

# Ein Goniophotometer zur Messung des Lichtstromes und der Lichtstärkeverteilung von hohlen Lichtleitern

Von Diplom-Ingenieur

Sven-Holger Kloss aus Berlin

am Fachbereich 12, Elektrotechnik

der Technische Universität Berlin

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

genehmigte Dissertation

Tag der wissenschaftliche Aussprache: 30.03.2001

D 83

Vorsitzender: Prof. Dr. D. Filbert

1. Bericht: Prof. Dr. H. Kaase

2. Bericht: Dr. habil. F. Riehle

Berlin 2001

## **Danksagung.**

Ich bedanke mich bei allen, die mich bei dieser Arbeit unterstützt haben, insbesondere bei Herrn Prof. Dr. Heinrich Kaase und den weiteren Mitgliedern des Promotionsausschusses, Prof. Dr. Dieter Filbert und Dr. habil Fritz Riehle.

Ich danke Dr. Thomas Müller, der durch den engagierten Kampf mit unzähligen Formularen der Europäischen Kommission das ARTHELIO Projekt überhaupt erst auf den Weg gebracht hat.

Prof. Dr. Stolzenberg danke ich für kritische Anmerkungen und für das Übersetzen russischer Literatur und Dr. Serick für die geduldigen Antworten zu allen Fragen der Lichttechnik.

Mein Dank gilt Sirri, Susanne, Frank und Elke, die mich von Anfang an in meiner Absicht unterstützten die Arbeit zu beginnen.

Ich danke Alexander Rosemann für die gute Zusammenarbeit während des Forschungsprojektes und Berit Herrmann, die stets eine Lösung hatte für all die Grausamkeiten, die ein Computer mit einem Menschen anstellen kann.

Den Firmen TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH und PRC Krochmann GmbH danke ich für die Unterstützung bei der Realisierung der Meßanlage und den Firmen 3M, Siteco, Tubosyder, Semperlux, NILSlight und artpart für das Bereitstellen von Meßobjekten.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Dr Györjy Czibula, dessen Engagement und Interesse für einen erfolgreichen und fristgerechten Aufbau des Goniophotometers weit über das übliche Maß hinausging.

Bei den Mitarbeitern des Fachgebietes Lichttechnik, Herrn Volz und Herrn Oertwig bedanke ich mich für die tatkräftige Unterstützung bei praktischen Problemen und bei Frau Isfort für die Hilfe bei administrativen Angelegenheiten.

Ich danke meiner Familie, die mir stets den Rücken freigehalten hat, sowie Hella für das Korrekturlesen und meiner Frau Karen, die öfter auf meine Anwesenheit verzichten mußte, als dies geplant war.

Ein ganz spezieller Dank geht an Helen-Luise, die noch gar nicht weiß, wie sehr sie durch ihr fröhliches Lachen und mit durchgeschlafenen Nächten zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

**Inhaltsverzeichnis:**

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>DAS ARTHELIO PROJEKT</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>HOHLE LICHTLEITER</b>	<b>11</b>
<b>3.1</b>	<b>Entwicklung</b>	<b>11</b>
<b>3.2</b>	<b>Technik</b>	<b>12</b>
3.2.1	Lichtleit-Fasertechnik	12
3.2.2	Linsen-Lichtleiter	13
3.2.3	Schlitzlichtleiter	13
3.2.4	Prismen-Lichtleiter	14
<b>4</b>	<b>BELEUCHTUNGSANLAGEN MIT HOHLLICHTLEITERN</b>	<b>19</b>
4.1.1	Lichtquellen	19
4.1.2	Hohllichtleiter	20
4.1.3	Extraktor	21
<b>5</b>	<b>PHOTOMETRIE</b>	<b>24</b>
<b>5.1</b>	<b>Grundsätzliches</b>	<b>24</b>
5.1.1	Messung des Lichtstromes	24
5.1.1.1	Die Ulbrichtsche Kugel	24
5.1.1.2	Der Lichtstromintegrator	25
5.1.2	Messung der Lichtstärke und Lichtstärkeverteilung	25
<b>5.2</b>	<b>Nahfeldphotometrie</b>	<b>27</b>
<b>5.3</b>	<b>Photometrie von hohlen Lichtleitern</b>	<b>34</b>
5.3.1	Messung der Beleuchtungsstärke	34
5.3.2	Turbosider	35
5.3.3	Siemens AG	36
5.3.4	Messung mittels Aperturblende	37
5.3.5	Messung mit CCD Kamera	38
<b>6</b>	<b>PHOTOMETER</b>	<b>40</b>
<b>6.1</b>	<b>Entwicklung</b>	<b>40</b>
<b>6.2</b>	<b>Aufbau</b>	<b>42</b>
6.2.1	Goniophotometer	42
6.2.2	Schienensystem	44
6.2.3	Drehbarer Bogen	47
6.2.4	Sensorwagen	48
6.2.5	Kabelführung	50
6.2.6	Endschalter	50
6.2.7	Koordinatensysteme	51
<b>6.3</b>	<b>Justage</b>	<b>53</b>
6.3.1	Justage des Schienensystems	53
6.3.2	Justage des Photometers	53

<b>6.4</b>	<b>Kalibrierung</b>	<b>55</b>
6.4.1	Lichtstromkalibrierung	56
6.4.2	Lichtstärkekalibrierung	57
<b>6.5</b>	<b>Meßablauf</b>	<b>60</b>
6.5.1	Initialisierung	60
6.5.2	Handsteuerung	60
6.5.3	Notsteuerung	61
6.5.4	Montage der Testobjekte	62
6.5.5	Festlegung der Verfahrensgrenzen	63
6.5.6	Interpolation von nicht erfaßten Bereichen	64
6.5.7	Festlegung der Meßbereiche	67
6.5.8	Dateiformat	68
<b>7</b>	<b>MESSERGEBNISSE</b>	<b>70</b>
7.1	Lichtstärkeverteilungen	70
7.2	Lichtstrom	71
7.3	Wirkungsgrade	77
<b>8</b>	<b>AUSBLICK</b>	<b>81</b>
<b>9</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>85</b>
<b>10</b>	<b>LITERATUR</b>	<b>87</b>

## Verzeichnis der verwendeten Größen

$\eta_{\text{PIPE}}$		Lichtrohr Wirkungsgrad
$\alpha_1$	[°]	Einfallswinkel
$\alpha_2$	[°]	Ausfallswinkel
$\theta$	[°]	Seiten-Einfallswinkel
$\gamma$	[°]	Halbwertswinkel
$\varepsilon_1$	[°]	Winkel zwischen Ausstrahlungsrichtung und Normal auf dA1
$\varepsilon_2$	[°]	Winkel zwischen Lichteinfallsrichtung und Normal auf dA2
$\rho$		Reflexionsgrad
$\Omega$	[sr]	Raumwinkel
$\Phi$	[lm]	Lichtstrom
A1	[m <sup>2</sup> ]	Strahlerfläche
A2	[m <sup>2</sup> ]	Empfängerfläche
A <sub>K</sub>	[m <sup>2</sup> ]	Kugelfläche
A <sub>p</sub>	[m <sup>2</sup> ]	Projizierte Fläche
AR		aspect ratio
C <sub>k</sub>	[m <sup>2</sup> ]	Kugelfaktor
DS		Dunkelsignalwert
$\bar{E}_{ind}$		Mittlere Indirekte Beleuchtungsstärke
E	[lx]	Beleuchtungsstärke
f	[m]	Brennweite
GW		Grauwert
i,j		Ortskoordinaten eines CCD Pixels
I	[cd]	Lichtstärke
k		Propotionalitätsfaktor
l	[m]	Länge
L	[cd/m <sup>2</sup> ]	Leuchtdichte
NL		Nichtlinearitätskorrekturfaktor
M	[lm/m <sup>2</sup> ]	Spezifische Ausstrahlung
n <sub>R</sub>		Anzahl der Reflexionen
n		Brechzahl
d	[m]	Entfernung
r	[m]	Radius
S	[lm/m <sup>2</sup> sr]	Signalwert des CCD Pixels

Seite 5

SH		Shadingkorrekturfaktor
t	[s]	Zeit
$V(I)$		spektrale Hellempfindlichkeit
$V_E$		Extraktorverhältnis
$w_{ex}$	[mm]	Breite des Extraktor
$w_r$	[mm]	Umfang des Hohllichtleiters
x	[m]	Längencoordinate des Hohllichtleiters

## 1 Einleitung

Hohle Lichtleiter bilden seit etlichen Jahrzehnten eine faszinierende Alternative zu bekannten Beleuchtungsanlagen. Durch die stete Entwicklung neuer Materialien mit verbesserten Reflexionseigenschaften konnte das Anwendungsspektrum von der Beleuchtung einiger spezieller Räume auf weite Gebiete der Innen- und Außenbeleuchtung ausgedehnt werden. Außerdem haben die stark gestiegenen Lohnkosten in den Industrienationen wesentlich dazu beigetragen, daß das Interesse an wartungsarmen Beleuchtungsanlagen zugenommen hat. Durch ein gestiegenes Umweltbewußtsein in Verbindung mit der Notwendigkeit regenerative Energien zu nutzen, ist der Einsatz von Hohllichtleitern mit der Möglichkeit der Sonnenlichtnutzung auf zunehmendes Interesse gestoßen.

Schwierigkeiten bei der Akzeptanz von Beleuchtungsanlagen mit Hohllichtleitern entstehen hauptsächlich durch das Fehlen lichttechnischer Daten, welche einen Vergleich mit konventionellen Leuchten erst ermöglichen. Ein bislang ungeklärtes Problem ist die Messung photometrischer Eigenschaften von Hohllichtleitern. Während es zur Messung des Lichtstromes einige vielversprechende Ansätze gibt, ist die Bestimmung der Lichtstärkeverteilung aufgrund der großen Abmessungen mit vielen technischen Schwierigkeiten verbunden. Noch im April 1999 schreibt TC 3-30 in der CIE Publikation "Hollow Light Guide Technology and Application", daß bis zum jetzigen Zeitpunkt keine unabhängigen Laboratorien in der Lage seien, solche Messungen anzubieten. Untersuchungen auf diesem Gebiet müßten von den Herstellern selbst durchgeführt werden. Die Verfasser drücken die Hoffnung aus, daß diese Situation in naher Zukunft verbessert wird. An diesem Punkt will die vorliegende Arbeit anknüpfen: Sie soll eine Möglichkeit aufzeigen, den Lichtstrom und die Lichtstärkeverteilung von hohlen Lichtleitern zu ermitteln. Sie stellt dabei einen wesentlichen Punkt des europäischen Forschungsprojektes ARTHELIO dar, welches eine gemeinsame Nutzung von Tageslicht und Kunstlicht durch Hohllichtleiter beinhaltet.

Diese Arbeit beschreibt die heute gebräuchlichsten Hohllichtleiter, deren Aufbau und Funktionsweise und die Probleme, die daraus bei photometrischen Messungen entstehen können. Es werden bereits bekannte und benutzte lichttechnische Meßverfahren aufgezeigt und auf ihre Eignung untersucht. Daraus

entwickelte sich der Vorschlag zum Aufbau einer Meßapparatur für die lichttechnische Vermessung von Hohllichtleitern, die zu Beginn des ARTHELIO Projektes realisiert worden ist. Die Arbeit beschreibt den Aufbau und die Funktionsweise der Meßapparatur, erklärt die Kalibration und gibt die Meßunsicherheiten an. Zum Abschluß werden ausgewählte Meßergebnisse, die mit dem Goniophotometer ermittelt worden sind, dargestellt.

## 2 Das ARTHELIO Projekt

Diese Arbeit entstand im Verlauf des ARTHELIO Projektes: "Ein intelligentes und energie-optimiertes System auf Basis einer kombinierten Nutzung von Tageslicht und dem Kunstlicht der Schwefellampe" /43/. Dieses von der Europäischen Kommission im Rahmen des Joule III-Programmes "Nichtnukleare Energien" geförderte Forschungsprojekt, wird von der Technischen Universität Berlin koordiniert und arbeitet mit den folgenden Partnern zusammen:

- Technische Universität Berlin (Institut für Elektronik und Lichttechnik)
- Ricerca e Rogetto (Planungsbüro für Tageslichttechnik)
- Universität Göteborg (Lichtausbildungs- und Forschungszentrum)
- Semperlux AG (Leuchten- und Hohllichtleiterhersteller)

Das Projekt hat als wesentliches Ziel, die Entwicklung eines Beleuchtungssystems zur Verbesserung von Gebäudeenergiebilanzen und des visuellen Komforts am Arbeitsplatz. ARTHELIO basiert dabei auf der effektiven Nutzung des Tageslichtangebotes, dem Einsatz der Schwefellampe /19/ und der Einkopplung beider Lichtquellen in hohle Lichtleiter. Das Tageslicht soll dabei über eine der Sonne nachgeführte Heliostateneinheit in hohle Lichtleiter eingekoppelt und durch diese in große Raumtiefen weitertransportiert werden, wo das direkte Tageslicht durch Fensteröffnungen sonst nicht hingelangt. Reicht das zur Verfügung stehende Tageslicht nicht aus, soll das Kunstlicht der Schwefellampe zur Ergänzung und zum Erreichen der geforderten Beleuchtungsstärken verwendet werden. Die Schwefellampentechnik bietet sich durch ihr kontinuierliches Spektrum, einer ähnlichen Farbtemperatur von ca. 6000 K und einer hohen Systemlichtausbeute von ca. 90 lm/W als geeignete Tageslichtergänzung an /34/,/70/. Die Dimmbarkeit über einen Bereich von 100 % bis 20 %, verbunden mit nur geringen Schwankungen der Farbeigenschaften, ist mit anderen Hochdrucklampen zur Zeit nicht erreichbar. Die Verwendung von Schwefel und die Abwesenheit von toxischen Stoffen sowie die lange Lebensdauer von erwarteten 45000 h für die Lampe und 15000 h für das Magnetron machen die Schwefellampe zu einer umweltfreundlichen Alternative gegenüber den meistens

mit Quecksilber gefüllten Hoch- und Niederdruckentladungslampen. Gegen die Schwefellampe spricht der geringe allgemeine Farbwiedergabeindex, der sich aufgrund des weit vom Planckschen Strahler entfernt liegenden Farbortes nur bedingt berechnen läßt /14/, und nur eine Eingruppierung in die Stufe 2a zuläßt /18/. Zusätzlich negativ ins Gewicht fällt die notwendige Zwangskühlung durch einen Lüfter, der zum einen Geräusche verursacht und zum anderen verschleißanfällig sein kann. Auch wenn einige vielversprechende Anlagen realisiert worden sind /11/,/20/,/61/, wurde im Verlauf des Projektes die Produktion der Lampe aufgrund der genannten Probleme zunächst eingestellt. Für das ARTHELIO Projekt stehen jedoch genügend Lampen zur Verfügung, um einen erfolgreichen Abschluß zu ermöglichen. Daher werden von der Universität Göteborg Akzeptanzstudien über den Einsatz der Schwefellampe durchgeführt. Für weitere Anlagen empfehlen die Hersteller von Hohllichtleitern Halogenmetaldampflampen, ohne allerdings eine Lichtregelungsmöglichkeit mit diesen Lampen zu haben. Auch wenn erste Lösungen mit dimmbaren Halogenmetaldampflampen auf dem Markt erscheinen, gibt es weiterhin große physikalische Probleme beim Dimmen dieses Lampentyps bezüglich Lebensdauer und Farbstabilität /79/. Vom Hersteller der Schwefellampe wurde ein neues Modell mit verbesserten Farbeigenschaften angekündigt, ohne jedoch einen Zeitpunkt dafür zu nennen.

Die Mischung von Kunst- und Tageslicht in hohlen Lichtleitern ist ein noch weitgehend ungelöstes Problem, für die eine andere Arbeit in diesem Forschungsprojekt Lösungen finden soll /54/.

Gegenstand dieser Arbeit sollen die photometrischen Untersuchungen von hohlen Lichtleitern sein, wobei insbesondere der Wirkungsgrad und die Lichtstärkeverteilung von Interesse sind. Ersterer ist für energetische Vergleiche mit konventionellen Beleuchtungsanlagen notwendig, während die Lichtstärkeverteilung Grundlage zur computerunterstützten Lichtberechnung ist.

Erst durch das Vorhandensein von lichttechnischen Daten, können Architekten, Ingenieure und Lichtplaner Beleuchtungssysteme mit hohlen Lichtleitern mit herkömmlichen Leuchten vergleichen und somit zur weiteren Akzeptanz dieser Systeme beitragen. Erleichtert wird die Anwendung von hohlen Lichtleitern durch

eine Zusammenstellung von Planungshilfen, die direkt aus den Ergebnissen des Forschungsprojektes erstellt werden.

Abgeschlossen wird das Projekt mit zwei Demonstrationsanlagen, von denen eine in Carpiani/Italien bei der Firma 3M eine Produktionshalle beleuchten soll und eine zweite in Berlin bei der Firma Semperlux ein Treppenhaus erhellen wird.

### 3 Hohle Lichtleiter

#### 3.1 Entwicklung

Seit der Erfindung der Bogenlampe, die eine nahezu punktförmige Lichtquelle mit hohem Lichtstrom darstellte, und die für die Allgemeinbeleuchtung nicht geeignet ist, wird über die Verteilung des Lichtes mit Hohllichtleitern nachgedacht. Erste Anlagen mit verspiegelten Röhren wurden in Rußland beschrieben, die zur Beleuchtung von Pulverfabriken betrieben wurden /3/. Das Licht wurde dabei mittels Spiegelblenden auf Lichtaustrittsstutzen verteilt, deren Ende mit einer streuenden Abdeckung versehen war. Ein erstes Patent in den USA stammt aus dem Jahr 1880 von Wheeler /72/. Der Wirkungsgrad von Hohllichtleitern wird durch zwei wesentliche Faktoren bestimmt, dem Reflexionsgrad des verwendeten Materials und der Anzahl der Reflexionen. Er berechnet sich wie folgt:

$$h_{PIPE} = r^{N_R}$$

Mit einem Reflexionsgrad von 0,8 und einer durchschnittlichen Anzahl von 10 Reflexionen, erreichten solche Systeme nur einen Wirkungsgrad von 10%. Dies und die hohen Kosten der Hohllichtleiter, sowie die gleichzeitige rasante Entwicklung anderer Lichtquellen führten dazu, daß die Idee mehrere Jahrzehnte in Vergessenheit geriet.

Erst 1946 gab es zwei grundlegende Neuerungen. Zum einen wurde das physikalische Prinzip der Totalreflexion ausgenutzt, das auftritt, wenn Licht unter einem bestimmten Winkelbereich von einem optisch dichten Medium in ein optisch dünneres Medium wechselt. Zum anderen wurde das Licht entlang der Längsachse des Lichtleiters ausgekoppelt. Pearson beschrieb einen massiven Acryl-Lichtleiter, der den heutigen Faser-Lichtleitern ähnelt /47/. Er erkannte aber auch die Probleme, die insbesondere beim Einkoppeln des Lichtes entstehen, und den Wirkungsgrad solcher Systeme begrenzen. Damit sind sie für die Allgemeinbeleuchtung nicht geeignet. Ein weiterer Nachteil sind die hohen Kosten dieser Systeme, die für Faser-Lichtleitertechnik heute noch bestehen.

In den sechziger Jahren war es wiederum eine neue Technologie, die eine Renaissance der Hohllichtleiter einleitete. Die Vacuum-Bedampfung von

Kunststofffolien ermöglichte die Massenproduktion von reflektierenden Materialien, deren optische Eigenschaften denen von herkömmlichen Glasspiegeln in nichts nachstanden, aber nur einen Bruchteil der Kosten verursachten. In der früheren UdSSR wurden viele Anlagen mit diesen metallisierten Folien errichtet, bei denen die Folienstärke nur 20-50  $\mu\text{m}$  beträgt. Das Licht tritt durch einen Längsschlitz aus, weshalb dieser Typ von Hohllichtleiter auch Schlitzlichtleiter genannt wird /4/. Typische Beispiele bestanden aus Lichtröhren mit 275 mm - 600 mm Durchmesser, 6 m - 18 m Länge und wurden mit Halogenmetallampfen mit bis zu 700 W Leistung betrieben.

Ohne Kenntnis der sowjetischen Arbeiten über Schlitzlichtleiter war Whitehead der Meinung, daß Hohllichtleiter auf Basis des Effektes der Totalreflexion preisgünstig und sehr effizient sein müßten. Er erfand 1982 die Mikroprismenfolie, eine lichtdurchlässige Folie aus Polycarbonat oder PMMA (Polymethylmethacrylat), auf der einseitig rechtwinklige Prismen angeordnet sind /77/. Licht, welches in die Folie eindringt, wird an den außenliegenden Prismen reflektiert und steht weiter zur Lichtleitung und zur Beleuchtung zur Verfügung. Mit dieser Folie war es möglich, Hohllichtleitersysteme mit guter Gleichmäßigkeit und hohem Wirkungsgrad zu fertigen. Als Schwierigkeit stellte sich die Herstellung der Prismenfolie dar, die teuer und fehleranfällig war. Dieses Problem wurde 1985 von der Firma 3M gelöst, die ein Verfahren entwickelte, das als "Mikroreplikation" bekannt wurde, und die Produktion großer Mengen sehr präziser Prismenfolie ermöglichte /15/.

## **3.2 Technik**

Zur Zeit gibt es vier unterschiedliche Arten von Lichtleitern, die sich in der praktischen Anwendung jedoch auf zwei Typen reduzieren. Der Vollständigkeit halber seien die beiden anderen an dieser Stelle auch erwähnt.

