auf der Basis des zu Projektbeginn vorhandenen Wissens spezifiziert wurde. Es zeigte sich jedoch schon hier, dass die Teilgebiete "Kohärente Systeme" und "Inkohärente Systeme" total unterschiedliche Messtechniken erfordern würden, da einmal überwiegend parallele Abstrahlung und einmal sehr divergente Abstrahlung zu erfassen war.

Vorgesehene Aufgaben:

1	Erstellen eines Anforderungskataloges	erfüllt
1.1	Informationsaustausch mit den Partnern	erfüllt
1.2	Erstellung eines Pflichtenheftes	erfüllt

Die vorgesehen Aufgaben konnten vollständig gelöst werden. Hinweis: Die eingerückte Nummerierung folgt den Bezeichnungen des Antrags.

2.1.2 Erkenntnisse bei der Schaffung der erforderlichen Messmöglichkeiten

Der **Aufbau des Messplatzes** zerfiel in zwei Teile, den mechanisch-elektrischen Teil und den Teil zur Datenhaltung, Datensicherung und Archivierung.



Der Aufbau von Schutzkabine und Leitstand lief ohne wesentliche Erkenntnisse, aber auch ohne unerwartete Probleme ab. Gleichwohl gab es Stellen, an denen besonders sorgfältig gearbeitet werden musste. Da es als Teil der Aufgabenstellung gesehen wurde, in der Messkabine und damit in unmittelbarer Nähe von Leitstand und empfindlicher Elektronik Entladungslampen zu zünden, musste sehr auf Störsicherheit geachtet werden. Beim Zünden von Quecksilberdampflampen entstehen Spannungsanstiege von einigen Kilovolt in sehr kurzer Zeit (< Mikrosekunden). Durch sorgfältige Masseführung konnten diese Probleme gelöst werden.

Die Einrichtung der Datenhaltung, der Datensicherung und Archivierung wurde durch ein Server-System mit redundantem Festplattensystem nach RAID 1 und nächtlicher automatischer Datensicherung (NAS-Server) realisiert. Diese Arbeiten haben im Wesentlichen davon profitiert, dass das Projekt gegenüber der ursprünglichen Planung mit einer Verzögerung (> 1a) gestartet wurde. Dadurch wurde die Aufgabe, große Datenpakete (einige 100 Bilder von jeweils 0,5 MByte) zu manipulieren und zu speichern, erheblich vereinfacht, da größere und schnellere Festplatten zu günstigen Preisen zur Verfügung standen.

Vorgesehene Aufgaben:

2.1	Aufbau eines Messplatzes	erfüllt
2.1.1	Aufbau einer Schutzkabine	erfüllt
2.1.2	Aufbau eines Leitstandes	erfüllt
2.1.3	Einrichtung einer Datenhaltung	erfüllt
2.1.4	Datensicherung und Archivierung	erfüllt

Die vorgesehenen Aufgaben konnten vollständig gelöst werden.

Die **Erstellung einer Messvorrichtung** strukturiert sich in drei Komplexe, das mechanische Goniometer, die Justage desselben und die Sensorik mit Abbildung.

Das Goniometer wurde auf Basis eines hochgenauen Mechanik-Konstruktionssystems, das für Koordinatenmessmaschinen entwickelt war (System Witte), aufgebaut. Das System erlaubt es, in einem Rastermaß von 25 mm dreidimensional zu konstruieren. Verstelleinheiten auf Mikrometer-Basis ermöglichen es dann, jeden Punkt im Raum mit einer Genauigkeit von einigen hundertstel Millimetern als Aufpunkt, z.B. die Position einer Lampe, zu realisieren. Mit diesem System waren schon in der Vergangenheit umfangreiche Erfahrungen gesammelt worden, sodass keine unlösbaren Probleme auftraten. Das System erwies sich als sehr flexibel, da ohne großen mechanischen Aufwand Lampen beliebiger Bauform adaptiert und im Zentrum des Goniometers positioniert werden konnten.