### **3.2.1 Lichtleit-Fasertechnik**

Das Prinzip der Totalreflexion beim Übergang von Licht in ein optisch dünneres Medium wird bei der Lichtleit-Fasertechnik angewendet. Die Fasern, die aus Glas oder aus PMMA gefertigt werden, sind recht teuer, so daß sie üblicherweise in kleinen Durchmessern hergestellt werden, was wiederum die Übertragungsverluste erhöht. Typische Werte sind 3 %  $\text{m}^{-1}$  bis 5 %  $\text{m}^{-1}$  bei

Kunststoff-Fasern und  $6 \% \text{ m}^{-1}$  bis  $8 \% \text{ m}^{-1}$  bei Glasfasern /36/. Anwendungen findet man im wesentlichen in der Effektbeleuchtung und weniger im Lichttransport über große Längen.

### 3.2.2 Linsen-Lichtleiter

Eine sehr spezielle Möglichkeit Licht weiterzuleiten ist die Anordnung mehrerer Linsen, bei denen jeweils die Brennpunkte auf der optischen Achse zusammenfallen /73/ (Bild 1). Der verlustarme Transport des Lichts ist aber nur mit qualitativ hochwertigen Linsen möglich, deren Preis bei den geforderten Abmessungen jedoch in keinem Verhältnis zum Nutzen steht und eine weite Verbreitung dieser Systeme verhindert.

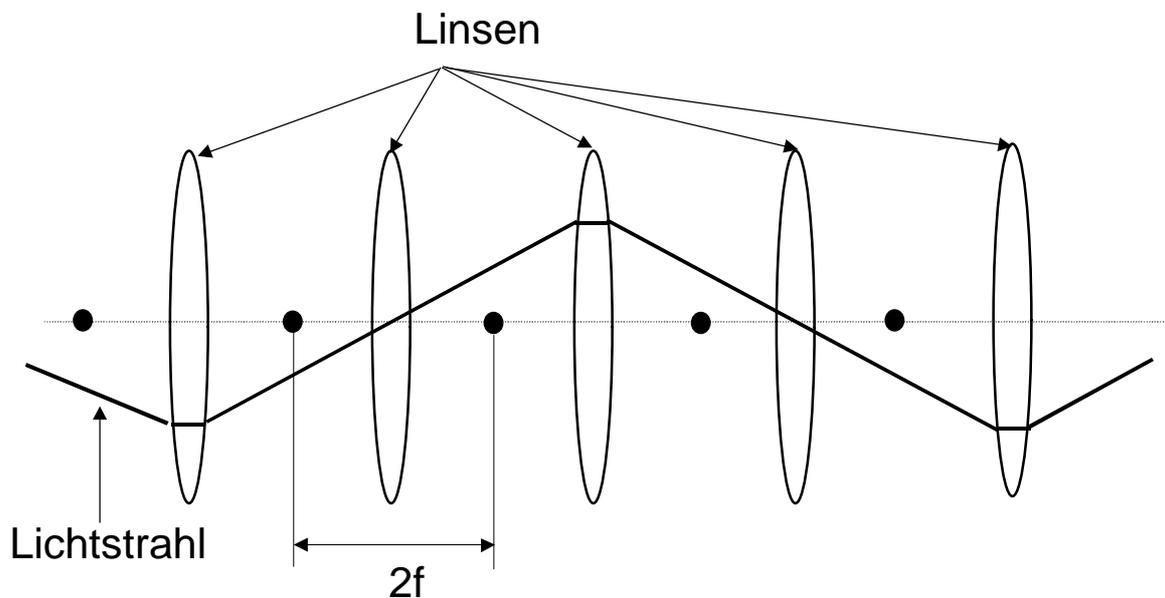


Bild 1: Linsen-Lichtleiter

### 3.2.3 Schlitzlichtleiter

Wesentlich häufiger als die beiden zuvor genannten Verfahren sind Hohllichtleiter mit metallisch spiegelnden Oberflächen zu finden. Dabei haben einfache Aluminiumoberflächen, welche die Innenseite eines Hohllichtleiters bilden, Reflexionsgrade von 85%. Mit speziellen Oberflächenbehandlungen oder mit metallisierten Folien lassen sich diese Werte auf ca. 95% erhöhen. An diesen Oberflächen wird das Licht mehrfach reflektiert und kann durch den sogenannten

Schlitz, den Teil des Rohres, der nicht mit Reflektormaterial ausgekleidet ist, austreten. Aufgrund des geringen Reflexionsgrades können mit diesen Hohllichtleitern nur kleine Längen realisiert werden, und ein großer Teil des Lichtes wird am Anfang ausgekoppelt, was die Gleichmäßigkeit verringert (Kapitel 7). Für Anwendungen, bei denen eine kostengünstige Lösung im Vordergrund steht, und weniger Wert auf die Energie-Effizienz gelegt wird, sind diese Lichtleiter richtig eingesetzt.

### 3.2.4 Prismen-Lichtleiter

Hohllichtleiter, bei denen eine prismatische Folie als Reflektormaterial verwendet wird, nutzen das Brechungsgesetz von Snellius:

*Fällt ein Lichtstrahl aus dem Vakuum, um  $\alpha_1$  gegen das Einfallslot geneigt, auf die Oberfläche eines Medium, so wird ein Teil reflektiert, der Rest tritt unter Richtungsänderung, Brechung, in das Medium ein und läuft dort unter dem Winkel  $\alpha_2$  gegen das Lot weiter /26/.*

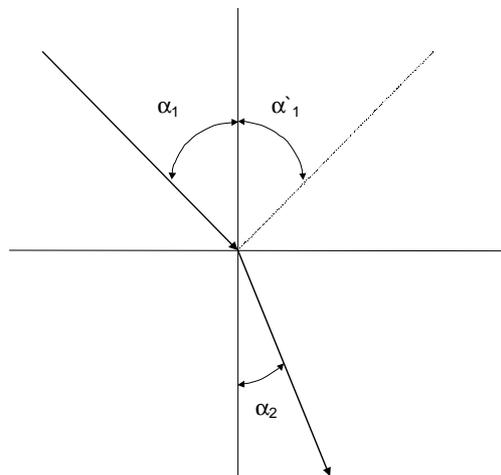


Bild 2: Brechungsgesetz nach Snellius

Wenn  $n_1$  und  $n_2$  die Brechzahlen der Medien sind, gilt:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Beim Übergang von einem optisch dichten Medium in ein optisch dünneres Medium ( $n_2 < n_1$ ) wird das Licht vom Lot weggebrochen, bis es parallel zur Oberfläche austritt. Zu diesem  $\alpha_2 = 90^\circ$  gehört der Einfallswinkel  $\alpha_T$  mit:

$$\sin \alpha_T = \frac{n_2}{n_1} \sin 90^\circ = \frac{n_2}{n_1}$$

Wird dieser Grenzwinkel  $\alpha_T$  überschritten, ist der Übergang ins optisch dünnere Medium nicht mehr möglich und es tritt Totalreflexion auf. Licht, welches in das Material eintritt wird beliebig oft reflektiert. Diesen Effekt nutzt die Lichtleitfasertechnik. Damit das Licht aber wieder in das Rohr zurückkehrt, wird eine Folie eingesetzt, auf deren Außenseite längslaufende Prismen eingearbeitet sind (Bild 3).

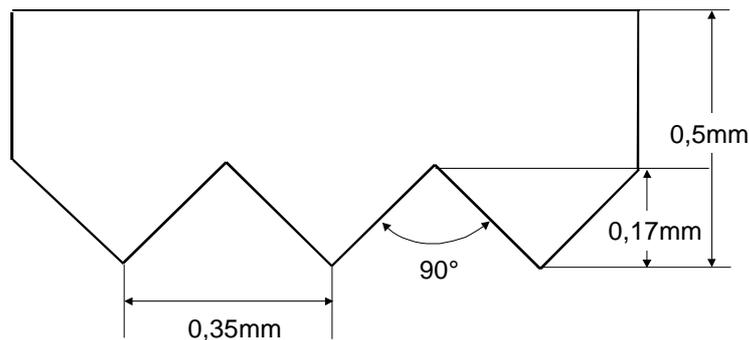


Bild 3: Abmessungen der Prismenfolie

Fällt Licht auf die plane Oberfläche der Folie, kann es nach zweimaliger Totalreflexion an den Prismen in das Lichtrohr zurückkehren (Bild 4): Der Lichtstrahl tritt an der Stelle 1 unter dem Winkel  $\alpha_1$  in die Folie ein, wird zum Lot hin gebrochen und erfährt an der Stelle 2 Totalreflexion unter der Bedingung, dass  $\alpha_T$  überschritten wird. Wenn diese Bedingung an der Stelle 3 nochmals gewährleistet ist, wird der Lichtstrahl wieder total reflektiert und verläßt die Folie an der Stelle 4, wobei der Lichtstrahl diesmal vom Lot weg gebrochen wird. Nicht berücksichtigt bei dieser Darstellung sind Reflexionen an den Oberflächen beim Eintreten in die Folie und beim Verlassen.

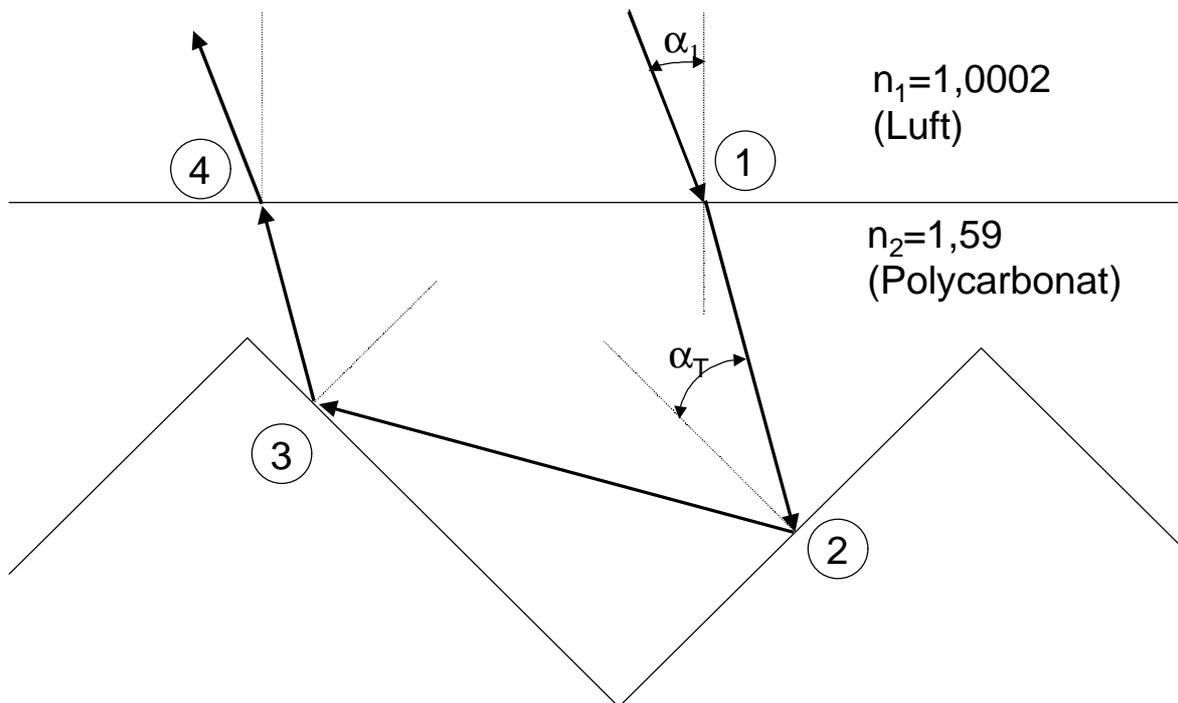


Bild 4: Reflexion an der Prismenfolie

Die Winkelbedingung, die für die Totalreflexion erfüllt sein muß, wenn das Licht senkrecht auf die plane Oberfläche in der Ebene einfällt, wie in Bild 4 gezeichnet, lautet:

$$\mathbf{a}_{1\min} = n \arcsin \frac{\sqrt{n^2 - 1} - 1}{n\sqrt{2}} \cong \arcsin \frac{\sqrt{n^2 - 1} - 1}{\sqrt{2}}$$

Für Polycarbonat, mit einer Brechzahl von 1,59 berechnet sich ein Winkel von 9,4°, für PMMA ist der Winkel noch kleiner und beträgt nur 4,35°.

Betrachtet man Lichtstrahlen, die senkrecht aus einer Ebene, die in Längsrichtung zu den Prismen verläuft und somit senkrecht zu der Ebene in Bild 4, einfallen, erfahren diese unabhängig vom Einfallswinkel Totalreflexion. Für die Kombination aus den beiden möglichen Einfallswinkeln ergibt sich dann ein Bereich, für den die Totalreflexion möglich ist und der nach /6/ wie folgt beschrieben werden kann:

$$\sin \mathbf{q} \leq \frac{\sqrt{n^2 - 1}}{1 + \sqrt{2} \sin |\mathbf{a}_1|}$$

Im Grenzfall, wenn  $|\mathbf{a}_1| = 90^\circ$  beträgt, erreicht  $\theta$  den maximalen Akzeptanzwinkel von  $30,6^\circ$ . Dieser wird oft als Akzeptanzwinkel des Films bezeichnet. Es ist jedoch zu beachten, daß dieser Winkel in dem Maße kleiner wird, je mehr sich der Wert von  $|\mathbf{a}_1|$  dem Wert  $\alpha_{1\min}$  nähert. In Bild 5 ist dieser Bereich grafisch dargestellt, und man erkennt deutlich, welche hohe Anforderungen an die Einspeisung und insbesondere an den Reflektor der Lichteinspeisung zu stellen sind, damit der Akzeptanzwinkelbereich eingehalten werden kann.

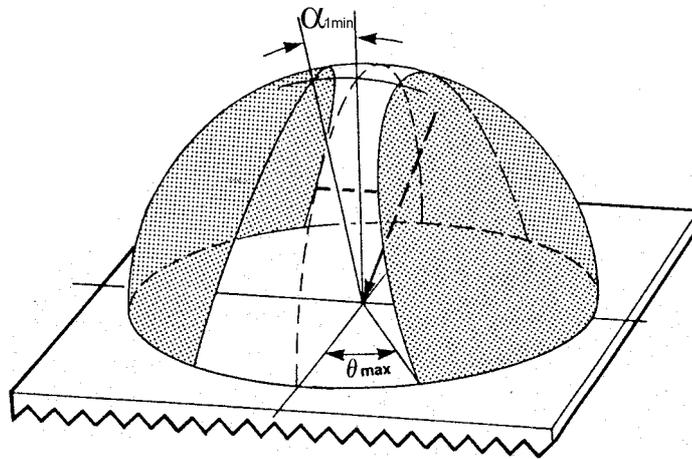


Bild 5: Bereich der Totalreflexion /56/

Eine meßtechnische Überprüfung der Prismenfolie bestätigt die Darstellung in Bild 5, jedoch liegt der Reflexionsgrad auch im Bereich der Totalreflexion etwas unter 100% (Bild 6). Die Ursache hierfür sind minimale Fehler in der Produktion der Folie, wie Ungenauigkeiten der Prismenwinkel oder Lufteinschlüsse.

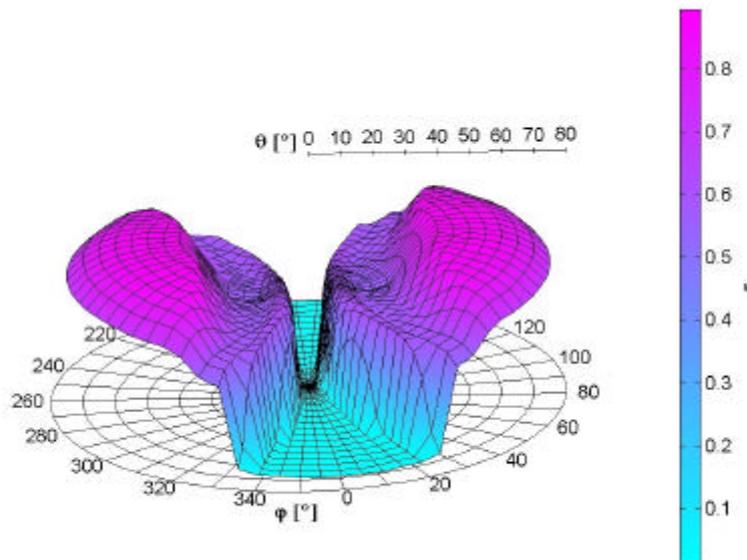


Bild 6: Lichttransmissionsgrad für 3M SOLF Folie als Funktion des Lichteinfalls  
/29/

Diese Folie wird aus Patentschutzrechten nur von der Firma 3M hergestellt und unter dem Namen SOLF (Scotch Optical Lighting Film) vertrieben. Sie wird als Rollenware geliefert bei einer Breite von 0,95 m. Alle 1,03 m befindet sich eine Werkzeuglinie, die bei Verwendung der Folie in Hohllichtleitern hell leuchtet und teilweise störend wirkt.

## 4 Beleuchtungsanlagen mit Hohllichtleitern

Ein typisches Hohllichtleitersystem besteht aus drei wesentlichen Elementen. Einer Lichtquelle, die das Licht in den Hohllichtleiter einkoppelt, dem Hohllichtleiter selbst, der für den Transport des Lichtes zuständig ist und dem sogenannten Extraktor, der den Austritt des Lichtes aus dem Hohllichter bewirkt. Unabhängig davon, ob dieser Austritt am Ende oder entlang des Hohllichtleiters geschieht.

### 4.1.1 Lichtquellen

Da das Licht der Lichtquelle über weite Entfernungen transportiert werden soll, und auch große Flächen beleuchten soll, kommen für die Einspeisung nur leistungsstarke Lichtquellen in Frage, die eine kleine räumliche Ausdehnung haben. Meistens sind dies Halogenmetalldampflampen in Leistungsstufen zwischen 70 W und 1000 W. Das brillante Licht dieser Lampen mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von 3000 K bis 6000 K und sehr gute Farbwiedergabeeigenschaften in Verbindung mit einer hohen Lichtausbeute machen diese Lampen universell einsetzbar. Bei Lampen mit großer Leistung wird die entstehende Wärme zunehmend problematisch, da die Grenztemperatur von Polycarbonat 130° C und von Acryl 90° C beträgt, und eine thermische Entkopplung von Einspeisung und Hohllichtleiter notwendig wird. Bei Hohllichtleitern, die für die Außenbeleuchtung, z.B. in Tunneln, eingesetzt werden, kommen auch Natriumdampfhochdrucklampen zum Einsatz, da hier die Anforderungen an die Farbwiedergabe nicht so hoch sind, und der wirtschaftliche Betrieb der Anlagen im Vordergrund steht. Den beiden Lampentypen gemein ist die Notwendigkeit eines Reflektors, der das Licht eng bündelt, damit die Winkelbedingung für die Totalreflexion nicht verletzt wird und ein großer Teil des Lichtes schon ganz am Anfang des Lichtleiters austritt. Gut bewährt haben sich Reflektorlampen, die aber nur mit Leistungen bis 150 W angeboten werden.

Eine hervorragende Einspeisung für Hohllichtleiter ist die Schwefellampe, deren nahezu punktförmige Lichtquelle in Kombination mit der hohen Lichtleistung ideal zum Hohllichtleitersystem paßt (Kapitel 2).

Nicht vergessen darf man in diesem Zusammenhang die Sonne, die Licht mit einem Öffnungswinkel von nur 0,5 ° ausstrahlt und bei entsprechender Bündelung

auch einen sehr hohen Lichtstrom liefern kann. Allerdings führen die hohen Bestrahlungsstärken auch zu thermischen Problemen beim Einkoppeln in den Lichtleiter, die beachtet werden müssen.

#### **4.1.2 Hohllichtleiter**

Obwohl unterschiedliche Formen möglich sind, findet man zum größten Teil runde Hohllichtleiter in der Anwendung. Zum Schutz gegen mechanische Beschädigungen und gegen Schmutz sind die reflektierenden Materialien mit einer lichtdurchlässigen Hülle umgeben. Bis zu einem Durchmesser von 30 cm können dies Röhren aus gezogenem Polycarbonat sein, die dem Lichtrohr eine Formstabilität geben. Es kommen aber auch flexible Folien zum Einsatz, die leichter zu verarbeiten sind. Innerhalb dieser Schutzhülle ist das Reflektormaterial angeordnet, welches das Licht weiterleitet. Bei Schlitzlichtleitern ist dies poliertes Aluminium oder eine metallisierte Folie. Der "Schlitz" oder das Lichtaustrittsfenster wird von dem Teil des Rohres gebildet, der nicht mit reflektierendem Material versehen ist. Typische Werte liegen hier zwischen  $90^\circ$  und  $180^\circ$ . Der Aufbau von prismatischen Hohllichtleitern ist etwas aufwendiger. Auch hier findet man eine Reflektorfolie, die aber im wesentlichen nur die Funktion hat, die Größe des Lichtaustrittsfensters zu bestimmen. Soll der Hohllichtleiter auch für die indirekte Beleuchtung verwendet werden, kann ein teildurchlässiges Reflektormaterial benutzt werden, welches den Lichtaustritt nach oben ermöglicht. Daran anschließend folgt innen die Prismenfolie, die in Längsrichtung mit den Prismen nach außen angeordnet ist (Bild 7). Falls das Licht entlang des Lichtleiters ausgekoppelt werden soll, befindet sich an der Innenseite der prismatischen Folie das Extraktormaterial, das meistens aus weißen, diffus streuenden Streifen besteht.

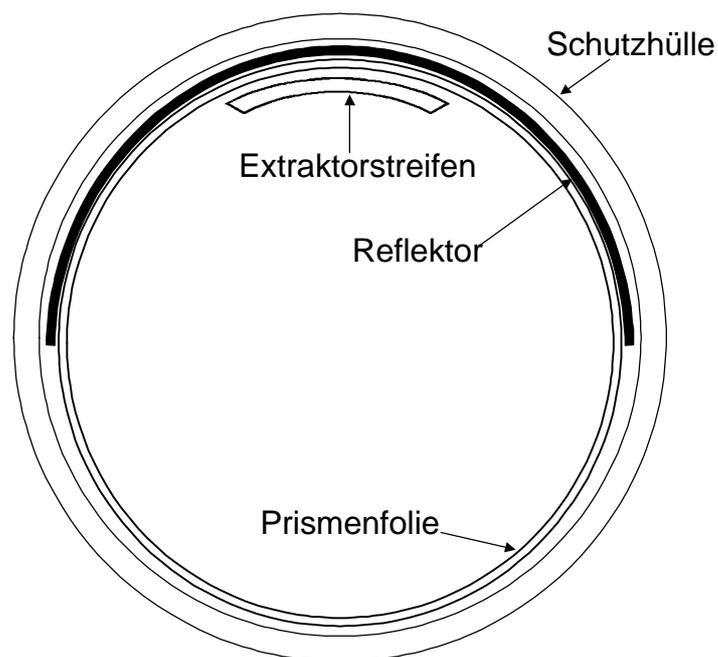


Bild 7: Aufbau eines Prismen Lichtleiters

#### 4.1.3 Extraktor

Bei dem Auskoppeln des Lichtes aus dem Hohllichtleiter müssen zwei unterschiedliche Mechanismen beachtet werden. Entweder wird das Licht am Ende des Lichtleiters ausgekoppelt oder der Lichtaustritt erfolgt entlang des Hohllichtleiters. Im ersten Fall muß sehr eng gebündeltes Licht verteilt werden, da in dem Hohllichtleiter das Licht der verwendeten Quelle weiter konzentriert wird. Messungen mit dem neuen Goniophotometer haben Halbwertswinkel von weniger als  $10^\circ$  ergeben. Als Extraktoren kommen daher nur streuende Materialien wie Trübgeläser in Frage oder aber lichtlenkende Komponenten wie Linsen, Prismen oder Spiegel /46/.

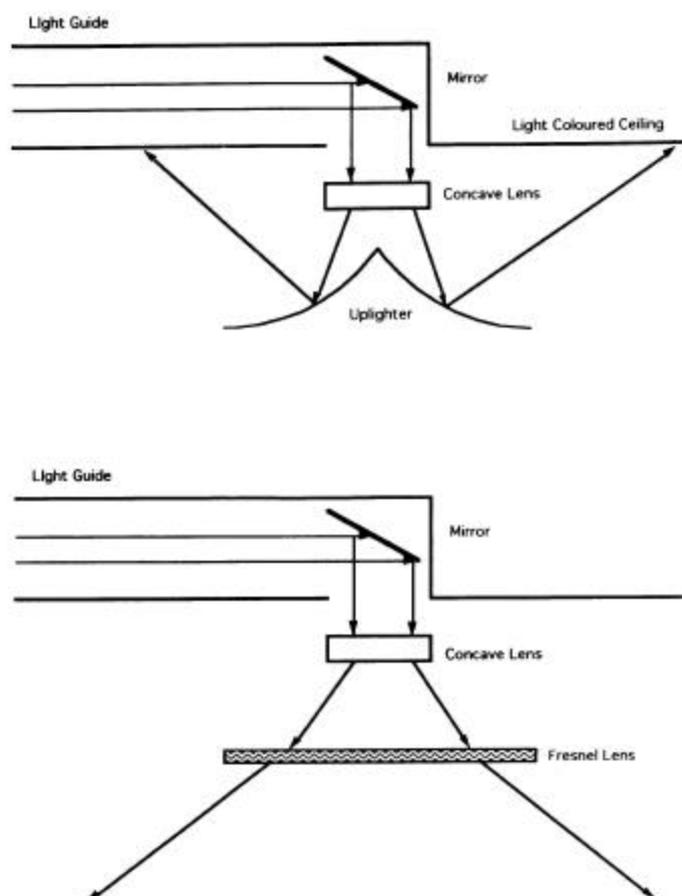


Bild 8: Beispiele für End-Extraktoren /46/

Es wurden gute Ergebnisse bezüglich des Wirkungsgrades solcher Extraktoren erzielt, jedoch sind Fragen zu klären, die sich mit der Blendung, der Herstellung und der Wartung solcher Systeme beschäftigen.

Soll das Licht entlang des Hohllichtleiters ausgekoppelt werden, ist eine möglichst hohe Gleichmäßigkeit an das Extraktordesign gefordert. Eine wichtige Größe ist hierbei die durchschnittliche Anzahl der Reflexionen, die ein Lichtstrahl erfährt, wenn er sich von der Lichtquelle bis zum anderen Ende des Lichtrohres bewegt /74/. Wenn der Halbwertswinkel der Lichtquelle etwa so groß ist wie der Akzeptanzwinkel gilt näherungsweise:

$$n_R \cong \frac{l}{2r} \tan g \cong \frac{l}{2r} \frac{g}{50}$$

Eine weitere wichtige Größe ist das Extraktorverhältnis, der Quotient aus Extraktorbreite und Umfang des Lichtrohres an der Stelle  $x$ :

$$V_E(x) = \frac{w_{ex}}{w_r}$$

Nach /74/ folgt für das Extraktorverhältnis an der Stelle  $x$ :

$$V_E(x) = \frac{2}{(1,33 - x)n_R} - 0,05$$

Mit dieser Formel läßt sich die notwendige Extraktorbreite annähernd bestimmen, wenn die Zahl der Reflexionen zwischen 6 und 24 liegt. Dies ist meistens gewährleistet, da bei weniger als 6 Reflexionen der Einsatz von Hohllichtleitern keinen Sinn macht, und bei mehr als 24 Reflexionen die Absorptionsverluste durch die Folie zu groß werden. Soll der Hohllichtleiter aus mehreren Modulen zusammengesetzt werden, so muß der Extraktor nur für die maximale Länge berechnet werden. Kürzere Längen werden dann durch eine Kombination einzelner Module realisiert /76/.

## 5 Photometrie

### 5.1 Grundsätzliches

Die Photometrie von hohlen Lichtleitern stellt neue Ansprüche an lichttechnische Laboratorien. Aufgrund ihrer großen Längen von bis zu 50 m, wobei allerdings 30 m zur Zeit die maximale Länge für kommerziell erhältliche Standarttypen ist, würde man entsprechend große Räume benötigen, die in den geforderten Abmessungen aber meist nicht vorhanden sind. Selbst wenn diese Räumlichkeiten gegeben sind, scheitern die bekannten Meßmethoden an den folgenden Problemen:

#### 5.1.1 Messung des Lichtstromes

##### 5.1.1.1 Die Ulbrichtsche Kugel

Mit einer Ulbrichtschen Kugel kann der Gesamtlichtstrom einer Lichtquelle mit einer einzigen Messung bestimmt werden, unter der Voraussetzung, daß die Innenseite der Kugel homogen ist und vollkommen diffus reflektiert. Dann gilt für die mittlere indirekte Beleuchtungsstärke in einen beliebigen Punkt auf der Kugelinseite:

$$\bar{E}_{ind} = \frac{\Phi_L}{A_K} \frac{r}{1 - r}$$

Die Innenfläche der Kugel sowie deren Reflexionseigenschaften werden im Kugelfaktor  $C_K$  zusammengefaßt, so daß sich für den Lichtstrom  $\Phi_L$  ergibt:

$$\Phi_L = C_K \bar{E}_{ind}$$

Das Meßverfahren hat sich über Jahrzehnte hinweg bewährt und führt bei gut gewarteten Kugeln selten zu einer relativen Meßunsicherheit von mehr als 4 %. Als Voraussetzung für die Lichtstrommessung mit der Ulbrichtschen Kugel muß die betreffende Lichtquelle jedoch komplett in den Innenraum der Kugel

hineinpassen. Da die bekannten Kugeln einen Durchmesser von max. 3 m haben, kommt eine Messung von hohlen Lichtleitern in der Regel nicht in Frage.

#### 5.1.1.2 Der Lichtstromintegrator

Eine weitere Möglichkeit der Lichtstrommessung bieten Meßverfahren, die eine gedachte Kugeloberfläche um die Lichtquelle herum spiralförmig abtasten und den Lichtstrom aus der Beleuchtungsstärke ermitteln /40/. Der Lichtstrom berechnet sich wie folgt:

$$\Phi = r^2 \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} E(\mathbf{J}, \mathbf{j}) \sin \theta d\theta d\phi$$

Bei der Messung wird die Lichtquelle um ihre vertikale Achse gedreht. Dadurch bleibt zwar der Lichtstrom auch von lageempfindlichen Lichtquellen nahezu konstant, die Lichtquelle muß aber kleiner sein als der zweifache Abstand zwischen Drehachse und Empfänger. In der Praxis findet man selten Meßapparaturen, die Lichtquellen mit mehr als 2m Länge erlauben. Somit ist dieses Meßverfahren nur für sehr kleine Hohllichtleiter gebräuchlich.

#### **5.1.2 Messung der Lichtstärke und Lichtstärkeverteilung**

Die Messung der Lichtstärke wird in den meisten Fällen über eine Beleuchtungsstärkemessung mit anschließender Anwendung des photometrischen Entfernungsgesetzes durchgeführt:

$$I = \frac{E \cdot r^2}{\cos \theta \Omega_0}$$

Der kleinste Abstand r zwischen Lichtquelle und Empfänger, von dem an das Entfernungsgesetz für einen bestimmten Meßfehler als gültig angesehen werden kann, wird photometrische Grenzentfernung genannt. Sie ist von verschiedenen Faktoren abhängig:

- von den Abmessungen der Lichtquelle,
- von der geforderten photometrischen Meßunsicherheit, innerhalb der sich der Unterschied zwischen der in einer bestimmten Meßentfernung ermittelten "scheinbaren Lichtstärke" (definiert als Produkt aus der in dieser Entfernung

- gemessenen axialen Beleuchtungsstärke und dem Quadrat dieser Meßentfernung) und der tatsächlichen Lichtstärke dieser Lichtquelle (Grenzwert des Produktes bei unendlich großer Meßentfernung) bewegen darf,
- von der räumlichen Lichtstärkeverteilung bzw. der räumlichen Leuchtdichte-  
verteilung der Elemente der Lichtquelle (je "spitzer" die Verteilung ist, desto  
größer ist die Grenzentfernung),
  - von der örtlichen Verteilung der Leuchtdichte über die Lichtquellenfläche (ist  
die Leuchtdichte am Rande der Lichtquelle hoch, so ist die Grenzentfernung  
größer, als wenn sie sich in der Mitte der Lichtquelle konzentriert),
  - von den Abmessungen der lichtempfindlichen Fläche des Empfängers.

In der Praxis wird für punktförmige Lichtquellen mit lambertscher Abstrahlung eine Grenzentfernung, die dem Zehnfachen der maximalen Ausdehnung der leuchtenden Fläche entspricht, als hinreichend genau angenommen, um den Einfluß auf die relative Meßunsicherheit kleiner als 1% zu halten.

Zur Messung der Lichtstärkeverteilung von Lichtquellen verwendet man heute in der Regel Drehspiegelgoniophotometer /50/. Dabei wird die Lichtquelle um ihre vertikale Achse gedreht, und das Licht über einen Spiegel auf einen weit entfernt stehenden Empfänger gelenkt. Da sich dieser außerhalb der photometrischen Grenzentfernung befindet, kann aus der gemessenen Beleuchtungsstärke mit Hilfe des Entfernungsgesetzes die Lichtstärke berechnet werden. Aus der so bestimmten Lichtstärkeverteilung läßt sich auch der Lichtstrom berechnen zu

$$\Phi = \int \int_{Jj} I(J, j) \sin J dJ dj$$

Da die Lichtquelle nur um ihre vertikale Achse gedreht wird, eignet sich das Verfahren auch für Lichtquellen mit lageabhängigem Lichtstrom. Für Leuchtenwender, bei denen die Lichtquelle auch um ihre horizontale Achse gedreht wird, ist es ungeeignet. Neuere Modelle arbeiten mit einem Spiegel, der exzentrisch um die horizontale Längsachse rotiert, und damit eine geringere Bauhöhe benötigt /41/. Für die Messung von hohlen Lichtleitern sind diese Geräte jedoch ungeeignet, da der Abstand zwischen vertikaler Drehachse und

Dreharmlager ca. 1m beträgt, was eine maximale Länge der Lichtquelle von 2m erlaubt.

Die Lichtstärke kann aber auch über die Leuchtdichte berechnet werden:

$$I = \int_{A_1} L \cos \theta_1 dA_1$$

Da jedoch die Messung der Leuchtdichteverteilung mit herkömmlichen Leuchtdichtemessern praktisch nicht möglich ist, wird dieses Verfahren nur in Kombination mit bildauflösenden Kameras eingesetzt (Kapitel 5.2).

## 5.2 Nahfeldphotometrie

Bei der gestellten Aufgabe kommt man daher nicht umhin, Messungen innerhalb der photometrischen Grenzentfernung durchzuführen. Die Frage, wie groß der Abstand zwischen Lichtquelle und Empfänger sein muß, damit bestimmte Meßunsicherheiten nicht überschritten werden, war lange Zeit Gegenstand von Diskussionen. Die Regel, daß der Abstand mindestens dem Fünffachen der maximalen Ausdehnung der leuchtenden Fläche entspricht, wurde zunächst für punktförmige Lichtquellen aufgestellt. Mit der weiteren Verbreitung der Leuchtstofflampe nach dem Ende des 2. Weltkrieges konnte diese Regel auch für diese neue Lampe empfohlen werden /27/. Ebenfalls aus dieser Zeit findet man erste Versuche, lange Leuchten in mehrere kleinere Elemente zu teilen, um für diese Teilleuchten genauere Meßwerte zu finden /25/. Ngai beschreibt sogar ein theoretisches Verfahren, bei der die Leuchte durch eine Vielzahl von Punktlichtquellen ersetzt wird, wobei aber für jeden Punkt die Leuchtdichteverteilung bekannt sein muß /44/. Er gibt jedoch keine Hinweise, wie diese Verteilungen zu messen sind. Weitere Probleme tauchten mit der Verwendung von Berechnungsplanungsprogrammen auf. Benutzt man konventionelle Lichtstärkeverteilungskurven, die im Fernfeld gemessen wurden, zur Berechnung von Beleuchtungsstärken, die innerhalb der photometrischen Grenzentfernung liegen, kann dies zu erheblichen relativen Abweichungen bis zu 50% führen /42/. Hier kann eine Unterteilung der leuchtenden Fläche in N kleine Flächen, wobei jede einzelne Fläche die photometrische Verteilung wie die originale Fläche, dividiert durch N, erhält, eine Verbesserung bringen. Probleme entstehen dabei aber durch inhomogene Leuchtdichteverteilungen von

Leuchtstofflampen entlang ihrer Längsachse, und durch thermische Einflüsse von Abdeckungen /80/. Diese Probleme umgeht man, wenn mit Hilfe einer Optik ein Bild von der zu vermessenden Leuchte erzeugt wird, und mittels einer verschiebbaren Blende nur ein Teil der Leuchte auf dem Empfänger abgebildet wird (Bild 9) /35/.

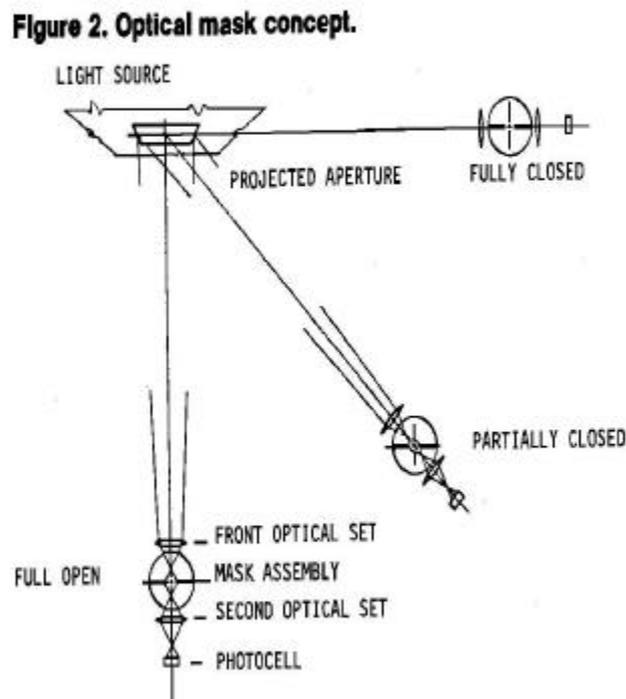


Bild 9: Nahfeldphotometrie mittels optischer Blende

Die Addition der einzelnen Teil-LVK's bei jeweils gleichen Winkeln ergibt die Gesamt LVK. Nachteilig an dieser Methode ist der hohe Zeitaufwand, der proportional zu der Anzahl der Segmente steigt. Dennoch gelang es, die relativen Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Beleuchtungsstärken von 32 % auf 21 % zu reduzieren.

Eine ganze Reihe von Untersuchungen wurden durchgeführt, indem innerhalb der photometrischen Grenzentfernung eine Beleuchtungsstärkeverteilung gemessen wurde, und diese Beleuchtungsstärken über den Abstand Lichtquelle-Empfänger in sogenannte äquivalente Lichtstärken umgerechnet wurden. Diese äquivalenten Lichtstärken konnten dann für die Berechnung von Beleuchtungsstärken in dem

gleichen Abstand eingesetzt werden. Stannard und Brass entwickelten einen Meßaufbau, bei dem ein Photoelement an einem Ausleger beweglich montiert war, und so die Beleuchtungsstärkeverteilung in bestimmten Ebenen von der Leuchte entfernt gemessen werden konnte (Bild 10) /62/.

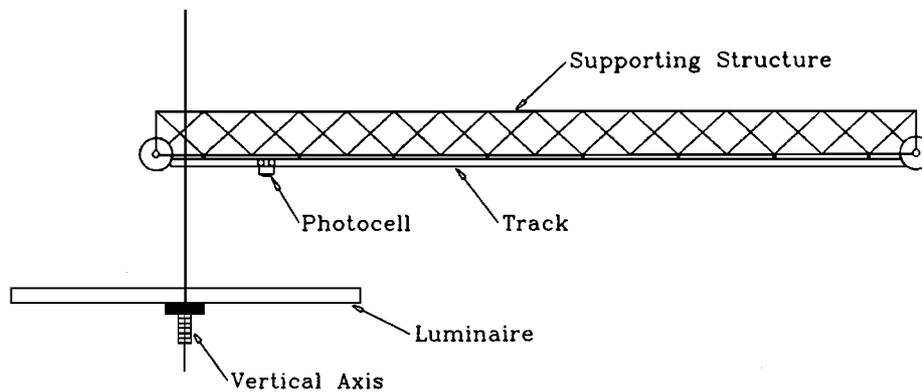


Bild 10: Meßaufbau nach Stannard und Brass

An den Schnittpunkten von diesen Ebenen mit dem Standard-Kugelkoordinatensystem konnten daraufhin äquivalente Lichtstärkeverteilungskurven erstellt werden. Benötigt man Werte, die zwischen 2 Ebenen liegen, können diese in guter Näherung interpoliert werden /12/. Nicht berechnet werden können mit dieser Methode Ebenen, welche die Leuchte schneiden. Auch ist der Meßabstand für Positionen, die weit von der vertikalen Achse der Leuchte entfernt liegen sehr groß, und Winkel über  $110^\circ$  können nicht mehr gemessen werden. Dennoch war es möglich, mit diesen Daten die relativen Unterschiede zwischen gemessen und berechneten Werten von 23 % auf ca. 5 % zu reduzieren. Eine Weiterentwicklung dieser Methode waren die Versuche von Ngai, F. Zhang und J.Zhang mit einem Drehspiegelgoniophotometer, bei dem ein Photoelement auf der gegenüberliegenden Seite des Spiegelarms montiert worden war /45/. Die Spiegelfläche selbst wurde zur Vermeidung von Reflexionen mit einem schwarzem Tuch abgedeckt. Mit diesem Versuchsaufbau konnte in kurzer Zeit direkt die äquivalente Lichtstärkeverteilung gemessen werden. An der TU Berlin wurden solche Messungen mit verschiedenen Aufsätzen durchgeführt, die direkt

auf den Spiegel des Goniophotometers montiert wurden und die Messung von Nahfeld LVK's in unterschiedlichen Abständen ermöglichten (Bild 11).



Bild 11: Meßaufbau zur Nahfeldphotometrie am Drehspeigelgoniophotometer

Mit diesen äquivalenten Lichtstärkeverteilungskurven wurden unter Zuhilfenahme von kommerziellen Lichtberechnungsprogrammen typische Problemfälle wie indirekt strahlende Leuchten und Wandleuchten untersucht /33/. Dabei konnten die Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Beleuchtungsstärken um teilweise mehr als Faktor 2 reduziert werden. Problematisch bei der Methode ist die Existenz von mehreren LVK's für eine Leuchte. Dies kann von bekannten Lichtplanungsprogrammen nicht bearbeitet werden. Es wird auch kein Vorschlag gemacht, bei welcher Entfernung mit welcher LVK gearbeitet werden soll.