Die Justage des Goniometers erwies sich anfangs als schwierig. Die Abbildung 1 zeigt die Anordnung der Achsen. Eine Achse schwenkt die Sensorik um die Lampe, die andere Achse dreht die Lampe um ihre eigene Achse. Beide Achsen stehen im rechten Winkel zueinander. Die zentrale Schwierigkeit bei den Justagen des Goniometers besteht darin, die beiden nicht materiell greifbaren Achsen so zu justieren, dass sie sich schneiden und nicht im Raum aneinander vorbei laufen.

Algorithmen für die Überprüfung der Justage sind schnell gefunden. Eine Kamera wird auf dem sich drehenden Arm montiert. Befindet sich ein Objekt auf der Drehachse, dann sind keine Bewegungen im Bild beim Drehen wahrnehmbar. Werden zwei Kameras genommen, auf jeder Achse eine, und es werden Bilder eines Messtargets als Funktion des Drehwinkels aufgenommen, so kann aus dem Versatz des Messtargets im Bild als Funktion des Winkels ersehen werden, wie das Messtarget relativ zu beiden Drehachsen steht. Eine einfache Bildverarbeitung mit Positionsbestimmung ergibt automatisch Korrekturwerte für die Justage.

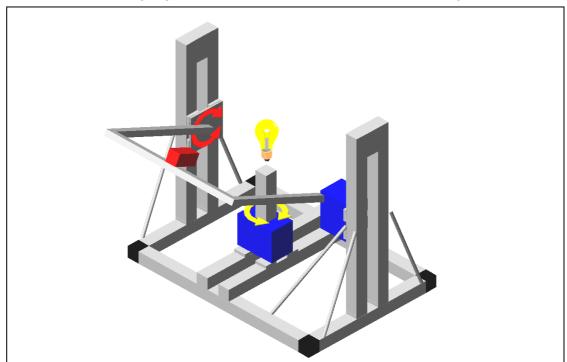


Abb. 1: Aufbau des Goniometers mit dessen beiden Drehachsen

Das Verfahren scheint zunächst sehr einfach auszusehen, Versuche mit Spitzen als Messtarget verliefen jedoch unbefriedigend. Auch kleine Löcher in dünnen Folien funktionierten nicht gut. Wenn die Folie eine endliche Dicke hat, kann man durch Löcher in der Größenordnung der Dicke nur bedingt unter schrägen Winkel durchschauen.

Das Ideal ist eine kugelförmige Lichtquelle, die aus allen Richtungen gleich aussieht. Real existierende Lichtquellen entsprechen diesem Ideal kaum. Die Lösung wurde in einer Rubinkugel gefunden, die mit dem grünem Licht (512 nm, NdYAG frequenzverdoppelt) zur Fluoreszenz im Roten angeregt wird. Pumpen aus mehreren Richtungen stellt sicher, dass eine Kamera mit Sperrfilter für grünes Licht aus allen Richtungen eine genügend homogen strahlende rote Lichtquelle sieht.



Die Abbildung der Lichtquelle auf eine geeignete Halbleiter-Kamera geschieht über eine bis zu 0,6 m lange Mikro-Bank (LINOS). Wegen der geforderten Winkelauflösung der Datenaufnahme sind keine hohen Lichtstärken erforderlich. Da die Kamera direkt auf die Lampe gerichtet ist, ist vielmehr die Reduktion der Helligkeit das zentrale Problem. Da auch eine Ortsauflösung der Bilder gefordert ist, kann die Öffnung nicht zu klein gemacht werden. Die Lösung liegt in einer Kombination aus Blende, Abschwächern und kleiner Belichtungszeit. Die Wellenlängenselektion ist wegen der geringen Öffnung der Optik oft mit Interferenzfiltern zu erreichen.

Zur Datenaufnahme stehen eine UV-Kamera (Diagnostic Instrument), eine VIS-Industrie-Kamera (Sony) und eine IR-Kamera (FLIR) zur Verfügung, die damit einen Wellenlängenbereich von 200 nm bis 1000 nm erschließen. Probleme ergaben sich zweimal. Im ersten Fall war die ausgewählte Kamera schon bei der Erstbeschaffung nicht mehr erhältlich, im zweiten Falle musste die eingesetzte Kamera wegen eines Defektes ersetzt werden. Sie war ebenfalls nicht mehr erhältlich. Diesmal war der Aufwand, einen Ersatztyp einzusetzen, wesentlich größer, da die Steuerungssoftware neu geschrieben werden musste. Da bei Lichtquellen mit höherer Leistung in deren Anwendung mit thermischen Problemen gerechnet werden muss, erschien es sinnvoll, eine Infrarot-Kamera zu beschaffen, die auch im mittleren Infrarotbereich sensibel ist.