Messungen innerhalb der photometrischen Grenzentfernung sind mit einem Autokollimationsphotometer möglich, bei dem der Empfänger aus einem Raster-Photometerkopf mit parallel angeordneten Tuben besteht /24/,/23/. Diese Tuben

haben einen sehr kleinen Öffnungswinkel (ca.  $2^\circ$ ). Wenn der Raster-Photometerkopf mindestens die Ausmaße der zu vermessenden Leuchte hat, kann die Lichtstärkeverteilung der Leuchte in geringer Entfernung gemessen werden. Neben der Größe des Raster-Photometerkopfes ist die hohe Absorption in Tuben des Empfängers nachteilig. Die Idee der gleichzeitigen Erfassung des Lichtes, welches in eine bestimmte Richtung ausgesendet wird, führt aber zur Lösung des Problems, wenn man mit bildauflösenden Meßsystemen auf Basis von CCD Empfängern arbeitet. Zunächst wurde versucht mit gewöhnlichen TV-Kameras Leuchtdichtemessungen zu unternehmen /65/. Die Beschränkung auf nur vier Meßbereiche brachte aber noch sehr unbefriedigende Ergebnisse. Ein wesentlicher Fortschritt war das CapCalc System von Rea und Jeffrey, das mit einer kommerziellen 8 Bit CCD Kamera arbeitet /51/. Über eine Framegrabber-Karte wurden digitale Bilder von verschiedenen beleuchteten Szenarien erstellt. Nach einer Kalibrierung der Kamera konnten den Grauwerten der Bilder Leuchtdichten zugeordnet werden. Da die Leuchtdichte eine abstandsunabhängige Größe ist, kann die Messung innerhalb der photometrischen Grenzentfernung durchgeführt werden /8/. Eine sehr anschauliche Darstellung der Theorie findet man bei Ashdown /10/, die zur Entwicklung eines Nahfeldphotometers führt /7/, das in den USA und in Kanada patentrechtlich geschützt ist /9/. In Deutschland wurden von Schüßler Untersuchungen über die Eignung der CCD-Kameratechnik in der Photometrie unternommen, mit dem Resultat, daß ein solches System tauglich ist, wenn nicht zu hohe Anforderungen gestellt werden /58/. Riemann, Schmidt und Poschmann beschreiben ein bildauflösendes Goniophotometer mit einer CCD Kamera /53/ und haben sich dieses Verfahren in Deutschland patentieren lassen /52/. Dabei wird die Meßkamera auf einer Kugeloberfläche um die Leuchte herum bewegt. In äquidistanten Stützstellen, typischerweise in  $2,5^\circ$  Abstand, werden Kamerabilder aufgenommen (Bild 12). Durch die Zuordnung von Leuchtenelementen zu Bildpunkten der Kamera werden nacheinander alle Leuchtdichten registriert, die einen Beitrag zur Lichtstärke in eine Richtung leisten. Die Werte werden im Speicher des Steuerrechners abgelegt und am Ende einer Messung zur Lichtstärke zusammengefügt.

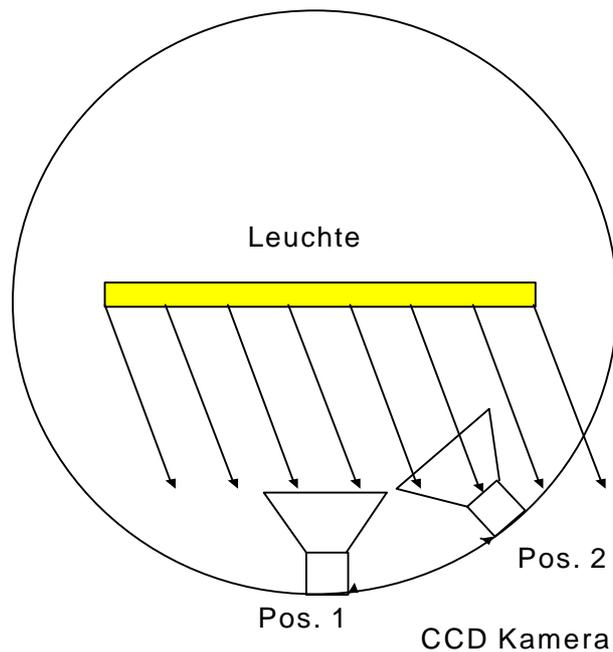


Bild 12: Meßprinzip mit CCD-Kamera

Für eine CCD Kamera mit 768 x 567 Pixeln bedeutet dies, daß ca. 440000 Leuchtdichtewerte gleichzeitig gemessen werden können. Aus Gründen der praktischen Meßtechnik liegt die Anzahl der Meßwerte durch die Bildung von Makropixeln deutlich niedriger, was nicht zuletzt das Problem der großen Datenmenge reduziert. Da CCD-Zeilen ursprünglich nicht für die Photometrie entwickelt wurden, treten bei der Messung von lichttechnischen Größen neue Probleme auf, die im folgenden dargelegt werden /22/:

- Dunkelstrom: Da auch bei völliger Dunkelheit aufgrund thermischer Ursachen Ladungsträger generiert werden, ist dieser Dunkelstrom vom jeweiligen Meßwert abzuziehen. Dieser Dunkelstrom wird während der Messung von einem Teil der CCD-Matrix bestimmt, der lichtdicht abgedeckt ist. Bei Integrationszeiten bis 10 s ist der Einfluß der Dunkelgenerationsrate jedoch vernachlässigbar.
- Nichtlinearität: Im Prinzip ist eine CCD-Matrix ein lineares Bauteil. In der Praxis treten durch die Kameraelektronik und durch Sättigungseffekte in den Pixeln Nichtlinearitäten zwischen dem einfallendem Licht und dem Signalwert auf.

Dieser Effekt wird während der Kalibrierung gemessen und die Meßwerte werden mit einem Korrekturfaktor berichtigt.

- Inhomogenität (Shading): Dieser Effekt beschreibt die ungleichmäßige Empfindlichkeit der einzelnen Pixel. Hervorgerufen wird dies durch den  $\cos^4$ -Randabfall des verwendeten Objektivs und durch Empfindlichkeitsunterschiede der Pixel selbst. Auch dieses Verhalten kann während der Kalibrierungsphase ermittelt und korrigiert werden.
- $V(I)$ -Anpassung: Aufgrund der geometrischen Verhältnisse der CCD-Matrix, bei der jedes Pixel Licht aus einer anderen Richtung bewertet, kann nicht mit den bewährten Partialfiltern gearbeitet werden. Es müssen Vollfilter eingesetzt werden. Ein weiteres Problem ist schräg einfallendes Licht, das unterschiedliche Wege durch das Filter zurücklegen muß, und auch an den Grenzen zwischen zwei Filtergläsern unterschiedlich gebrochen wird. Zur Lösung dieser Schwierigkeiten muß die spektrale Empfindlichkeit des CCD-Sensors möglichst genau bekannt sein und anschließend muß aus qualitativ hochwertigen und möglichst dünnen Filtergläsern ein Vollfilter hergestellt werden /63/. Damit ist es möglich, die  $f^1$ -Kennzahl /16/ auf weniger als 3,5 % zu senken. Man liegt damit aber immer noch deutlich über den  $f^1$ -Werten von partialgefilterten Photoelementen, die einen Wert von ca. 1,4 % aufweisen /48/.
- Streulichteinfluß: An den Grenzflächen von optisch unterschiedlichen Materialien kommt es zu Reflexionen an der Oberfläche. Dies gilt sowohl für die Oberfläche der CCD-Matrix als auch für die Linsen des verwendeten Objektivs. Hier muß bei der Auswahl der Objektivs auf deren streuarms Verhalten geachtet werden.
- Dynamikumfang: CCD-Kameras mit einem 8 bit A/D Umsetzer können 256 Graustufen darstellen. Dies ist für die praktische Meßtechnik oft zuwenig. Da aber 440000 Pixel mehr als genug sind, um orts aufgelöste Informationen zu bekommen, besteht die Möglichkeit, mehrere Pixel zu Makropixeln zusammenzufassen. Als positiver Nebeneffekt steigt dadurch das Signal/Rauschverhältnis um den Faktor  $N^{0,5}$ , wenn N die Anzahl der Pixel darstellt. Bei stationären Messungen kann über eine Variation der Integrationszeit die Auflösung verbessert werden. Dabei wird die Aufnahme der selben Szene solange wiederholt, bis keine übersteuerten Pixel mehr vorhanden sind.

Der Signalwert des einzelnen Pixel ist proportional der mittleren Leuchtdichte des Objektes in dem vom Sensorelement erfaßten Raumwinkel und der Fläche:

$$S(i, j) = k \frac{\Phi(i, j)}{A_p(i, j)\Omega(i, j)} = kL(i, j)$$

Mit den oben angegebenen Korrekturen folgt für die Berechnung der Leuchtdichte aus dem zugehörigen Grauwert:

$$L = [GW(i, j, t) - DS(t) - DS(i, j)]NL(GW)SH(i, j)$$

Wenn diese Punkte beachtet werden, ist eine Eingruppierung in Klasse "B" der Leuchtdichtemeßgeräte möglich /17/.

Neue mechanische Probleme bei der Konstruktion von Photometern mit CCD Kameras gibt es nicht, da sie von den Abmessungen und dem Gewicht her unproblematisch sind. Ein Vergleich der Meßwerte des Nahfeldgoniophotometers mit CCD-Kamera und einem konventionellen Photometer zeigte Abweichungen, die innerhalb der Meßunsicherheiten der Geräte lagen /21/.

### 5.3 Photometrie von hohlen Lichtleitern

Unabhängig von den in Kapitel 5.2 aufgezeigten Verfahren sind in der über hundertjährigen Geschichte der hohlen Lichtleiter verschiedene Möglichkeiten beschrieben worden, die lichttechnischen Daten von Lichtrohren zu ermitteln. Im Folgenden werden einige Verfahren genauer dargestellt, die einen Bezug zu der Meßmethode oder zu den Materialien haben, die für das ARTHELIO-Projekt relevant sind.

#### 5.3.1 Messung der Beleuchtungsstärke

Eine Möglichkeit zur Bestimmung des Lichtstromes ist das Messen der Beleuchtungsstärke direkt auf der Außenseite des Hohllichtleiters /30/. Dazu muß ein geeigneter Empfänger in Längs- als auch in Radialrichtung auf der Oberfläche des Lichtrohres entlang geführt werden. Im Idealfall ist dabei die gemessene

Beleuchtungsstärke gleich der spezifischen Lichtausstrahlung und erlaubt damit eine Aussage über den emittierten Lichtstrom.

$$E = \frac{\Phi}{A_2} = \frac{\Phi}{A_1} = M$$

Zu beachten ist, daß die Empfänger normalerweise eine plane Oberfläche besitzen und daher, in Abhängigkeit des Krümmungsradius des Lichtrohres, nicht exakt auf der Oberfläche positioniert werden können. Weitere Abweichungen können durch den Abstand entstehen, den der eigentlich lichtempfindliche Teil des Empfängers vom Lichtrohr hat. Durch notwendige Streuscheiben und Blenden für die Cosinusanpassung befindet sich dieser lichtempfindliche Teil des Empfängers stets in einem gewissen Abstand zur Oberfläche des Lichtrohres. Außerdem können Mehrfach-Reflexionen zwischen den Oberflächen von Hohllichtleiter und Empfänger auftreten. Die Summe dieser Meßfehler kann durch eine Vergleichsmessung eines Rohr-Teilstückes in einer Ulbrichtschen Kugel gemessen werden und beträgt ca.  $\pm 3\%$  /78/. Das Verfahren ist aber je nach Anzahl der gewählten Meßpunkte sehr zeitaufwendig und macht außerdem keine Aussage über die Richtungsabhängigkeit des ausgesandten Lichtstromes.

### **5.3.2 Turbosider**

Der italienische Hersteller von hohlen Lichtleitern für die Tunnelbeleuchtung gibt in seinen Produktinformationen Lichtstärkeverteilungskurven in cd/klm für die C0/C180-Ebene an /69/. Dabei wurde die Beleuchtungsstärke in 1 m Entfernung ermittelt, und diese Werte wurden anschließend über das photometrische Entfernungsgesetz in Lichtstärken umgerechnet. Die photometrische Grenzentfernung wurde jedoch völlig außer acht gelassen. Deshalb führen diese angegebenen Lichtstärken durch erneute Anwendung des photometrischen Entfernungsgesetzes in unterschiedlichen Entfernungen, zu fehlerhaften Beleuchtungsstärken. Das beschriebene Verfahren ist daher als Grundlage zur Beleuchtungsberechnung nicht geeignet.

### 5.3.3 Siemens AG

Bei der Siemens AG erstellte Leuthold eine Arbeit, in der eine Meßmethode vorgeschlagen wird, die mit konventioneller Photometrie außerhalb der photometrischen Grenzentfernung arbeitet /37/. Dabei wird der Hohllichtleiter segmentiert und das zu vermessende Stück so klein gewählt, daß für dieses Segment die photometrische Grenzentfernung nicht unterschritten wird. Für kleine Rohrdurchmesser (8 cm) ist das Verfahren getestet worden und brachte zufriedenstellende Ergebnisse. Jedoch ist zu beachten, daß nur 20 cm lange Teilstücke der Lichtrohres untersucht wurden, und hierbei schon eine Grenzentfernung von 90 cm ermittelt wurde. Leuthold schlägt einen Meßaufbau mit feststehendem Prüfling und verfahrbarer Meßeinrichtung vor, der aber nicht realisiert wurde (Bild 13).

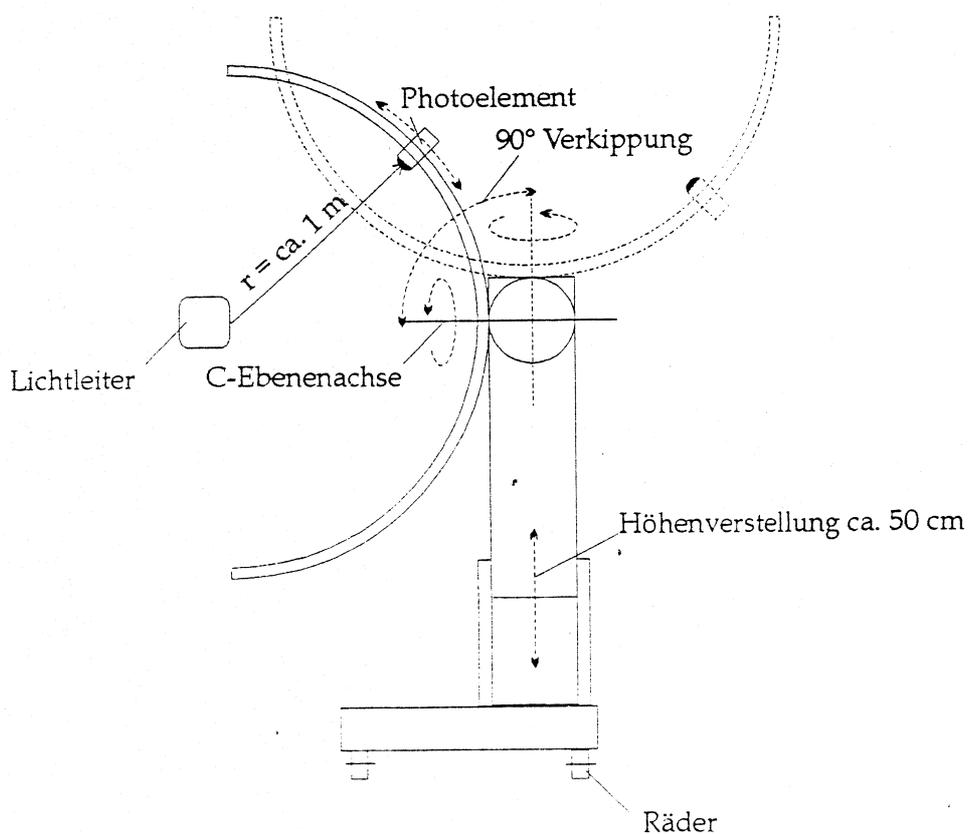


Bild 13: Meßaufbau nach Leuthold

Auch diskutiert Leuthold die Möglichkeit, den Meßaufbau mit einer CCD Kamera zu erweitern, damit innerhalb der photometrischen Grenzentfernung gearbeitet werden kann.

#### 5.3.4 Messung mittels Aperturblende

Ein ähnliches Verfahren zur Messung außerhalb der photometrischen Grenzentfernung wird in /13/ dargestellt. Dabei wird mittels einer Aperturblende nur ein kleiner Teil des Lichtrohres erfaßt, was die Grenzentfernung entsprechend reduziert und damit den Bau kleinerer Photometer erlaubt (Bild 14).

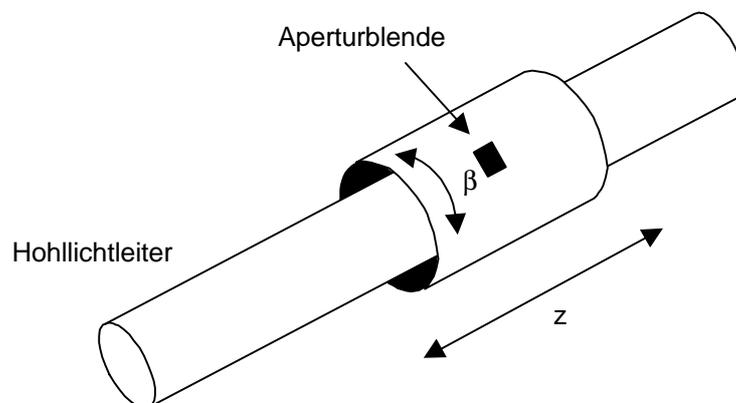


Bild 14: Hohllichtleiter mit Aperturblende

Nachteilig ist, daß während der Messung die Aperturblende und die Meßeinrichtung, die stets auf die Blende orientiert ist, durch Drehung um  $\beta$  und durch Verschieben in z-Richtung über die gesamte Oberfläche des Hohllichtleiters geführt werden muß. Über einen praktischen Meßaufbau werden aufgrund dieser Schwierigkeiten auch keine genaueren Angaben gemacht.

### 5.3.5 Messung mit CCD Kamera

Eine erste Beschreibung von Hohllichtleiter-Photometrie mittels einer CCD Kamera findet man bei Whitehead u. a. /78/. Die Messungen wurden mit einem IQ Cam System durchgeführt /66/. Dabei wurden jeweils in der Mitte eines 2m Moduls Meßwerte aufgenommen. Da von einer Symmetrie in Längsrichtung des Hohllichtleiters ausgegangen wurde und in 30 ° Schritten gemessen wurde, reduzierte sich die Anzahl der Meßwerte auf 6 (Bild 15).

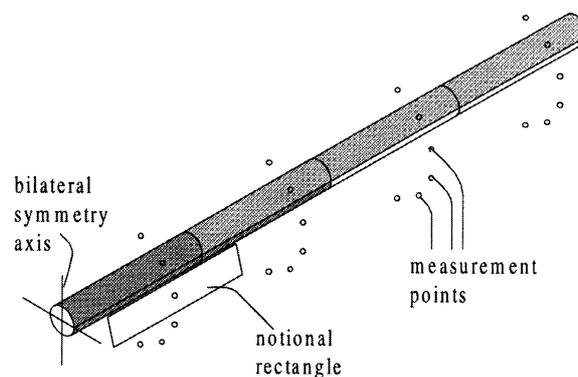


Bild 15: Meßpunkte nach Whitehead u.a.

Der Öffnungswinkel der verwendeten Kamera war 61 °, so daß 4 Aufnahmen je Meßstelle nötig waren, um sämtliche Lichteinfallrichtungen zu erfassen. Die relative Meßunsicherheit der erfaßten Lichtstromwerte aus diesen Meßwerten wurde mit +/- 10 % festgestellt, so daß bei weiteren Untersuchungen ein Photometerkopf zur Lichtstrommessung verwendet wurde. Weiterhin wird ein Verfahren zur Vereinfachung der Messung beschrieben, welches den Gesamtlichtstrom in zwei Teillichtströme separiert, einen in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung. Es wird davon ausgegangen, daß die relative Verteilung dieser beiden Lichtströme spiegelsymmetrisch ist, und somit die Messung des vorwärtsgerichteten Lichtstromes genügt, wenn zur Bestimmung der absoluten Werte ein Asymmetriefaktor verwendet wird. Diese Messung kann durchgeführt

werden, wenn das Ende des Hohllichtleiters mit einem Absorber versehen wird. Es werden leider keine Meßergebnisse mitgeteilt, die mit dieser Methode erzielt wurden. Zur Überprüfung dient ein Vergleich zwischen den gemessenen und mit der beschriebenen Methode berechneten Beleuchtungsstärken in 2 m Abstand unter dem Zentrum des Hohllichtleiters. Es wird nicht mitgeteilt ob dieser Vergleich am Anfang, in der Mitte oder am Ende des Hohllichtleiters durchgeführt wurde. Auch wird in dem Artikel der mechanische Aufbau des Goniophotometers und die Durchführung der Meßwerterfassung nicht beschrieben.

## 6 Photometer

### 6.1 Entwicklung

Bei der Entwicklung des Photometers wurde von Anfang an die Meinung vertreten, daß es sinnvoller ist, den Meßaufbau stationär zu gestalten und die Hohllichtleiter entlang ihrer Längsachse zu bewegen. Der erste Entwurf für den Bau des Photometers orientierte sich an Anlagen mit konventionellen Photoelementen, die für die schnelle Messung der Lichtstärkeverteilung entwickelt wurden /49/ und bei denen im Entwicklungsstadium der Leuchten die Meßgenauigkeit zugunsten der Meßgeschwindigkeit vernachlässigt wurde /39/. Die Anlage sollte mit einem Mehrkanalempfänger ausgestattet sein, dessen Photoelemente außerhalb der photometrischen Grenzentfernung auf einem Viertelkreisbogen angeordnet waren (Bild 16).

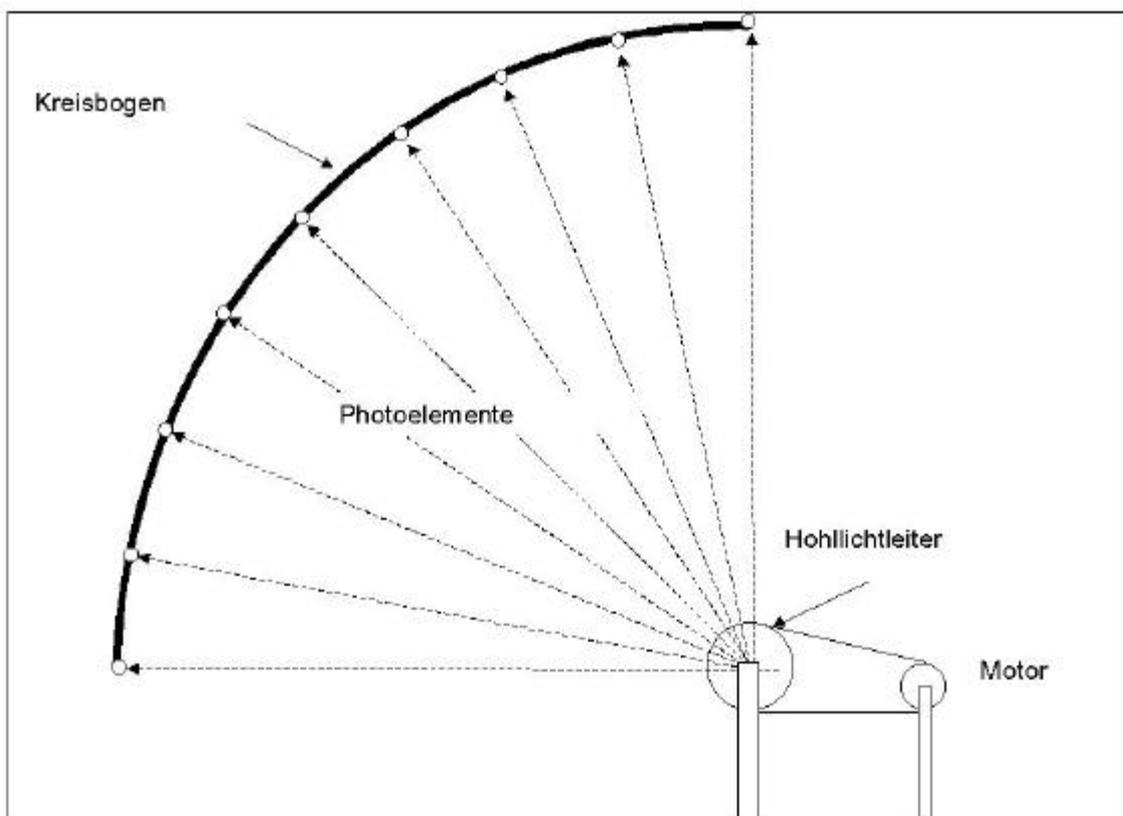


Bild 16: Photometer mit Mehrkanalempfänger

Dieser Kreisbogen sollte um  $90^\circ$  schwenkbar sein, damit sämtliche Lichtaustrittsrichtungen erfaßt werden konnten. Die zur Verfügung stehenden Räumlichkeiten ließen dabei eine Meßentfernung von ca. 3-4 m zu, wenn der Hohllichtleiter außerhalb der Raummitte plaziert würde. Zur Messung sollte das betreffende Teilstück mitsamt der zugehörigen Lichtquellen um die horizontale Längsachse gedreht werden.

Problematisch bei dieser Meßanordnung wäre die Bestimmung der Grenzentfernung für verschiedene Hohllichtleiter, die mechanische Bewegung der Empfänger und die parallele Auswertung der Meßdaten gewesen. Durch den zur Verfügung stehenden Laborraum wurde deutlich, daß Messungen nur innerhalb der photometrischen Grenzentfernung möglich waren. So fiel die Entscheidung, ein Meßsystem mit bildauflösender Photometrie auf Basis einer CCD Kamera einzusetzen. Bei dem Aufbau in Bild 17 sollten die Schienen einer vorhandenen Photometerbahn verwendet werden, auf denen die Hohllichtleiter mittels Wagen verschoben werden konnten.

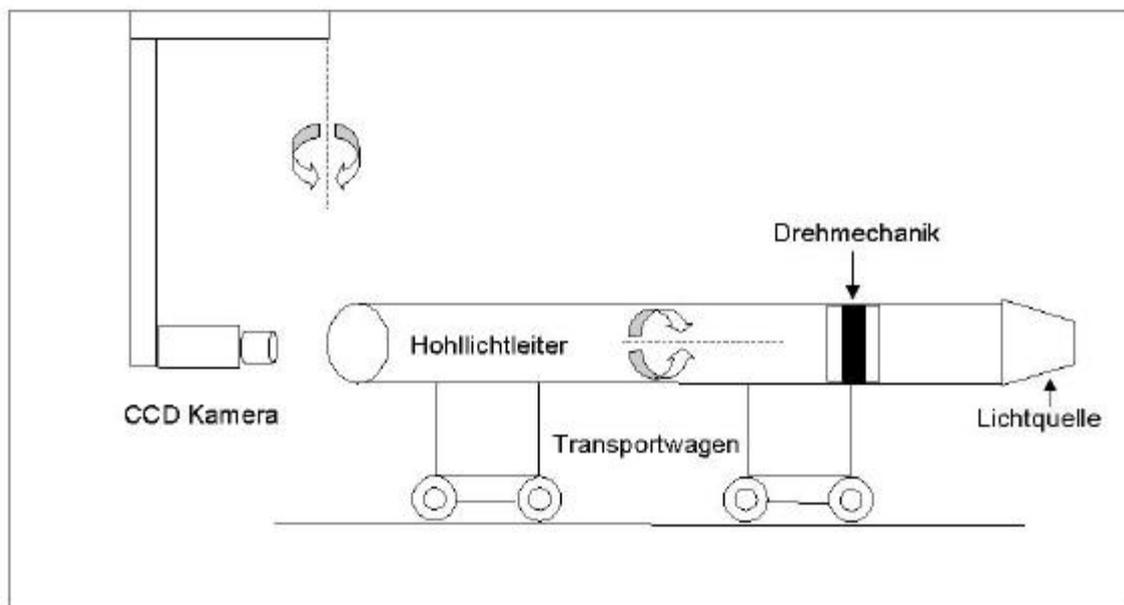


Bild 17: Entwurf Goniometer mit CCD Kamera

Durch die Entwicklung von Hohllichtleitern, die statt aus extrudierten Polycarbonatrohren nur noch aus flexiblen Folien bestanden, war eine Rotation

der Meßobjekte um ihre Längsachse jedoch nicht mehr möglich, da eine Formstabilität nicht mehr gegeben war. Folglich mußte das Meßobjekt in der Mitte des Raumes angeordnet werden und die zugehörige Meßeinrichtung mußte auf einer Kreisoberfläche um die Meßstelle herum bewegt werden. Da Hohllichtleiter, wie gewöhnliche Leuchten auch, normalerweise unter die Raumdecke montiert werden, war auch in dem endgültigen Entwurf eine hängende Montage vorgesehen.

Bei der Realisierung des Photometers wurde aus Termin- und Kostengründen, aber auch unter Beachtung von Patentschutzrechten, auf bereits vorhandene Komponenten zurückgegriffen. So besteht der mechanische Aufbau aus vielen Teilen, die sich bei anderen Goniophotometern bewährt haben. Die Messwertaufnahme mittels CCD-Kamera, die in Goniophotometern für konventionelle Lichtquellen eingesetzt wird, ließ sich an das neue Meßgerät anpassen. Neben den genannten Vorteilen bringt die Verwendung von Komponenten aber auch Nachteile mit sich, da man vorhandene Standards weiter benutzen muß. Im vorliegenden Fall äußert sich dies z.B. durch die Existenz mehrerer Koordinatensysteme, die bei der Bewegung des Photometers beachtet werden müssen (siehe Kapitel 6.2.7) und auch durch die Dimensionierung von Bauteilen. Hier ist insbesondere der Bogenmotor problematisch, dessen Drehmoment den geforderten Wert um ein Vielfaches übersteigt und im Kollisionsfall nicht einfach stehenbleibt, sondern ernsthafte Schäden an der Anlage verursachen kann.

## **6.2 Aufbau**

### **6.2.1 Goniophotometer**

Das Photometer besteht aus zwei mechanisch voneinander getrennten Teilen, dem Schienensystem und dem beweglichen Bogen mit der Meßeinrichtung (Bild 18). Beide Teile sind über den Kontrollrechner elektrisch miteinander verbunden und werden von einer Stelle bedient.

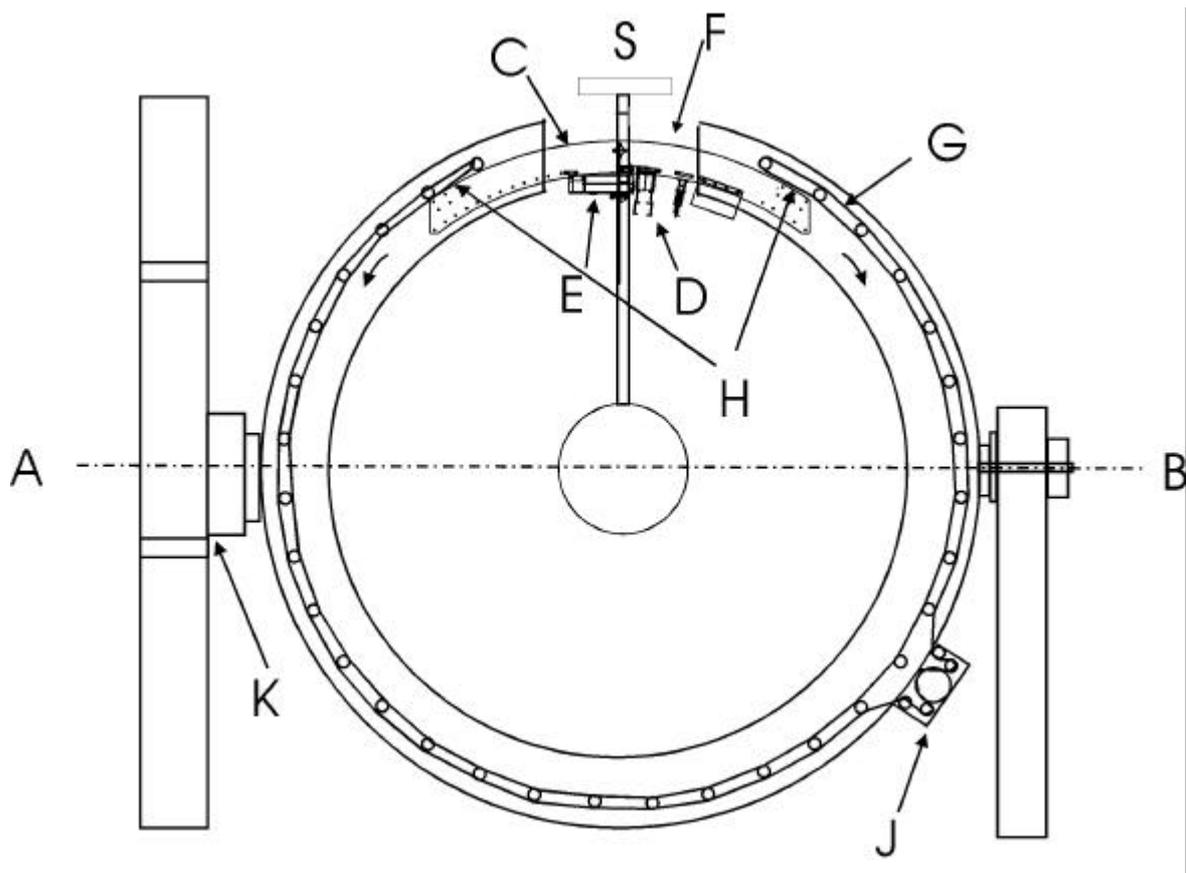


Bild 18: Goniophotometer Übersicht

- A, B: horizontale Drehachse
- C: Sensorwagen
- D: Photoelement
- E: CCD Kamera
- F: Bogenlücke
- G: Endloszahnriemen
- H: Verbindungsstellen
- J: Wagenmotor
- K: Kabeleintritt
- S: Schienensystem

Das Goniophotometer befindet sich genau in der Mitte des Schienensystems (Bild 19). Es besteht aus einem drehbaren Bogen, in dem sich die Meßeinrichtung bewegt, sowie aus dem Steuerrechner, der die Kontrolle über die verschiedenen Bewegungsrichtungen übernimmt und für die Datenaufnahme zuständig ist.

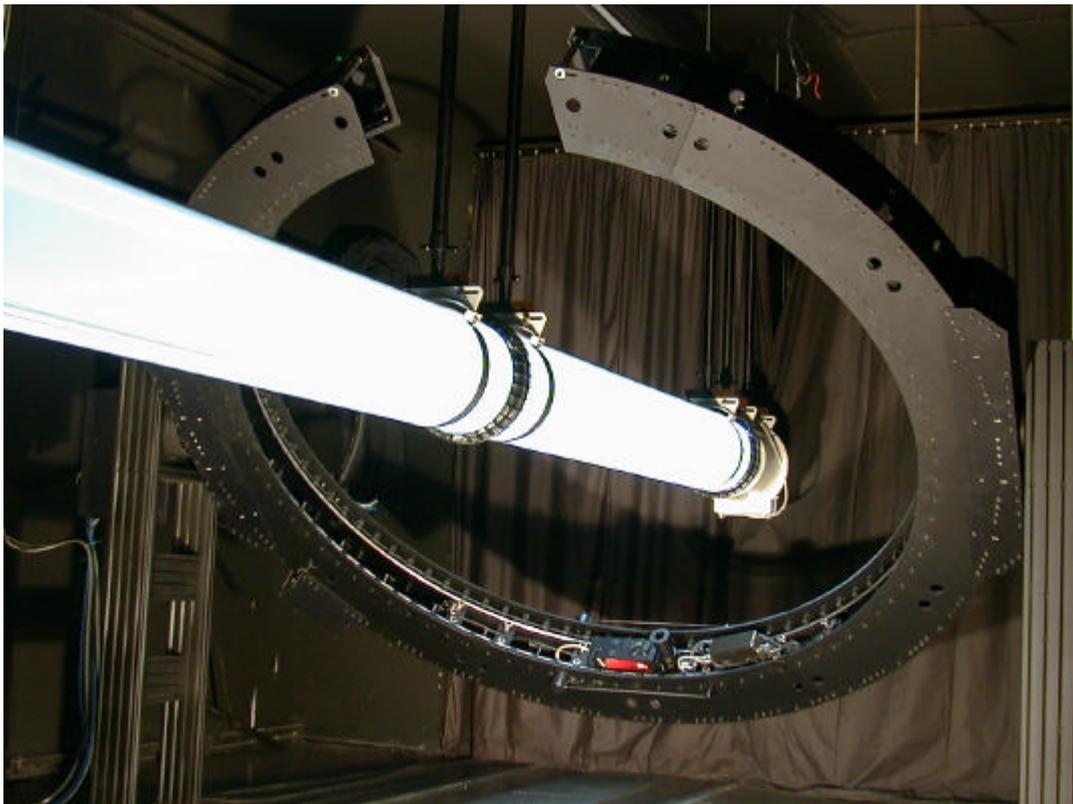


Bild 19: Goniophotometer mit Hohllichtleiter

### **6.2.2 Schienensystem**

An der Decke wurde ein 65 m langes Schienensystem aus Aluminiumprofilen montiert, mit dem es möglich ist, komplette Lichtrohrsysteme zu bewegen. Ein Querschnitt dieser Aluminiumprofile ist in Bild 20 zu sehen.

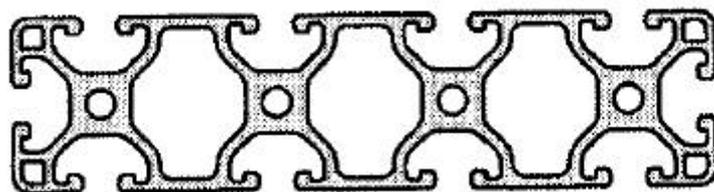


Bild 20: Querschnitt des Aluminiumprofils

Dieses Profil zeichnet sich durch eine sehr hohe Stabilität aus und wird in unterschiedlichen Ausführungen für viele Teile des Goniophotometers verwendet.

Das Schienensystem ist sowohl in der Höhe durch die Verwendung von Gewindestangen, als auch in Richtung quer zur Längsachse durch den Einsatz von Langlöchern justierbar. An den Außenseiten der Aluminiumprofile sind zwei Stahlstangen eingesetzt. Diese Stangen dienen zur Führung der Probenhalter, die auf jeder Seite mit 2 Rollen in die Stangen greifen (Bild 21).

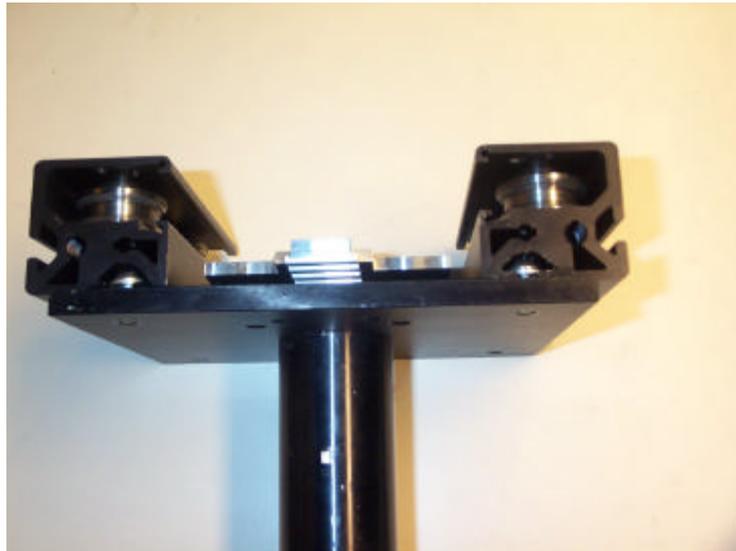


Bild 21: Oberteil Probenhalter

Die Probenhalter bestehen aus den Aufnahmen für das Schienensystem und einer Teleskopstange, die eine Montage der Lichtrohrsysteme in unterschiedlichen Höhen zulässt. Die größte Länge beträgt dabei 1720 mm und kann auf 1060 mm stufenlos reduziert werden. Mittels einer Spannmutterfixierung werden die Teleskopstangen in der gewünschten Höhe arretiert. Sind keine Meßobjekte in den Probenhaltern montiert, sorgt eine Spiralfeder für ein Zusammenschieben der Teleskopstangen in der minimalen Stellung.

Bewegt werden die Probenhalter mit einem Zahnriemen, der entlang der Längsachse des Schienensystems gespannt ist. Angetrieben wird der Zahnriemen mit dem sogenannten Linearantrieb, einem AC Servomotor der Fa. Bautz Typ F 634 (Bild 22).

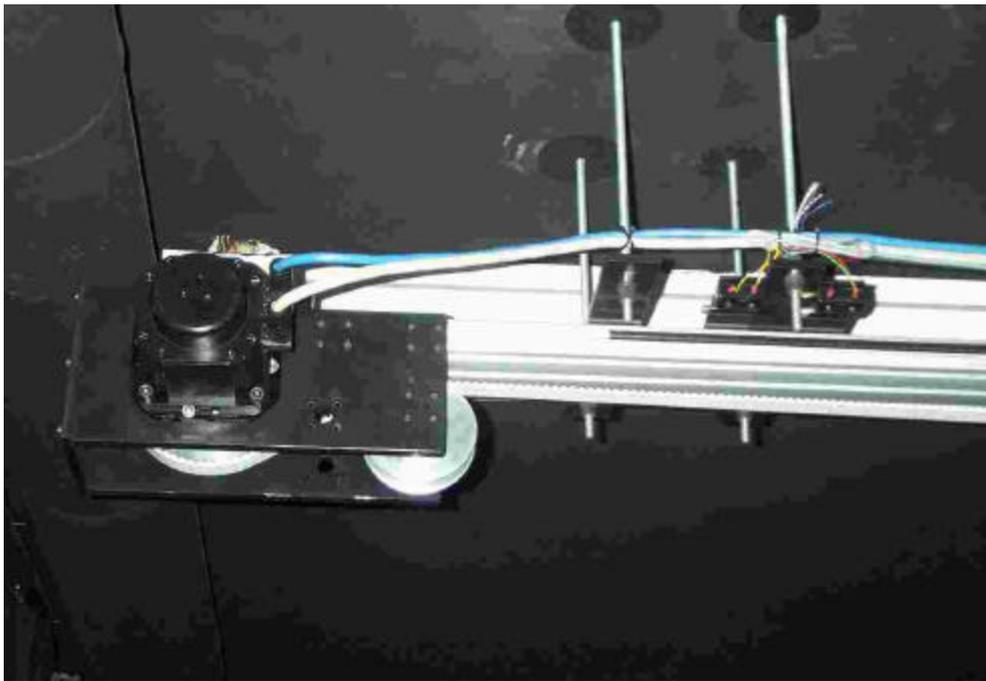


Bild 22: Linearantrieb

Dadurch wird eine maximale Geschwindigkeit von 0,5 m/s erreicht. Zusammen mit dem verwendeten spielfreien Harmonic Drive Getriebe ist eine Meßunsicherheit von  $\pm 1$  mm möglich. Die Positionierung erfolgt mittels eines Resolvers, ein mitlaufender Generator, der pro Motorumdrehung genau eine Sinus- und eine Cosinusschwingung erzeugt. Deren Spannungswerte werden im Kontrollrechner zur Positionsbestimmung weiterverarbeitet. Die beiden Enden des Zahnriemens sind fest an einem der 20 Probenhalter verbunden. Alle anderen Probenhalter sind mittels eines Spezialwerkzeuges auf dem Zahnriemen frei beweglich, was die Montage von Lichtrohrsystemen erleichtert. Es ist darauf zu achten, daß sich nicht alle Probenhalter am Anfang oder am Ende des Schienensystems befinden. In einem solchen Falle fehlt dem Zahnriemen die Unterstützung durch die Probenhalter an der Unterseite des Schienensystems und es besteht die Gefahr des Bruch des Zahnriemens. An den jeweiligen Endstücken des Schienensystems befinden sich Endschalter, die eine Bewegung der Probenhalter über die maximal zulässige Länge verhindern.