Ein wesentlich notwendiges Merkmal aller eingesetzten Komponenten ist die Steuerbarkeit vom Leitstand aus. Insbesondere Entladungslampen, die in vielen modernen Anwendungen eingesetzt werden, können nicht kurzfristig aus- und wieder eingeschaltet werden, sondern erfordern eine Latenzzeit. Auch ist ihre Lebensdauer von der Einschalthäufigkeit abhängig. Da diese Lampen meist UV-Strahlung in hohem Maße und bei hoher Strahldichte abgeben, kann man bei eingeschalteter Lampe die Schutzkabine nicht betreten. Deshalb ist eine ferngesteuerte Änderbarkeit für alle Parameter, die während einer Messung geändert werden sollen, unabdingbar. Dies konnte realisiert werden.

Vorgesehene Aufgaben:

2.2	Erstellung einer Messvorrichtung	erfüllt
2.2.1	Mechanik	erfüllt
2.2.2	Lampenadaption	erfüllt
2.2.3	Justage-Algorithmen	erfüllt
2.2.4	Abbildung	erfüllt
2.2.5	Wellenlängenselektion	erfüllt
2.2.6	Sensorik	erfüllt
2.2.7	Fernbedienbarkeit	erfüllt

Die vorgesehenen Aufgaben konnten vollständig gelöst werden.



Die Erstellung einer Versorgungsinfrastruktur umfasst neben der bereits erwähnten Lampenadaption die elektrische Versorgung der Lampen und die Abfuhr der thermischen Energie in Form von Lüftung und Kühlung. Es wurde ein Set von Energieversorgungen in verschiedenen Leistungsbereichen zusammengestellt, das Strom-, Spannungs- und Leistungsstabilisierung ermöglicht. Eine Reihe von Geräten war auch bereits vorhanden. Für die Kühlung stehen diverse Lüfter und ein Kühlaggregat zur Verfügung.

Vorgesehene Aufgaben:

2.3 Erstellung einer Versorgungsinfrastruktur erfüllt

Die vorgesehenen Aufgaben konnten vollständig gelöst werden.

Die **Erstellung einer verbesserten Software** wurde vorgenommen, indem wesentliche Teile des gewachsenen Codes neu programmiert wurden.

Vorgesehene Aufgaben (Übersicht):

2.4	Erstellung einer verbesserten Software	erfüllt
2.4.1	Überarbeitung der bestehenden Module	erfüllt
2.4.2	Steuerungsmodule für neue Funktionen	erfüllt

Die vorgesehenen Aufgaben konnten vollständig gelöst werden. Insbesondere wurde eine Software realisiert, die die Verformung des vier-dimensionale Phasenraumvolumens entlang der optischen Achse auf Basis der originalen Messdaten zu simulieren gestattet. Damit ist sowohl der Transport der Phasenraumvolumina über größere Strecken als auch durch Linsen möglich. Näheres findet sich bei dem Beispiel der Vermessung von Hochleistungs-LEDs weiter unten.

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die unter 2 behandelten Aufgaben:

2	Erstellung einer Messvorrichtung	erfüllt
2.1	Aufbau eines Messplatzes	erfüllt
2.2	Erstellung einer Messvorrichtung	erfüllt
2.3	Erstellung einer Versorgungsinfrastruktur	erfüllt
2.4	Erstellung einer verbesserten Software	erfüllt

Die vorgesehenen Aufgaben konnten vollständig gelöst werden.



2.1.3 Durchführung von Messungen

Die durchgeführten Messungen lassen sich in zwei Gruppen einteilen:

1. Messungen an kleinen Halogenlampen, Entladungslampen und Ähnlichem

2. Messungen an LEDs

Der physikalisch relevante Unterschied ist die Größe der leuchtenden Fläche. Glühlampen und Entladungslampen haben typische Linear-Dimensionen von einigen Zentimetern bis hinab zu etwa einem Millimeter, LEDs sind noch etwa zehnmal kleiner. Damit einher geht eine variierende Leistungsdichte, die aber relativ leicht kompensiert werden kann.