### 6.2.3 Drehbarer Bogen

Aus verschiedenen 4 mm starken Aluminiumblechen ist der Bogen aufgebaut. Auf jeder Seite bilden 5 Bleche mit 60 ° und 2 Bleche mit 15 ° einen Kreisbogen von 330 °. Eine zweite Lage von Aluminiumblechen bestehend aus 4 Blechen mit 60 ° und 2 Blechen mit 45 ° wird, um 30 ° versetzt mit der ersten Lage, verschraubt. CNC Bohrungen in den Aluminiumblechen erlauben eine sehr exakte und gleichzeitig auch stabile Verbindung (Bild 23).

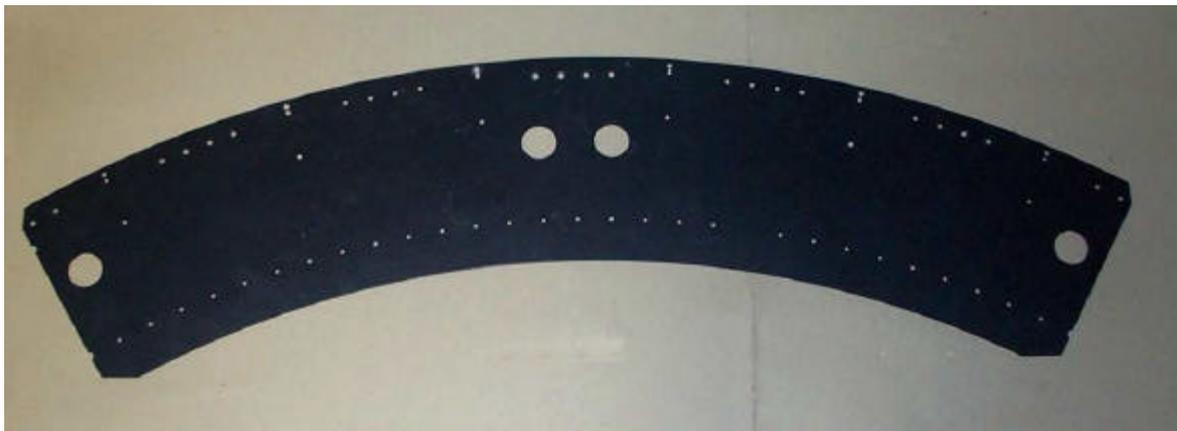


Bild 23: Aluminiumblech mit CNC Bohrungen

Dies bedeutet, daß ein Bogenstück von ca. 30 ° fehlt, was bei einem Durchmesser von 2150 mm eine Lücke von ca. 580 mm ausmacht. Diese Lücke im Kreisbogen ist notwendig, um die Probenhalter des Schienensystems frei bewegen zu können. Außerdem wird sie zum Messen des Lichtaustritts am Ende von Hohllichtleitern, die nur zum Lichttransport benutzt werden, gebraucht. Die beiden Seitenteile sind durch die bekannten Aluminiumprofile, hier mit einer Länge von 250 mm verbunden. Genau zwischen diesen beiden Seitenteilen wird die Meßeinrichtung verfahren. Dazu befinden sich auf den jeweiligen Innenseiten zwei kreisförmig gebogene Stahlstangen, welche die Führung des Sensorwagens übernehmen. Der ganze Bogen ist in seiner horizontalen Achse drehbar gelagert. Den Antrieb übernimmt ein AC Servo Motor der Firma Bautz Typ F804 in Verbindung mit einem Harmonic Drive Getriebe Typ HFUC-80-160-2UH. Der Motor leistet 1734 W in Nennbetrieb und erreicht ein Nenndrehmoment von 4,8 Nm. Das maximale Drehmoment beträgt 23 Nm. Durch die Untersetzung des Getriebes von 1:160

werden Drehmomente erreicht, die die notwendigen ca. 300 Nm weit überschreiten. Die maximale Geschwindigkeit beträgt ca. 12 °/s und kann beliebig reduziert werden. Die Initialisierung erfolgt über eine parallel betriebene Lochscheibe, auf der Bohrungen in verschiedenen Abständen angeordnet sind (Bild 24). Diese Abstände sind im Steuerrechner hinterlegt. Bei der Initialisierungsfahrt reicht daher eine Wegstecke aus, die über 2 Bohrungen hinwegführt, um die Position des Bogens eindeutig zu identifizieren.



Bild 24: Lochscheibe mit Bohrungen

Die Positionierung des Bogens erfolgt auch hier mit dem Standard-Resolver, mit einer Winkelauflösung von  $0,001^\circ$ . Dabei gibt der Hersteller eine reproduzierbare Winkeleinstellung mit einer Meßunsicherheit von weniger als  $0,002^\circ$  an.

Die beiden Ständer, die den Bogen halten, sind auf zwei im Fundament eingelassenen Stahlplatten befestigt. Über je 4 Stellschrauben auf jeder Seite ist ein Ausrichten der Ständer möglich.

#### **6.2.4 Sensorwagen**

Im Inneren des drehbaren Bogens bewegt sich der Sensorwagen, angetrieben von einem Endloszahnriemen, der über 69 kugelgelagerte Rollen geführt wird. Der Motor ist ein AC Servomotor der Firma Bautz Typ 504D. Der Wagen hat an beiden

Seiten sechs Rollen, mit denen er auf den zwei Stahlstangen bewegt werden kann. Bei gleichem Radius wie der Bogen und einer Bogenlänge von  $70^\circ$  ist der Sensorwagen in der Lage, über das fehlende Bogenstück zu fahren, obwohl in diesem Teil des Bogens keine Führungsschiene vorhanden ist. Dabei übernimmt die eine Seite des Endloszahnriemens solange den Antrieb, bis der Sensorwagen die Bogenlücke überquert hat und auf der anderen Seite mit der vorgesehenen Aufnahme in den Zahnriemen faßt. Die Position des Sensorwagens wird mit dem eingebautem Resolver bestimmt. Die maximale Geschwindigkeit beträgt ca.  $4^\circ/\text{sec}$  bei einer Winkelauflösung von  $0,001^\circ$ . Die Unsicherheit der reproduzierbaren Winkeleinstellung beträgt weniger als  $0,05^\circ$ . Sie ist damit etwas größer als beim Bogenantrieb, was an der sehr viel größeren Anzahl mechanischer Bauteile und dem längeren Zahnriemen liegt, der über seine Länge von ca. 12 m unterschiedliche Spannungen annimmt. In der Mitte des Sensorwagens ist die CCD Kamera montiert. Dabei handelt es sich um eine 8-bit schwarz-weiß CCD-Kamera der Firma Kappa, Modell CF8/4DX, die von der Firma TechnoTeam modifiziert wurde. Sie arbeitet mit einer Matrix von  $752 \times 582$  effektiven Bildpunkten, die zu Makropixeln von  $21 \times 21$  Pixeln zusammengefaßt sind. Daraus folgt eine Auflösung der Leuchtdichte von 1:2500. Eine weitere Erhöhung des Dynamikumfanges ist durch einen Satz von angepaßten Neutralglasfiltern möglich, die den Maximalwert der auftretenden Leuchtdichte an die Kameraempfindlichkeit anpassen. Der Öffnungswinkel des Objektivs beträgt ca.  $61^\circ$ , womit bei einem Abstand zwischen Kamera und Mittelpunkt des Goniometers von 1076 mm eine maximale Leuchtenlänge von 1 m erfaßt werden kann. In einem Abstand von  $5^\circ$  befindet sich das Photoelement mit dazugehörendem Meßverstärker. Dieses Photoelement übernimmt zum einen die Absolutwertkalibrierung, da mit der CCD-Kamera nur Relativwerte der Leuchtdichte aufgenommen werden. Zum anderen sorgt die  $V(I)$  Filterung auf dem Photoelement für die notwendige Anpassung an die relative spektrale Augenempfindlichkeit. So ist es möglich, die in Kapitel 5.2 beschriebenen Probleme der Kameraanpassung zu vermeiden. Der Versatz dieser beiden Sensoren ist im Rechner hinterlegt und wird während der Messung berücksichtigt. Um weitere  $7,2^\circ$  versetzt ist der Justagelaser (siehe Kapitel 6.3) angeordnet.

### **6.2.5 Kabelführung**

Für die Stromversorgung und den Signaltransport werden 3 separate Leitungen benötigt. Eine 50-adrige Leitung für die CCD Kamera, eine 4 adrige Leitung für den Meßverstärker und ein Triaxialkabel für den Photostrom. Die Kabelzuleitung führt durch das Drehlager gegenüber des Antriebsmotors. Die drei Kabel werden über 40 Rollen geführt und können der Bewegung des Sensorwagens folgen. Es galt dabei einen Kompromiß zwischen Anzahl der Adern und zulässigen Biegeradius zu finden. Die Kabelführung durch die Drehachse ist nicht unproblematisch. Da die Leitungen nebeneinander geführt werden, besteht die Gefahr, daß die Führungsrollen verlassen werden, wenn Bogen und Sensorwagen gleichzeitig bewegt werden. Deswegen erlaubt die Steuerung ein Verfahren des Sensorwagens nur bei senkrecht stehenden Bogen. Außerhalb des Bogens werden die Kabel über einen Flaschenzug geführt und mit einem angehängten Gewicht auf Spannung gehalten.

### **6.2.6 Endschalter**

Sowohl der Bogen als auch der Sensorwagen sind mit Endschaltern ausgerüstet, die eine Kollision zwischen Hohllichtleiter oder Probenhalter auf der einen Seite und Bogen oder Sensorwagen auf der anderen Seite verhindern sollen. Je zwei Endschalter befinden sich an den Enden des Sensorwagens und am inneren Rand des Bogens gegenüber der Bogenlücke. Die Endschalter sind zweistufig ausgeführt. In der ersten Stufe wird nur die betreffende Antriebsachse abgeschaltet. In der zweiten Stufe wird dann die Stromversorgung aller Achsen getrennt. Mit dieser Anordnung können aber die möglichen Kollisionspunkte nur teilweise gesichert werden. Eine völlige Sicherung über Endschalter ist aufgrund der komplexen Bewegung des Goniophotometers nicht möglich. Es existiert deshalb eine Softwareabfrage über mögliche Kollisionspunkte (Kapitel 6.5.5). Letztendlich ist der Anwender aufgefordert, gefährliche Situationen nicht zuzulassen. Diese können beispielsweise entstehen, wenn sich der Sensorwagen in der Bogenlücke befindet und nicht alle Probenhalter aus dem Drehbereich des Goniophotometers entfernt worden sind.

Sollte trotz aller Vorsicht eine problematische Situation entstehen, besteht durch eine Anzahl gut erreichbarer Not-Aus-Schalter die Möglichkeit, die Bewegung sofort zu beenden.

Da es zunächst bei Beginn des Betriebes trotz dieser Sicherungen zu Kollisionen aufgrund von Fehlbedienungen gekommen ist, wurden weitere Vorsichtsmaßnahmen hinzugefügt. Eine Kontaktmatte im Drehbereich des Bogens verhindert den Betrieb des Photometers bei Aufenthalt von Personen dort. Da an der Bogenlücke keine Endschalter zur Sicherung montiert werden können, wurde auf jeder Seite eine Infrarot-Reflexlichtschranke eingebaut, die die Bewegung des Bogens stoppt, sobald sich ein Gegenstand innerhalb dieser Lichtschranke befindet. Für Messungen, bei denen das Meßobjekt oder der Probenhalter in die Bogenlücke eintreten darf, nachdem der Sensorwagen diese verlassen hat, können die Lichtschranken mit einem Schalter außer Funktion gesetzt werden.

### 6.2.7 Koordinatensysteme

Das Goniophotometer arbeitet mit zwei unterschiedlichen Koordinatensystemen, bei denen  $\varphi$  jeweils die Position des Bogens und  $\vartheta$  die Position des Sensorwagens angibt.

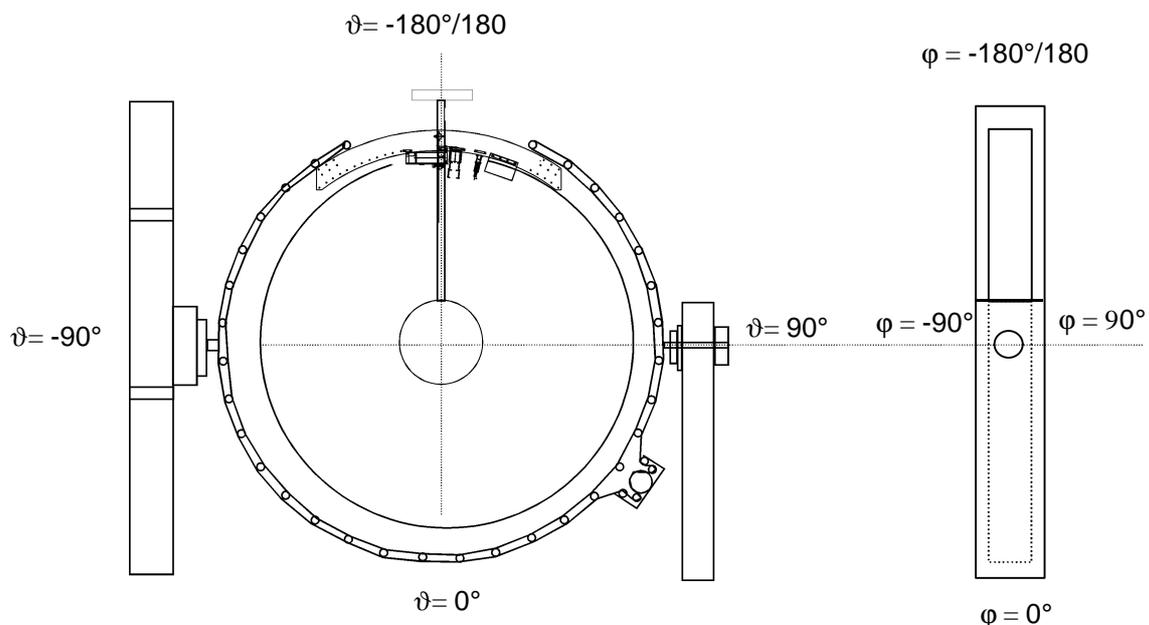


Bild 25: Festlegung des Koordinatensystems des Goniometers



### 6.3 Justage

#### 6.3.1 *Justage des Schienensystems*

Die Erstjustage erfolgte mittels eines Lasers, der am Anfang des Schienensystems aufgebaut war und dessen Laserstrahl die Mitte des Goniophotometer traf. Dieser Punkt entspricht exakt dem Mittelpunkt des Drehradius, in dem sich ein Probenhalter mit einer Markierung befand. Beim Schieben des Probenhalters in Richtung Laser wurde das Schienensystem dann so justiert, daß der Laserstrahl immer diesen Markierungspunkt traf. Die Abweichungen außerhalb des Drehradius des Goniophotometers betragen maximal  $\pm 10$  mm, was bezogen auf die Gesamtlänge von 30 m eine relative Abweichung von 0,03 % bedeutet. Innerhalb des Drehradius wurden diese Arbeiten sehr genau durchgeführt, da hier die Justage der Prüfobjekte stattfindet, von denen die lichttechnischen Daten ermittelt werden sollen. Die maximale Abweichung vom Zentrum des Goniophotometers betrug  $\pm 2$  mm. Die Meßunsicherheit beträgt dabei  $\pm 1$  mm. Zusätzlich wurde dieser Teil des Schienensystems schwarz lackiert, um Streulichteinflüsse zu reduzieren.

#### 6.3.2 *Justage des Photometers*

Das Justieren des Photometers ist aufwendig. Auch die Anforderungen an die Genauigkeiten sind höher als beim Schienensystem. Die beiden Ständer, die den Bogen halten, stehen auf zwei Stahlplatten und sind mittels Stellschrauben in der Höhe justierbar. Mit Hilfe einer Wasserwaage wurde die Höhe der Ständer solange korrigiert, bis die Drehachse waagrecht lag. Die korrekte Stellung des Bogens kann ebenfalls mittels einer Wasserwaage in senkrechter und waagerechter Position überprüft werden. Eine Korrektur ist durch Anfahren in senkrechter Stellung und anschließendem Nullsetzen der Anzeige möglich. Bei der Überprüfung mittels einer Präzisionswasserwaage wurden Abweichungen von weniger als 0,5 mm/m festgestellt, so daß eine Meßunsicherheit von maximal  $0,05^\circ$  gewährleistet ist.

Die Position des Wagens wurde zunächst durch einen Laser, der an einem Probenhalter des Schienensystems montiert war und gemäß Bild 27 aus 5 m Entfernung in das Drehzentrum strahlte (Laser 1), und dem Justagelaser (Laser 2)

überprüft. Dabei wurde der Laser 1 auf ein  $90^\circ$  Prisma gerichtet und mußte nach der Reflexion am Prisma sowohl die Drehachse treffen, in der sich Laser 2 befand, als auch durch Oberflächenreflexion in sich selbst zurückgerichtet werden. Das Prisma befand sich zu diesem Zweck auf einem Verschiebetisch, bei dem die beiden horizontalen Achsen geneigt werden konnten, was ein sehr genaues Ausrichten des Prismas ermöglichte. Dasselbe wurde nun mit Laser 2 durchgeführt, so daß der Laserstrahl nach Reflexion am Prisma genau Laser 1 treffen mußte und wieder zu seinem Ausgangspunkt reflektiert wurde.

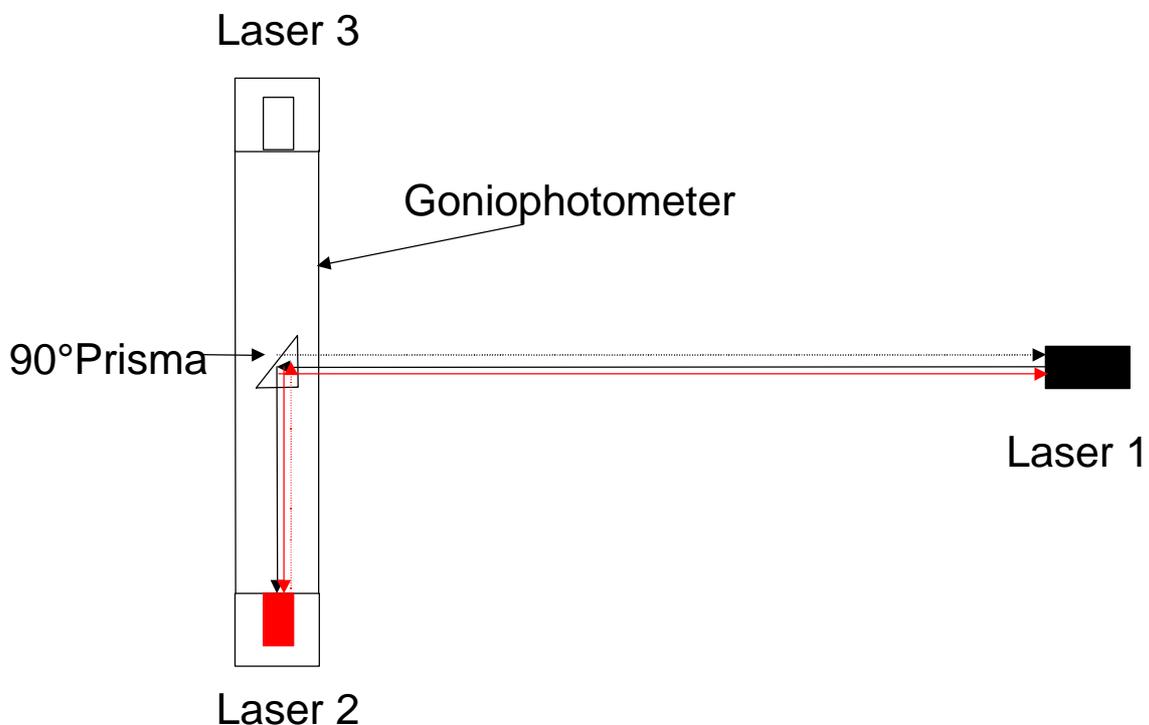


Bild 27: Anordnung bei Laserjustage

Nachdem der Ständer mit Laser 2 genau senkrecht ausgerichtet war, wurde das Prisma gedreht und der Vorgang für den zweiten Ständer wiederholt. Dazu wurde genau in der Drehachse, gegenüber dem Kabeleintritt, ein dritter Laser montiert und auf das Drehzentrum auf der gegenüberliegenden Seite ausgerichtet. Mit dieser Ausrichtung konnte gewährleistet werden, daß die Lichtrohre, die am Schienensystem bewegt werden, rechtwinklig zum Drehbogen stehen. Mit dem fest eingebauten Laser 3 konnte in jeder Stellung des Bogen immer korrekt die

waagerechte Achse angezeigt werden. Zusammen mit dem verfahrbaren Justagelaser auf dem Sensorwagen war eine Kontrolle der Windschiefe der Achsen möglich, wenn sich der Justagelaser auf dem Sensorwagen in  $0^\circ$  Stellung befand und der Bogen in verschiedene Stellungen gefahren wurde. Es konnte dabei eine maximale Abweichung von 5 mm vom Schnittpunkt der Laserstrahlen festgestellt werden.

Nach Fahrt des Sensorwagens um  $180^\circ$  mußte der Laserstrahl in der Drehachse den Justagelaser auf dem Sensorwagen treffen und umgekehrt. Hier zeigten sich Anfangs Abweichungen von der idealen Position aufgrund von Dehnungseffekten des Zahnriemens. Diese konnten durch eine Änderung der Schrittweite des Motorantriebes korrigiert werden und traten nach ca. 3 Monaten Meßbetrieb nicht mehr auf. Weiterhin ist mit dem fest eingebauten Laser eine Abstandskontrolle der Meß- und Justiereinrichtungen auf dem Sensorwagen möglich. Dabei beträgt der Abstand Kamera-Photoelement  $5^\circ$  und der Abstand Kamera-Justagelaser  $12,3^\circ$ .