Insgesamt wurden im Laufe des Projektes etwa 250 Messungen durchgeführt. Da die Entwicklung der Sensorik und des Goniometers parallel liefen zu diesen Messungen, sind eine ganze Reihe von Messungen (schätzungsweise gut die Hälfte) als nicht optimal (= nicht gut genug) einzustufen. Sieht man von der reinen Zahl der Messungen ab, so wurden auf Wunsch der Projektpartner 5 Lampentypen erfolgreich, das heißt mit der für diesen Typ und die ins Auge gefasste Anwendung passenden Genauigkeit, vermessen, darunter einige Serien gleicher Typen zur Einschätzung der Reproduzierbarkeit der Eigenschaften eines Typs.

Es wurden gemäß Antragstellung folgende Typen vermessen:

1. Quecksilber-Hochdrucklampe

Es wurde eine Kurzbogen-Lampe hoher Leistung ausgewählt (s. unten).

2. Glühlampe

Für eine Reihenuntersuchung wurden 10 Standard-Halogen-Glühlampen (12V 20W) vermessen. Diese Untersuchung diente der Lokalisierung und des Ortes der Glühwendel und dessen Toleranzen nach einen Lampenwechsel.

3. Glühlampe mit Reflektor

Zu dieser Messreihe wurde die zuvor verwendete Standard-Halogen-Glühlampe mit einem LINOS Halogenlampen-Reflektor (Hohlspiegel) versehen. Durch diese Anordnung wird das strahlende Volumen nahezu verdoppelt (2 Wendeln im Bild).

4. LED

Hier sind einige verschiedene 5mm Standard-LEDs vermessen worden. Diese Messreihen dienten in einer frühen Phase des Projektes auch zur Justage, bis diese verworfen wurde (vgl. 2.1.2 **Erstellung einer Messvorrichtung).**

5. Halbleiterlaser zum Vergleich TU-Berlin <> UNI Lüneburg



Ein Halbleiterlaser (1 mW 635 nm) sollte erste Hinweise auf die Problematiken bei der Vermessung von kohärenten Lichtquellen geben.

6. Für die bei Antragstellung nicht weiter definierte letzte Lichtquelle wurden dann einige High-Power-LEDs, z.B. OSRAM Star Hexagon LXHL-LB5C ausgewählt.

Die Erfahrungen der Messungen seien an zwei Beispielen ausführlicher aufgezeigt, an den Charakteristika einer großen Quecksilberdampflampe und denen einer modernen Hochleistungs-LED (vgl. Zu 1. und Zu 6.).

2.1.3.1 Quecksilberdampflampen

Als Quecksilberdampflampe wurde HBO1002 von Osram ausgewählt. Die Leistung beträgt 1000 W, der Elektrodenabstand 3 mm. Die Lampe hat eine Baugröße von 175 mm. Nähere Details sind dem Osram-Katalog zu entnehmen.

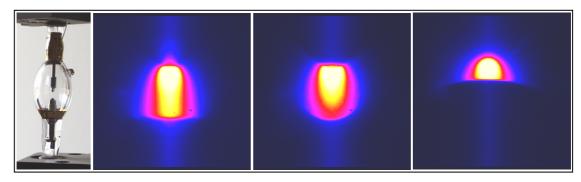


Abb. 2: Quecksilber-Dampflampe HBO1000 unter 0° sowie -45° und +45°

Die Abbildung 2 zeigt zunächst, dass das leuchtende Volumen keineswegs als einfaches geometrisches Objekt modelliert werden kann. Zwar spielen rein geometrische Effekte, wie die Abschattung von Zonen der Entladung durch die Elektroden, durchaus eine Rolle. Entscheidend ist aber auch die Selbstabsorption der erzeugten Strahlung im Plasma.

Die Abbildung 2 zeigt auch, dass der Lichtbogen von einem Glaskolben umgeben ist, der in Elevation und Azimuth unterschiedliche Radien aufweist. Damit ist sofort klar, dass alles abgestrahlte Licht **astigmatisch** geprägt ist. Damit ist dann der Ort einer Lichtquelle, der naiv als Ort des kleinsten Bündeldurchmessers definiert wird, keine sinnvolle Größe mehr, da er in beiden Raumrichtungen unterschiedlich ist.