#### **6.4 Kalibrierung**

Das Goniophotometer ist mit zwei voneinander unabhängigen und von der Funktion her sehr verschiedenen Lichtsensoren ausgerüstet. Die Lichtstrommessung und die Lichtstärkemessung für kleine Lichtquellen mit einem Durchmesser  $< 15\text{cm}$  beruhen auf einer Beleuchtungsstärkemessung (Kapitel 5). Die Meßunsicherheit hängt daher von der Qualität des verwendeten Photometerkopfes ab. Verwendet wird ein thermisch stabilisierter Photometerkopf der Firma PRC Krochman, der einen  $f_1$ -Kennwert für die relative spektrale Empfindlichkeit von 1,41 % aufweist. Der Kennwert  $f_2$  der richtungsabhängigen Bewertung beträgt 0,42 % /48/. Damit erfüllt der Photometerkopf die Anforderungen an die höchste Klasse (L) für Beleuchtungsstärkemessgeräte. Insbesondere die geringe  $f_1$ -Kennzahl ist in diesem Zusammenhang wichtig, da die CCD Kamera keinen eigenen  $V(\lambda)$  angepaßten Filter besitzt und zur Absolutwertanbindung auf die Meßwerte des Photoelements zurückgreift.

### 6.4.1 Lichtstromkalibrierung

Die Kalibrierung des Lichtstromes wurde mittels einer Lichtstrom-Normallampe durchgeführt. Hierbei handelt es sich um eine Glühlampe der Marke Radium mit 24 V Nennspannung und 100 W Leistung (Tabelle 1).

Tabelle 1: Technische Daten der Normallampe

Nennspannung	Nennleistung	Lampestrom	Lampenspannung	Lichtstrom
24 V	100 W	4,10 A	22,08 V	1447 lm

Die Lampe wurde im Zentrum der Meßeinrichtung angebracht und mit den Lasern exakt ausgerichtet (Bild 28), wobei sich der verwendete Probenhalter mindestens  $15^\circ$  von der senkrechten Stellung des Goniophotometers entfernt befinden muß (Kapitel 6.5.5).

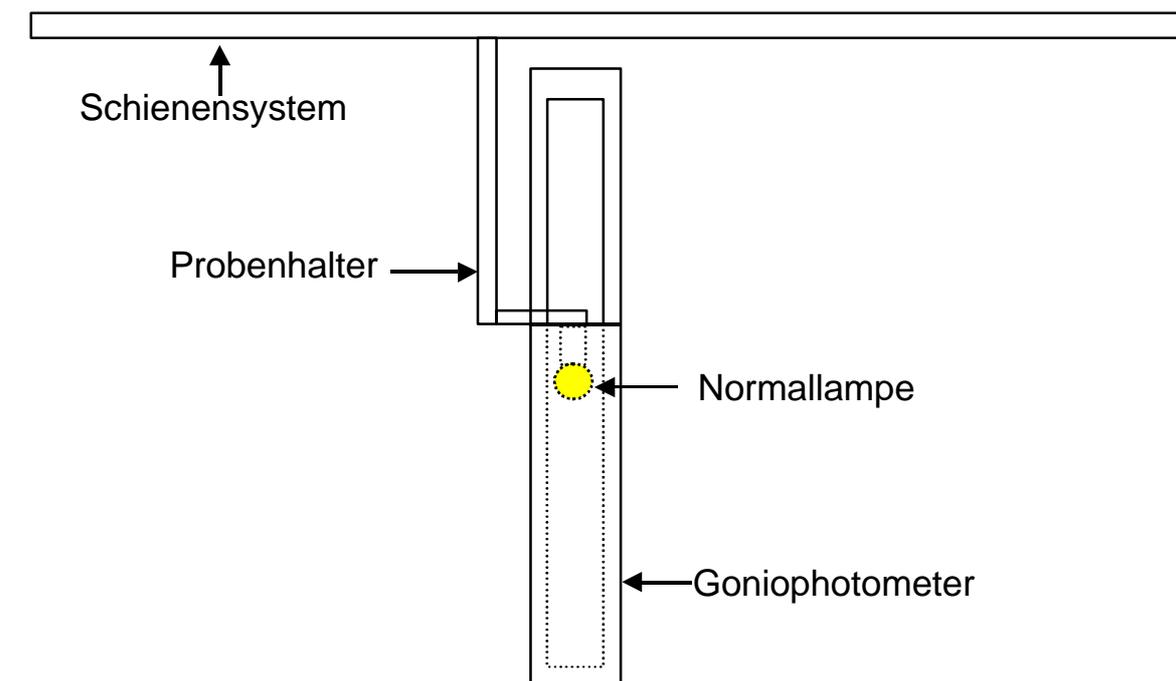


Bild 28: Montage der Normallampe zur Lichtstromkalibrierung

Für die Messung wurde die Lampe in einer Meßfassung montiert. Die Lampenspannung wurde direkt an der Meßfassung gemessen, während der Strom über den Spannungsabfall an 0,1 Ohm Normalwiderstand ermittelt wurde. In einem Winkelabstand von 15 Grad wurden mit dem Photometer

Beleuchtungsstärkewerte aufgenommen und daraus der Lichtstrom berechnet. Die Abweichung des Lichtstromes vom erwarteten Sollwert des Kalibrierscheins betrug 2,3 Prozent. Dieser Wert ließ sich jedoch verringern, indem man den Bereich der Kugeloberfläche berücksichtigte, der konstruktionsbedingt durch die Halterung verdeckt wird und aufgrund der Verfahrensgrenzen (Kapitel 6.5.5) vom Photometerkopf nicht erfaßt werden konnte. Dazu wurde die Lampe um 180 Grad um ihre vertikalen Achse gedreht und die Messung wiederholt. Die so ermittelten Werte für den Bereich der Abschattung wurden bei der ersten Messung berücksichtigt und der Lichtstrom erneut berechnet. Mit dieser Methode war es möglich, die relative Abweichung des Meßwertes vom Sollwert auf 1,5 Prozent zu verringern (Tabelle 2).

Tabelle 2: Ergebnisse der Lichtstromkalibrierung

	$\Phi_n$ [lm]	$\Phi_{mes}$ [lm]	$\Delta_\Phi$ [lm]	Relative Abweichung [%]
Messung ohne Korrektur	1447	1415	32	2,3
Messung mit Korrektur	1447	1469	22	1,5

#### 6.4.2 Lichtstärkekalibrierung

Für große Lichtquellen wird die Lichtstärke mittels der CCD Kamera bildauflösend ermittelt. Eine Kalibrierung im herkömmlichen Sinn mit einer Normlampe ist nicht möglich, da das Meßverfahren für kleine Lichtquellen systembedingt ungeeignet ist. Eine Kalibrierung der Kamera ist nur durch den Hersteller möglich. Als Kennzahlen werden angegeben:

räumliche Bewertung	$f_2(g)$	<1 %
Einfluß der Umfeldleuchtdichte	$f_2(u)$	<3 %
Nichtlinearität	$f_3$	<0,5 %
Abweichung des Anzeigegerätes	$f_4$	<0.2 %
Ermüdung	$f_5$	<0,1 %
moduliertes Licht	$f_7$	<0,1 %

Polarisationseinfluß  $f_8 < 0,7 \%$

Die ermittelte Abweichung bezieht sich daher auf Vergleichsmessungen mit dem Drehspiegelgoniophotometer .

Dazu wurden verschiedene Leuchten in beiden Meßgeräten vermessen und die ermittelten Lichtstärkewerte verglichen. Dafür wurde eigens eine Leuchte aus einem 2 m langen Stück Hohllichtleiter angefertigt, in die eine konventionelle 26 mm Leuchtstofflampe installiert wurde. Diese Leuchte konnte aufgrund ihrer Abmessungen sowohl in dem Drehspiegelgoniophotometer als auch in dem neuen Goniophotometer vermessen werden. Zu diesem Zweck wurden die Enden mit schwarzer Pappe verdunkelt, so daß die leuchtende Fläche 1 m Länge aufwies, und damit vom Kameraobjektiv komplett erfaßt werden konnte (Bild 29).

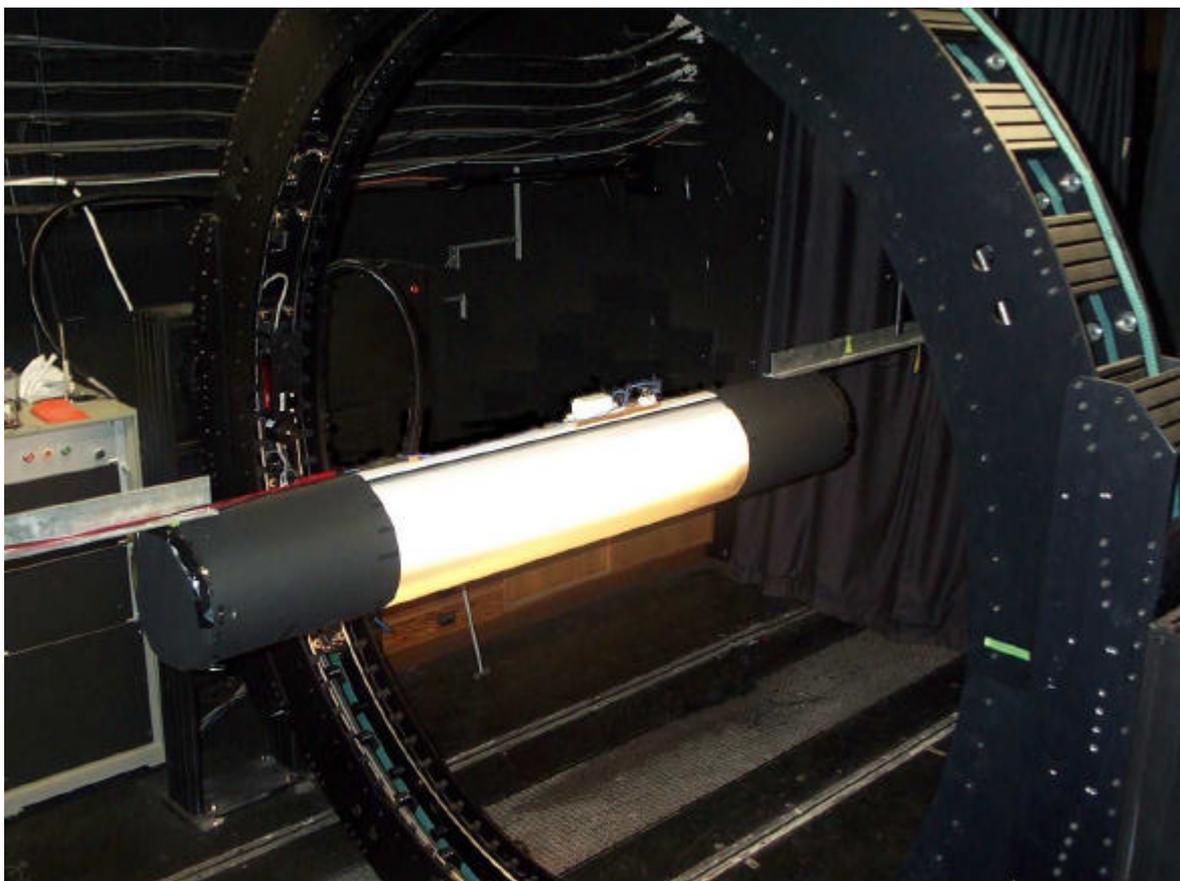


Bild 29: Hohllichtleiter zur Vergleichsmessung

Die Lichtstärkeverteilungskurven für die beiden Meßverfahren sieht man in Bild 30 und Bild 31.

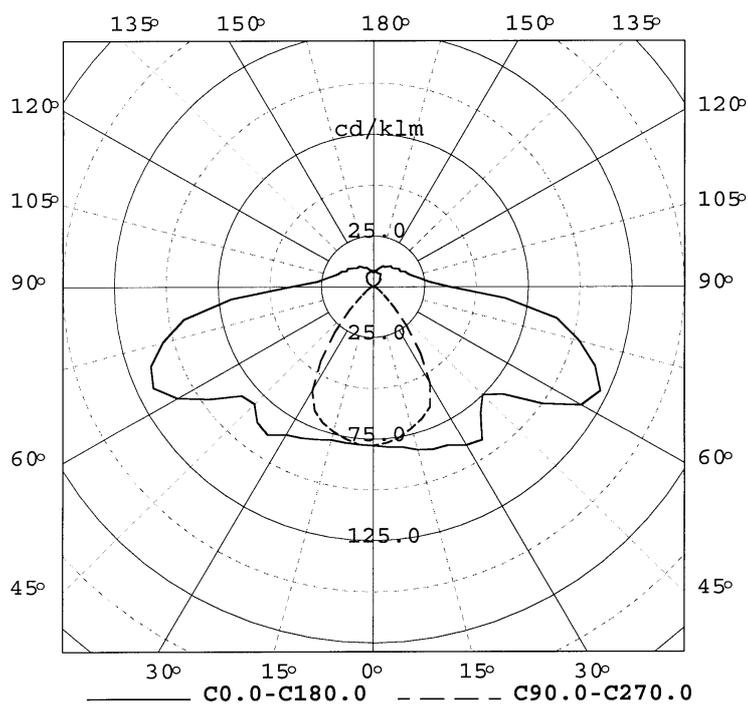


Bild 30: Lichtstärkeverteilung gemessen mit Drehspiegelgoniophotometer

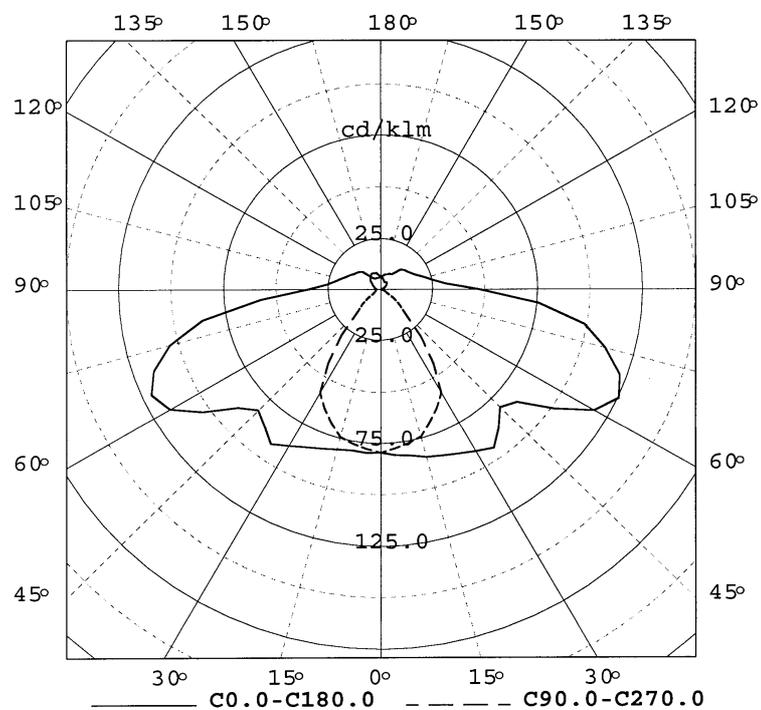


Bild 31: Lichtstärkeverteilung gemessen mit CCD Kameragoniophotometer

Hierbei ist eine sehr zufriedenstellende Übereinstimmung feststellbar. Aus den Zahlenwerten errechnet sich für die 0° Ausstrahlungsrichtung eine Abweichung des neuen Meßverfahren von 1,03 cd/klm, was einer relativen Abweichung von 1,3 % entspricht. Die minimale Abweichung wurde mit 0,1 cd/klm, die größte Abweichung mit 12,85 cd/klm gemessen, woraus sich eine relative Abweichung von 17 % ergibt. Die durchschnittliche Abweichung aller Meßwerte betrug 1,9 cd/klm. Betrachtet man nur den unteren Halbraum, in den über 80 % des Lichtstromes ausgestrahlt wird, beträgt die durchschnittliche Abweichung 2,1 cd/klm, was eine durchschnittliche relative Abweichung von 3,6 % bedeutet.

## **6.5 Meßablauf**

### **6.5.1 Initialisierung**

Vor Beginn einer Bewegung der drei Achsen müssen diese zunächst initialisiert werden. Mit der Steuerungssoftware ist nur die Initialisierung aller drei Achsen auf einmal möglich. Die Probenhalter und der Sensorwagen erhalten ihre Position durch das Anfahren von Referenzschaltern. Die Position des Bogens wird durch die mitgeführte Lochscheibe bestimmt (Kapitel 6.2.3). Wichtig ist die Kenntnis der Bewegungsrichtung während der Initialisierungsfahrt, da diese nicht immer bei den gewohnten Ruhelagen beginnen muß. Nach Betätigen eines Not-Aus Schalters oder nach einem Neustart des Steuerrechners kann die Initialisierungsfahrt an einer Stelle beginnen, von der eine Kollisionsgefahr ausgehen kann.

### **6.5.2 Handsteuerung**

Mit der Funk-Handsteuerung (Bild 32) können die Achsen einzeln initialisiert und verfahren werden. Der Steuerhebel funktioniert dabei als Inkrementgeber, mit dem zunächst die Wegstrecke gewählt wird, die zurückgelegt werden soll. Anschließend wird die Fahrtrichtung festgelegt. Diese Option erleichtert das Ausrichten der Meßobjekte. Neben der Achsenwahl und der Initialisierung kann man den Justagelaser des Sensorwagens schalten und die Not-Aus Funktion aktivieren. Im Display erscheint neben der aktuellen Position im Goniometer-Koordinatensystem der Photostrom des Photoelements und die daraus errechnete Beleuchtungsstärke. Damit ist ein einfaches Suchen der maximalen

Beleuchtungsstärke möglich, die den gewählten Meßbereich nicht überschreiten darf (Kapitel 6.5.7).



Bild 32: Funk-Handsteuerung

### 6.5.3 Notsteuerung

Ist nach Betätigen eines Not-Aus Schalters eine Situation entstanden, bei der eine Neuinitialisierung der Achse zu einer Kollision führen würde, besteht die Möglichkeit einer Notsteuerung. Dabei können mittels IEEE 488 Befehlen die Motoren direkt angesprochen werden. Die maximale Spannung beträgt dabei 10V, jedoch ist eine Spannung von 0,1 V-0,5 V in den meisten Fällen ausreichend. Die Drehrichtung ist dabei von der Wahl des Vorzeichens abhängig (Bild 33).

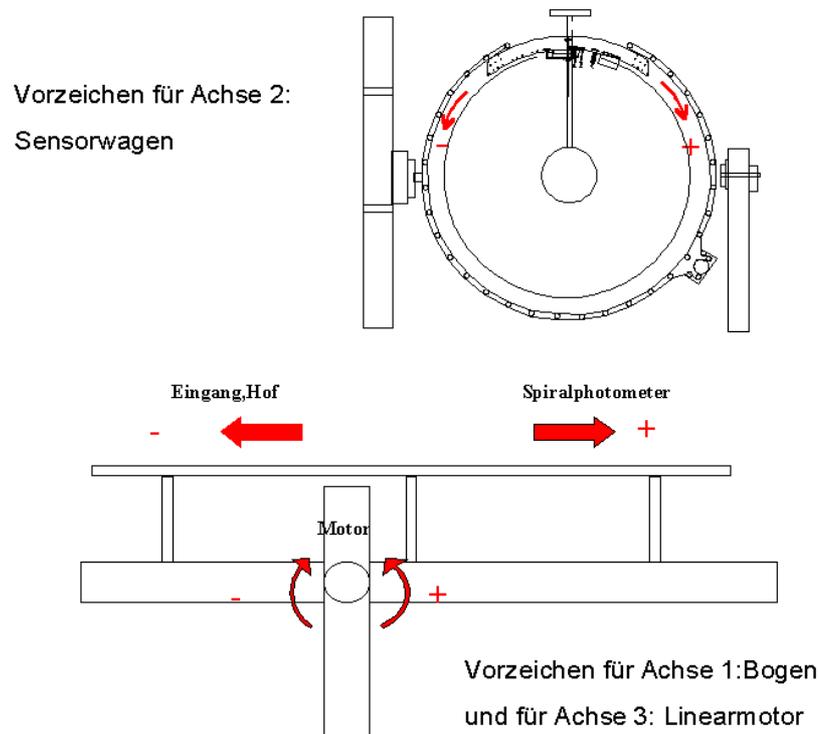


Bild 33: Drehrichtungen der drei Achsen bei Notsteuerung:

#### 6.5.4 Montage der Testobjekte

Die zu messenden Testobjekte sind in der Mitte des Goniophotometers zu montieren und auszurichten, was mittels der Justagelaser problemlos funktioniert. Wird ein Hohllichtleiter vermessen, ist die Gesamtlänge in einzelne Teilstücke zu unterteilen, von denen keines länger als ein Meter sein darf. Das interessierte Teilstück wird in die Mitte der Meßeinrichtung gefahren und die restlichen Teilstücke sind mit schwarzen Tüchern abzudunkeln. Da auch diese schwarzen Tücher einen Teil des Lichtes reflektieren, wurde zur Bestimmung dieses Reflektionsanteils eine Beleuchtungsstärkemessung direkt auf der Lichtrohroberfläche durchgeführt. Nach Entfernen der Tücher sank der gemessene Wert um 0,3%. Dieser erhöhte Lichtstrom wurde später bei der Aufarbeitung der Eulmdat Datei berücksichtigt und entsprechend korrigiert.

### 6.5.5 Festlegung der Verfahrensgrenzen

Bei der Messung von Testobjekten stößt entweder bei kleinen Lichtquellen der Probenhalter an einer Stelle oder bei großen Lichtquellen wie z.B. Hohllichtleitern das Testobjekt selbst an zwei Stellen durch die Kugeloberfläche, welche von der Meßeinrichtung abgefahren wird. Zur Vermeidung von Kollisionen können deshalb die Verfahrensgrenzen entsprechend gewählt werden. Hierzu ist die Eingabe des Durchmessers des Testobjektes, die zugehörige Justagetoleranzgrenze und die Angabe des Winkels  $\varphi$  (Bild 26), in welcher die gedachte Kugeloberfläche durchstoßen wird, notwendig (Tabelle 3).