Aus dem Vorhandensein optisch aktiver Komponenten in einer Lampe an sich folgt weiter, dass der geometrische Ort einer Lampe nicht immer geeignet ist, den Ursprungsort des Lichtes zu beschreiben. Die Messungen sind Ursprung für eine zutreffende Beschreibung des Lichtbündels, das die Lampe verlässt. Für die Verwendbarkeit der Daten ist es notwendig, eine mechanische Referenz für die Lampenposition zu haben, bezüglich der dann die Messdaten generiert werden.



2.1.3.2 Hochleistungs-LEDs

Die folgenden Abbildungen zeigen drei Hochleistungs-LEDs in jeweils drei Ansichten. Es handelt sich um normale Bilder im Ortsraum. Das jeweils erste Bild wurde von der Kamera aus Richtung der optischen Achse aufgenommen. Die jeweils zweite und dritte Ansicht entstand durch Kippung der Beobachtungsrichtung um 45 Grad in zwei Dimensionen.

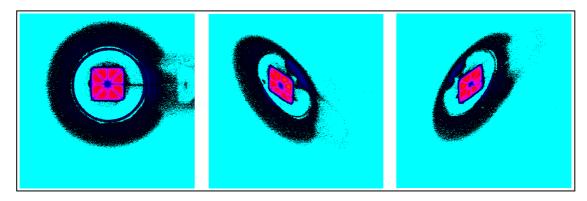


Abb.3: OSRAM DT6 unter 0° und jeweils unter den 2-fachen Winkeln -45° sowie +45°

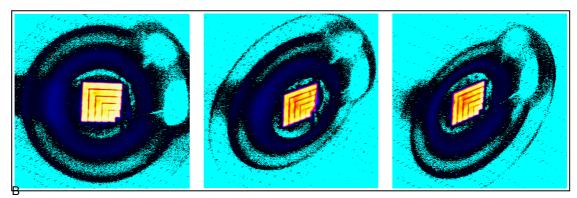


Abb. 4: OSRAM LB W5SG unter 0° und jeweils unter den 2-fachen Winkeln -45° sowie +45°

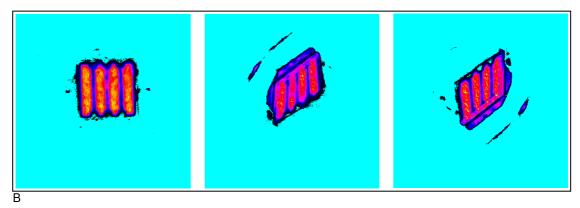


Abb. 5: OSRAM Star Hexagon Lambertian LXHL-LB5C unter 0° und je unter 2-fachen Winkeln -45° +45°



Auffällig ist die räumliche Strukturierung der leuchtenden Bereiche, die der Kühlung dient. Dementsprechend ist auch die Abstrahlung in hellere und dunklere Bereiche strukturiert.

Die Analyse der Ergebnisse erfolgte in einem vier-dimensionalen Unterraum des sogenannten Phasenraumes (sechs-dimensional), der aus der statistischen Physik bekannt ist. Die Visualisierung erfolgt in einem zwei-dimensionalen Unterraum, der von einer Orts- und der zugehörigen Winkelkoordinate aufgespannt wird. Für kleine Winkel gelten die bekannten Erhaltungssätze (Liouville, Helmholtz).

Die Abbildung 6 zeigt dies am Beispiel einer Hochleistungs-LED von Agilent (Typ HLMP-CM11-Y2000). Die horizontale Achse ist die Ortskoordinate, die vertikale Achse die Winkelkoordinate. Damit stellt jeder Punkt der Ebene einen Strahl des beschriebenen Lichtbündels dar. Die Farbe gibt die diesem Strahl zugehörige Intensität gemäß der unten rechts im Bild eingeblendeten Tabelle. Rechts neben dem quadratischen Phasenraumdiagramm ist die Projektion der Daten auf die Winkelachse, unter dem Diagramm die Projektion auf die Ortsachse gezeigt.

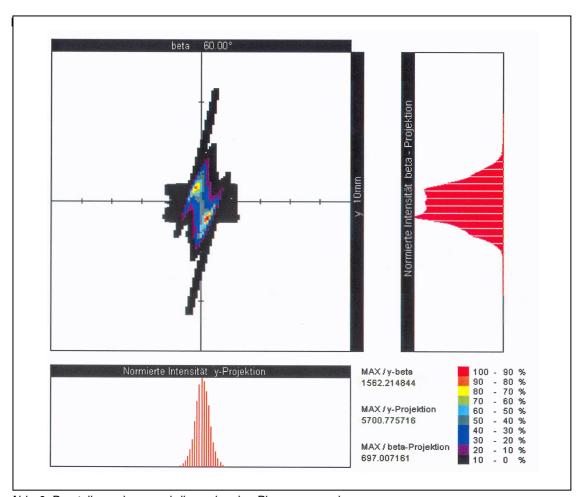


Abb. 6: Darstellung eines zwei-dimensionalen Phasenraumvolumen



Die Abbildung zeigt die Form des belegten Phasenraumvolumens, der Begriff "Volumen" wird hier unabhängig von der Dimension des betrachteten Raumes verwendet. Man kann der Darstellung entnehmen, dass sie etwas hinter dem Mittelpunkt der Strahltaille zu lokalisieren ist. Das erkennt man an der leichten Scherung der Figur nach rechts. Ferner sieht man an der Projektion auf die Ortsachse, dass das Bündel trotz Divergenz noch nicht nennenswert auseinander gelaufen ist. Die Projektion auf die Winkelachse zeigt einen Kern mit recht homogener Ausleuchtung der Winkel im Zentrum des Bündels. Es lässt sich also mit einer Fourier-Abbildung eine recht homogene Beleuchtung im Zentrum des Ortsraumes erreichen.

Die obige Diskussion dient letztlich nur dem Verständnis und einer Plausibilitätsbetrachtung. Mit den fünf-dimensionalen Datensätzen (Intensität über zwei Orts- und zwei Winkelkoordinaten), die in gängige Ray-tracing-Programme eingelesen werden, erhält man belastbare Simulationsergebnisse.

Die vollständige Modellierung solcher Lichtquellen als geometrische Körper mit passenden optischen Eigenschaften steht noch aus, ist aber für die Verwendung der Ergebnisse nicht notwendig.

2.1.4 Optimierung der Messtechnik

Es gab zwei Gebiete, auf denen sich eine Optimierung der Messtechnik als notwendig herausstellte:

- 1. Die Justagegenauigkeit und die Stabilität des Goniometers waren noch unbefriedigend.
- 2. Die zeitliche Struktur einiger Beleuchtungseinrichtungen erforderte zusätzliche Maßnahmen zur Synchronisation der Belichtungsaufnahme.



Zu 1) Das Problem wurde erst bei der Vermessung sehr kleiner Lampen offensichtlich, insbesondere bei der Vermessung von LEDs, die erst im Laufe des Projektes zu einem Objekt gesteigerten Interesses wurden. Es wurde ein x-y-Tisch mit Controller beschafft, der eine vor den Messungen ermittelte Verschiebung der Lampe, die Verformungen kompensiert, durchführt (vgl. Abb. 7).

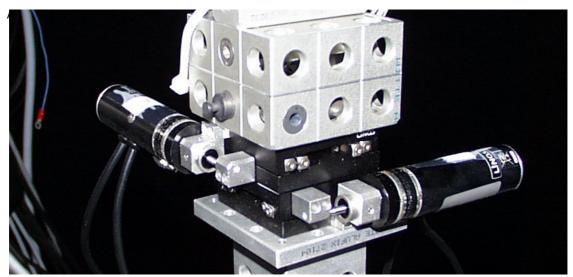


Abb. 7: Motorantriebe für Positionskompensierung

Zu 2) Gepulster Betrieb der Lampen erlaubt eine höhere Strahldichte als kontinuierlicher Betrieb, wenn das Licht nicht permanent gebraucht wird. Um auch in diesen Fällen messen zu können, war die Beschaffung von elektronischen Komponenten für das Timing notwendig (vgl. Bild 8).

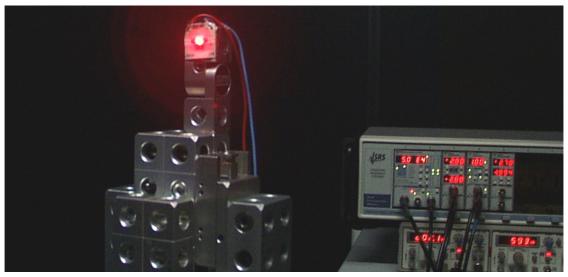


Abb. 8: Gepulste Lichtquelle zur Erhöhung der Strahldichte



2.1.5 Aufarbeitung der Ergebnisse

Die erzielten Messdaten umfassten für eine zweitägige Messung einige zehn Megabyte bis zu wenigen hundert Megabyte. Bedingt durch die allgemeine Weiterentwicklung der Informationstechnik während der Projektlaufzeit war die Weiterleitung dieser Datenmengen wesentlich einfacher als zur Zeit der Antragstellung erwartet.

Als wichtig hat sich erwiesen, einen Musterdatensatz, der auf einer geometrisch bekannten Lichtquelle beruht, zur Verfügung zu stellen. Dazu wurde das Licht einer Matrix von 9 LEDs, die einzeln schaltbar waren, durch ein Lochblech, dessen Löcher einzeln zu öffnen waren, geleitet (s. Abb. 9). In der Kombination lassen sich also bekannte Teilbündel (rot) im Phasenraum erzeugen, wobei die blaue Linie die optische Achse darstellt. Diese Teilbündel wurden bezüglich des abgebildeten Koordinatensystems zunächst durch die Position der leuchtenden Diode und die Position des geöffneten Loches beschrieben und dann mit der Kamera des Goniometers erfasst. Der Vergleich erlaubt es, Vorzeichenfehler bezüglich Winkel und/oder Ort beim Einlesen der Daten in proprietäre Software sicher zu finden.

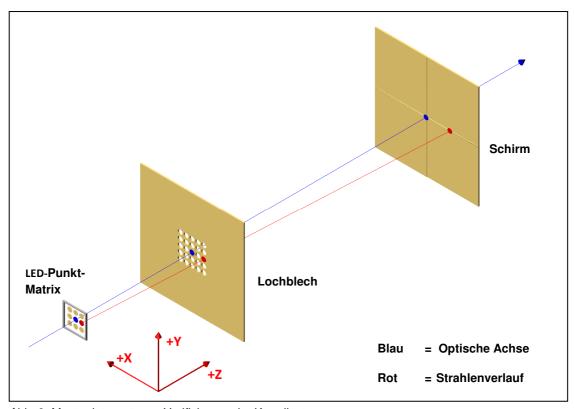


Abb. 9: Musterdatensatz zur Verifizierung der Koordinaten



2.2 Zahlenmäßiger Nachweis

Alle aufgeführten Posten sind um 50 Euro aufgerundet, damit sind Portokosten und diverses Verbrauchs-Kleinmaterial miterfasst.

1		PΘ	rso	nal	k۸	sten
- 1	- 1		เอบ	IIai	nυ	อเซเเ

a)	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	147600 €
b)	Studentische Hilfskräfte	9100€
c)	Lehrentlastung für projektverantwortlichen Professor	2185€

2. Sachmittel Messapparatur

a) Der Grundaufbau des Goniometers

Aluminium-Statik-System

der Firma Horst Witte Gerätebau GmbH

12050 €

b) Die Bewegung der Achsen am Goniometer für Lichtquelle und Sensor

Schrittmotoren mit Controller der Fa. ISEL

0€

(Konnten aus Vorprojekt modifiziert übernommen werden)

c) Die Nachführung der Lampe während einer Messung

Schrittmotoren inkl. Controller der Fa. LINOS

3400 €

d) Die Steuerung und Erfassung

PC mit Framegrabber

2450 €

3. Sachmittel Sensorik

a) Die Erfassung von Intensitäten im Bereich 380 – 780nm

Industriekamera 800 €



	b)) Die Erfassung von Intensitäten unterhalb von 380nm		
		UV-Kamera	10000€	
	c)	Die Erfassung von Intensitäten oberhalb von 780nm		
		IR-Kamera	6950 €	
	d)	Die Filterung von Wellenbereichen		
		Dielektrische Interferenzfilter und Linsen	3150 €	
	e)	Die Erfassung von geringsten Intensitäten		
		Spezielle Photosensoren	3900 €	
4.	Sa	chmittel Schutzkabine		
		Aluminium Traggerüst, Schwarze Platten,		
		Warnleuchten, Ü-Kameras, etc.	3200 €	
5.	Sa	chmittel Spannungsversorgung		
		Geregelte Hochstrom-Netzgeräte	550 €	
		Regelung für gepulste Lichtquellen	8650 €	
6.	Sa	chmittel Datenhaltung		
		PC, Switch, RAID-Controller, Festplatten, Datensicherung,		
		Unterbrechnungsfreie Stromversorgung (USV), etc.	7200 €	



2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Antrag formulierten Arbeiten zum Erreichen der Projektziele haben sich grundsätzlich als angemessen gezeigt. Die Personalmaßnahme des wissenschaftlichen Mitarbeiters sowie die der studentischen Hilfskräfte können als notwendig und angemessen bezeichnet werden. Die Arbeiten folgten in Zeit und Umfang relativ genau der Planung.

Lediglich zwei Positionen mussten angepasst werden. Als erstes erwies sich die Justage als schwieriger als angenommen, trotz der Erfahrungen aus dem AGIP- geförderten Vorprojekt. Hieraus resultierte die Notwendigkeit der Projektverlängerung um 6 Monate. Als zweites ist die Datenhaltung und die Datenschnittstelle zu nennen. Die Notwendigkeit für diese Arbeiten war zwischenzeitlich reduziert. Die Änderungen in diesen Punkten hatten jedoch keinen wesentlichen Einfluss auf das Projekt und dessen Ziele.

2.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Da die LUL eine öffentliche Einrichtung ist und den grundsätzlichen Auftrag der Forschung nachkommen muss, ist an dieser Stelle auf die Projektpartner zu verweisen. Dementsprechend sind Details der Verwertbarkeit den Berichten der wirtschaftlichen Partner zu entnehmen. Eine grundlegende Verwertbarkeit zwischen der LUL und einem potentiellen Kunden war nicht angedacht.

2.5 Fortschritts bei anderen Stellen

Im Laufe der 4,5 Jahre zwischen Antragstellung und Beendigung unseres Projektes wurden einige Komponenten kommerziell verfügbar, die im Rahmen unserer Arbeiten noch selbst hergestellt werden mussten. Beispielhaft seien zwei Produkte der Firma TechnoTeam Bildverarbeitung, Ilmenau, genannt, eine Farbmesskamera LMK und ein Nahfeldgoniometer RiGO 801. Solche Geräte sind für unsere Forschungszwecke als Komponenten interessant, ersetzen jedoch nicht ein universelles Messsystem unseren Zuschnitts.

Die Fortschritte auf Basis unserer Messungen wurden bei von den Projektpartner verfolgt und sind bei denen erfahrbar.



2.6 Veröffentlichung der Ergebnisse

Die Ergebnisse seitens der LUL wurden regelmäßig bei den Meetings den anderen Projektpartnern in Relation zur Planung präsentiert:

•	Kick-Off Meeting,	Linos Photonics GmbH & Co., München,	19. 05. 2004
•	1. Progress-Meeting,	Friedrich-Alexander-Universität, Erlangen,	08. 03. 2005
•	2. Progress-Meeting,	Technologie und Innovationspark, Jena,	07. 12. 2005
•	3. Progress-Meeting,	Universität Lüneburg, Lüneburg,	04. 07. 2006
•	4. Progress-Meeting,	Universität Marburg, Marburg,	31. 01. 2007

Eine jeweils kurze Zusammenfassung der Ergebnisse wird in den Zwischenberichten der Jahre 2004 (4.3.2005), 2005 (24.3.2006) und 2006 (28.3.2007) aufgeführt.

Abschluss-Meeting, JENOPTIK GmbH, Jena,

Desweiteren existiert im Internet (straeter.uni-lueneburg.de) nahezu seit Projektbeginn eine Kurzdarstellung des Projektes. Eine ausführliche Darstellung mit den erzielten Ergebnissen ist in Planung. Hierzu sind noch Abstimmungen mit den Projektpartnern notwendig.

11.12. 2007