Tabelle 3: Verfahrensgrenzen

	<b>Ausdehnung des Meßobjektes</b>	<b>Justagetoleranz</b>	<b>Winkel <math>\varphi</math></b>
<b>Keine Einschränkung</b>	-1000	0	0
<b>Einseitiges Meßobjekt</b>	$\varnothing$ in mm	Toleranz in mm	0-170
<b>Zweiseitiges Meßobjekt</b>	$\varnothing$ in mm	Toleranz in mm	-1

Bei einseitig in den Kugeloberfläche eindringenden Meßobjekten ist nur eine Montage im Winkelbereich von  $\varphi$  zwischen  $0^\circ$  und  $170^\circ$  möglich. Im Bereich  $170^\circ$  bis  $180^\circ$  darf kein Meßobjekt positioniert werden, da der Sensorwagen ausschließlich in senkrechter Stellung des Bogens verfahren werden kann und eine Montage in diesem Bereich zur Kollision führen würde. Eine Positionierung im Bereich von  $180^\circ$ - $360^\circ$  ist aus Sicherheitsgründen nicht zulässig, da der Bogen seine Initialisierungsfahrt in diese Richtung beginnt. Aufgrund der eingegebenen Daten werden Grenzwerte für  $\varphi$  und  $\vartheta$  vorgegeben, die bei Bedarf jedoch manuell geändert werden können.

### 6.5.6 Interpolation von nicht erfaßten Bereichen

Aufgrund der Größen von Sensorwagen und Bogen sowie der festgelegten Verfahrensgrenzen gibt es Winkelbereiche, in die Licht ausgestrahlt wird, die aber nicht erfaßt werden können. Beim Sensorwagen, der selbst schon ein Bogenstück von  $70^\circ$  darstellt, addiert sich noch die Breite des Meßobjektes, so daß bei Meßobjekten, die einseitig in den Kugeloberfläche hineinragen, ein Bereich von  $70^\circ < \vartheta < 95^\circ$  nicht gemessen werden kann. Die Grenze in  $\varphi$ -Richtung gibt die Breite des Bogens vor. Bei einem Radius von 1076 mm und einer Bogenbreite von 300 mm errechnet sich ein Winkel von  $25^\circ$ . Dieser Winkel vergrößert sich bei einem maximalen Durchmesser des Meßobjektes von 500 mm auf  $55^\circ$ . Der gesamte Bereich ist in Bild 34 gestreift dargestellt.

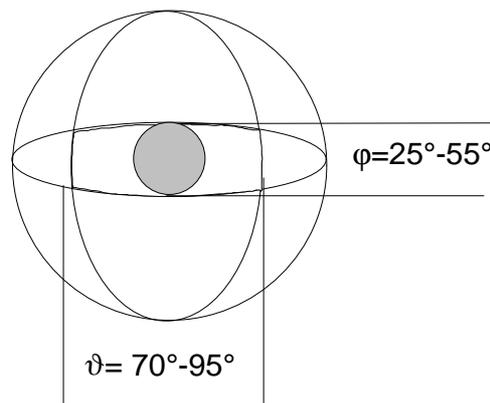


Bild 34: Nicht meßbarer Bereich bei einseitigem Meßobjekt

Durchstößt das Meßobjekt die Kugeloberfläche an zwei Seiten, wie dies bei einem Hohllichtleiter typischerweise der Fall ist, kann zwar in  $\vartheta$ -Richtung ein voller Kreis abgefahren werden, in  $\varphi$ -Richtung bleibt aber die Beschränkung durch den Bogen vorhanden.

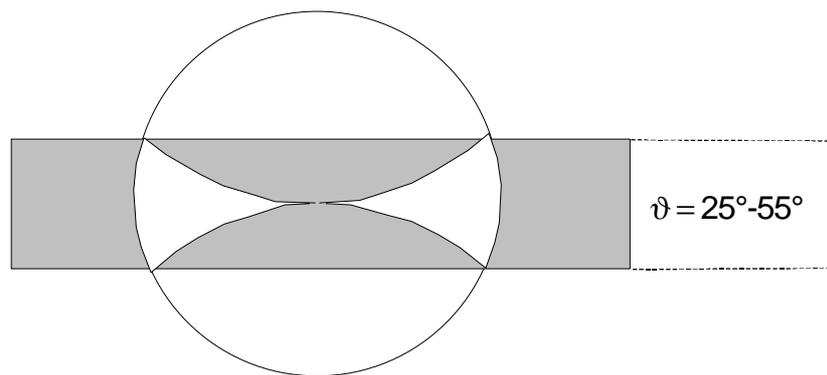


Bild 35: Nicht meßbarer Bereich bei zweiseitigem Meßobjekt

Dieser Bereich ist aber deutlich größer, da er sich beinahe entlang des gesamten Kugelumfangs erstreckt und deshalb nicht vernachlässigt werden kann. Dieser Bereich ist in Bild 35 gestreift dargestellt. Die Auswirkungen dieser fehlenden Bereiche können meßtechnisch ermittelt werden, indem Vergleichsmessungen an einem Endstück eines Hohllichtleiters durchgeführt werden. Dieser kann als einseitiges Meßobjekt vermessen werden, und nach entsprechender Festlegung der Verfahrensgrenzen, auch als zweiseitiges Meßobjekt.

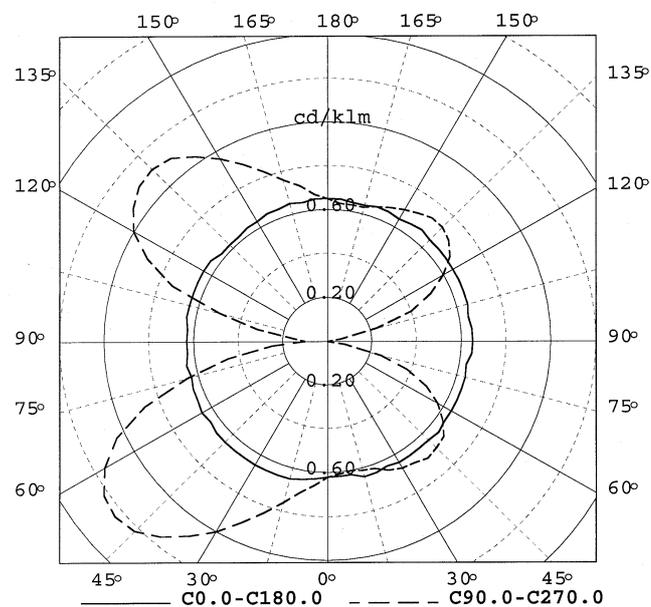


Bild 36: Lichtstärkeverteilungskurven für einen Hohllichtleiter als einseitiges Meßobjekt

Bild 36 zeigt die Lichtstärkeverteilungskurven für einen Spaltlichtleiter als einseitiges Meßobjekt, aus dessen Inneren der Reflektor entfernt wurde, und der somit nur noch aus einem opalen Polycarbonatrohr bestand. In der C90-C270 Ebene ist eine deutliche Vorwärtscharakteristik zu erkennen, die ihre Ursache in der Ausstrahlungsrichtung des Scheinwerfers hat. In der C0-C180 Ebene sieht man dagegen eine rotationssymmetrische Lichtverteilung. Führt man dieselbe Messung des Teilstücks nochmals durch, nur jetzt als zweiseitiges Meßobjekt, findet man die C90-C270 Ebene nahezu unverändert vor, während die C0-C180 Ebene durch die fehlenden Meßwerte im Bereich zwischen 75° und 105° einen deutlichen Einschnitt aufweist (Bild 37).

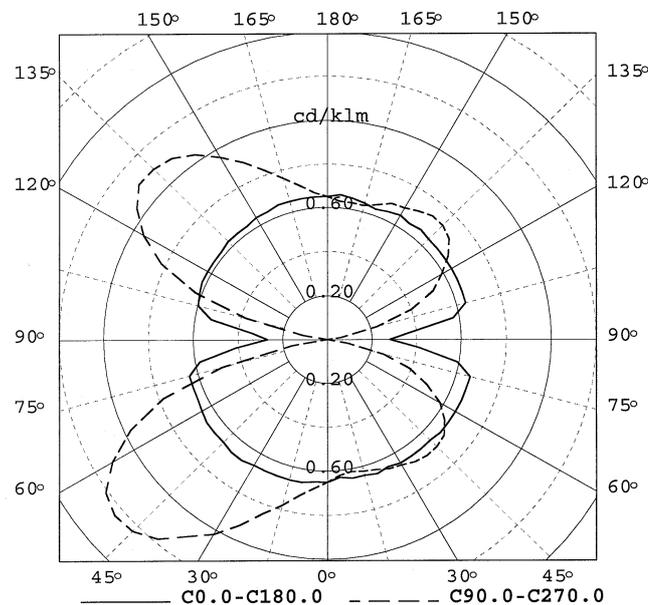


Bild 37: Lichtstärkeverteilungskurven für einen Hohllichtleiter als zweiseitiges Meßobjekt

Diese Ergebnisse waren durch die Bereichsdarstellung in Bild 35 erwartet worden und führen beim Lichtstrom des vermessenen Endstücks zu relativen Meßfehlern von 12 %. Bei den meisten vermessenen Hohllichtleitern, die ihr Licht größtenteils nach unten ausstrahlen, reduzierte sich diese Meßfehler zwar auf 3 % - 8 %, konnte aber dennoch nicht vernachlässigt werden. Die Lichtstärkewerte in diesem Bereich wurden deshalb durch Interpolation gewonnen, wobei die

Interpolationsgrenzen durch einen Vergleich der Tabellenwerte beider Messungen erzielt wurde. Für einen kubischen Interpolationsalgorithmus wurden die geringsten Abweichungen von den erwarteten Werten erreicht, die weniger als 1 % betragen. Abschließend wurde der Lichtstrom aus der interpolierten Lichtstärkeverteilung neu berechnet. In Bild 38 kann man die gute Übereinstimmung der interpolierten Werte mit den gemessenen Werten in Bild 36 sehen.

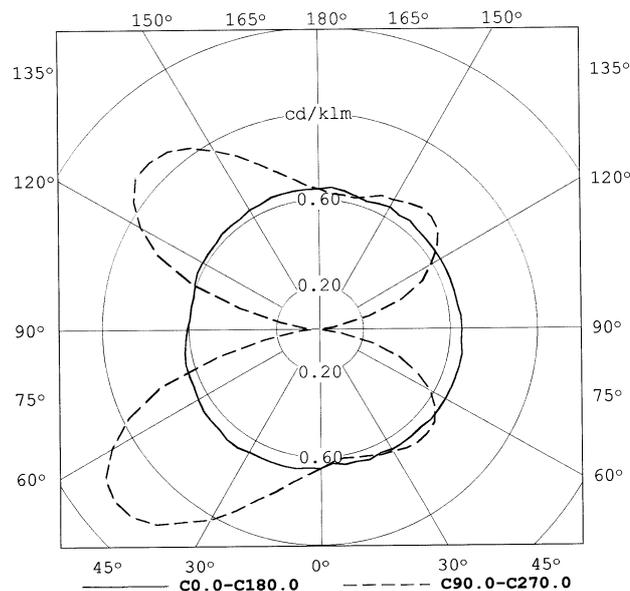


Bild 38: Lichtstärkeverteilungskurven für einen Hohllichtleiter nach Interpolation

### 6.5.7 Festlegung der Meßbereiche

Das Photoelement verfügt über keine automatische Meßbereichsumschaltung. Daher muß der Meßbereich vor der Messung manuell gewählt und sichergestellt werden, daß dieser Bereich während der Messung nicht überschritten wird, da sonst falsche Meßdaten aufgezeichnet werden.

Aufgrund des beschränkten Dynamikumfangs der CCD Kamera ist eine Anpassung der Kamera an die maximal auftretenden Leuchtdichten notwendig. Hierzu muß die Position angefahren werden, bei der die maximale Leuchtdichte gemessen werden kann. Das Kamerabild ist dann durch die Auswahl geeigneter Graufilter so anzupassen, daß keine Pixel übersteuert werden. Die

Maximumsuche kann über die Software erfolgen, wobei die C-Ebene, in der gesucht werden soll, zu wählen ist. Oft genügt jedoch eine Maximumsuche mittels der Funk-Handsteuerung in dem betreffenden Bereich. Dabei kann der Beleuchtungsstärkewert direkt im Display der Handsteuerung abgelesen werden. Eine Einschätzung der Leuchtdichtewerte kann bei Betrachtung des Live Bildes der Kamera gemacht werden, wobei übersteuerte Bereiche rot gekennzeichnet werden und unbedingt zu vermeiden sind. Zu beachten ist, daß Maximalwerte der Beleuchtungsstärke und der Leuchtdichte an unterschiedlichen Positionen auftreten können.

### **6.5.8 Dateiformat**

Die gewonnenen Meßergebnisse sollten ohne Probleme in bereits bestehende Lichtplanungsprogramme eingebunden werden können. Für den deutschsprachigen Raum ist das Eulumdat-Format am weitesten verbreitet /64/. Dieses Dateiformat ist für die Berechnung von Räumen mit hohlen Lichtleitern aber nur mit einigen Kompromissen anwendbar.

- Leuchten werden entweder als Quader oder als stehende Zylinder dargestellt, bei denen der Lichtaustritt jeweils nach unten gerichtet ist. Hohllichtleiter sind aber liegende Zylinder mit einem Lichtaustritt nach unten. Da die Geometrie der Leuchte auf die Berechnung der Beleuchtungsstärken keinen Einfluß hat, wurden die Meßobjekte als Quader definiert, deren Höhe dem Durchmesser des Hohllichtleiters entsprach. Ist mit der Berechnung gleichzeitig eine Visualisierung verbunden, besteht die Möglichkeit, den Hohllichtleiter als stehenden Zylinder zu definieren und ihn anschließend im Berechnungsprogramm zu drehen. Dabei wird aber gleichzeitig auch die zugehörige Lichtstärkeverteilung gedreht, die folglich unabhängig von der Leuchte in ihre ursprüngliche Richtung zurückgedreht werden muß. Damit sind gewöhnliche Beleuchtungsplanungsprogramme oft überfordert, so daß dies nur durch direktes Editieren der Leuchtendatei oder mit zusätzlichen Softwareprogrammen möglich ist.
- Durch die Angabe der elektrischen Leistung der verwendeten Leuchte in der Eulumdat-Datei kann das Planungsprogramm die spezifische Leistung in  $W/m^2$  ausrechnen. Für den Planer ist dies eine wichtige Größe zur Beurteilung der

Wirtschaftlichkeit der Beleuchtungsanlage. Zur korrekten Berechnung muß deshalb die elektrische Leistung durch die Anzahl der Teilmessungen dividiert werden.

- Der Betriebswirkungsgrad  $\eta_{LB}$  einer Leuchte ist definiert als das Verhältnis des aus der Leuchte austretenden Lichtstromes zum Lichtstrom der eingesetzten Lampe. Für Hohllichtleiter ist aber der Wirkungsgrad  $\eta_{Pipe}$  interessant, der definiert ist als das Verhältnis des aus dem gesamten Hohllichtleiter austretenden Lichtstromes zum Lichtstrom, der aus dem eingesetzten Projektor austritt. Für die jeweiligen Teilstücke, die vermessen werden, gilt dies anteilig. Problematisch ist aber, daß der Lichtstrom, der in das jeweilige Teilstück eintritt, nur für das erste Element bekannt ist. Die Möglichkeit, den Lichtstrom des Projektors durch die Anzahl der Teilstücke zu dividieren, wurde verworfen, da aufgrund der ungleichmäßigen Lichtstromverteilung entlang des Hohllichtleiters (Kapitel 7) am Anfang desselben Teilwirkungsgrade von mehr als 100% aufgetreten wären. Deshalb wurde der Lichtstrom des Projektors als der eintretende Lichtstrom für jede Teilmessung angenommen, und der jeweilige Teilwirkungsgrad gebildet aus dem Verhältnis von Lichtstrom des Teilstückes zu dem Lichtstrom des Projektors. Der Gesamtwirkungsgrad berechnet sich dann durch einfache Addition der Teilwirkungsgrade. Zu beachten ist, daß einige Planungsprogramme den gesamten eingesetzten Lichtstrom angeben, und daß dieser Wert um einen Faktor zu groß ist, der der Anzahl der Teilmessungen entspricht.

## 7 Messergebnisse

Im Verlauf des ARTHELIO Projektes wurden eine Vielzahl unterschiedlicher Hohllichtleitersysteme vermessen. Folgende Parameter wurden variiert: Aufbau (Spaltlichtleiter oder Prismenlichtleiter), Länge (4 m - 20 m), Durchmesser (10 cm - 30 cm) und Lichtaustrittsfenster (90 ° - 180 °). Außerdem wurden unterschiedliche Lichteinspeisungen eingesetzt und der Einfluß des Rohrendes (Endspiegel, zweite Einspeisung) untersucht. Die auffälligsten Meßergebnisse werden im folgenden dargestellt.

### 7.1 Lichtstärkeverteilungen

Die Lichtstärkeverteilung (LVK) der gemessenen Teilstücke kann sehr unterschiedlich sein. Es finden sich sowohl breitstrahlende LVK's, die den Batwing-Verteilungen von Spiegelrasterleuchten ähneln, als auch tiefstrahlende LVK's wie man sie typischerweise bei Downlights vorfindet. Hierbei ist zunächst die Größe des Lichtaustrittsfensters bestimmend, das den maximalen Ausstrahlungswinkel vorgibt. Aber auch die Extraktorbreite der Prismenlichtleiter haben einen Einfluß auf die Lichtstärkeverteilung. So konnte bei Hohllichtleitern mit einem Durchmesser von 25 cm und einem Lichtaustrittsfenster von 180 ° eine deutliche Änderung der Ausstrahlungscharakteristik festgestellt werden, von breitstrahlend am Anfang des Hohllichtleiters zu tiefstrahlend an dessen Ende (Bild 39).

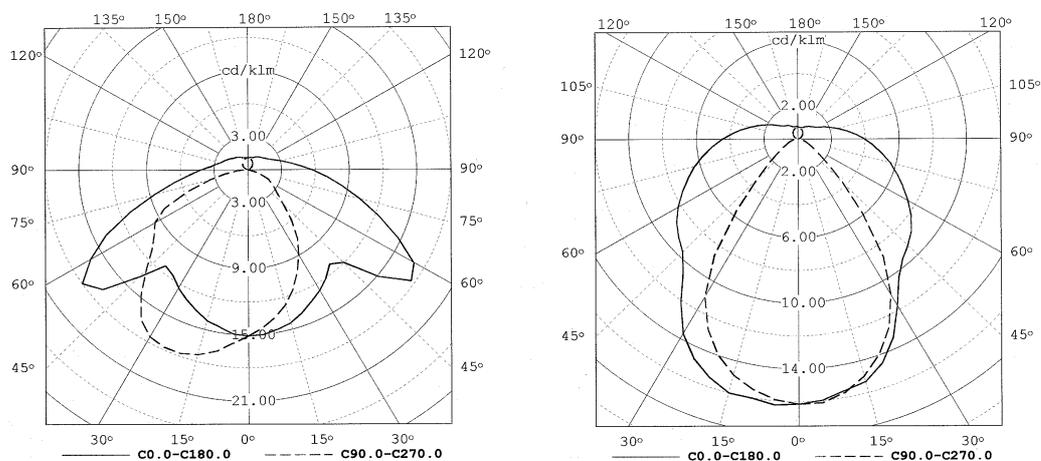


Bild 39: Beispiele für extrem sich ändernde LVK's an Hohllichtleitern

Eine solche Tendenz konnte, wenn auch in abgeschwächter Form, für alle gemessenen Hohllichtleitersysteme festgestellt werden. Ebenso haben alle untersuchten Systeme eine klare Vorwärtscharakteristik, hervorgerufen durch die Lichteinspeisung. Diese Charakteristik schwächt sich mit zunehmender Länge ab, ist ab ca.  $2/3$  der Lichtrohrlänge nicht mehr vorhanden und kann sich in der Nähe des Endspiegels umkehren. Durch diese Änderung in der Lichtstärkeverteilung machen auch Messungen der Beleuchtungsstärke direkt unter dem Hohllichtleiter keinen Sinn, mit denen in der Literatur teilweise versucht wird, Aussagen über den Lichtstrom, den Wirkungsgrad und die Gleichmäßigkeit dieser Systeme zu machen.

Die gemessenen Lichtstärkeverteilungen wurden für die Beleuchtungsstärkeberechnungen mit Lichtplanungsprogrammen eingesetzt und mit gemessenen Beleuchtungsstärkewerten in Testräumen verglichen [32],[38]. Dabei wurden nur geringe Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Werten von 5 % - 10 % im zentralen Bereich des Raumes festgestellt, was ein weiteres Zeichen für die geringe Meßunsicherheit der Meßwerte ist.

## **7.2 Lichtstrom**

Von besonderem Interesse ist bei Hohllichtleitersystemen die Verteilung des Lichtstromes über die Strahlerlänge. Hierbei wird ein möglichst gleichmäßiges Auskoppeln des Lichtstromes angestrebt, wie dies bei konventionellen Lichtbändern der Fall ist. Daher wurden zunächst Untersuchungen an prismatischen Hohllichtleitern mit 25 cm Durchmesser und einseitiger Lichteinspeisung durchgeführt. Es wurden Längen zwischen 4 m und 20 m vermessen, die aus 12 verschiedenen 2 m langen Modulen zusammengesetzt werden konnten.

Tabelle 4: Zusammensetzung der modularen Hohllichtleiter

Länge	Modulnummer											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4m											X	X
6m										X	X	X
8m									X	X	X	X
10m							X	X	X	X	X	
12m						X	X	X	X	X	X	
16m			X	X	X	X	X	X	X	X		
20m	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		

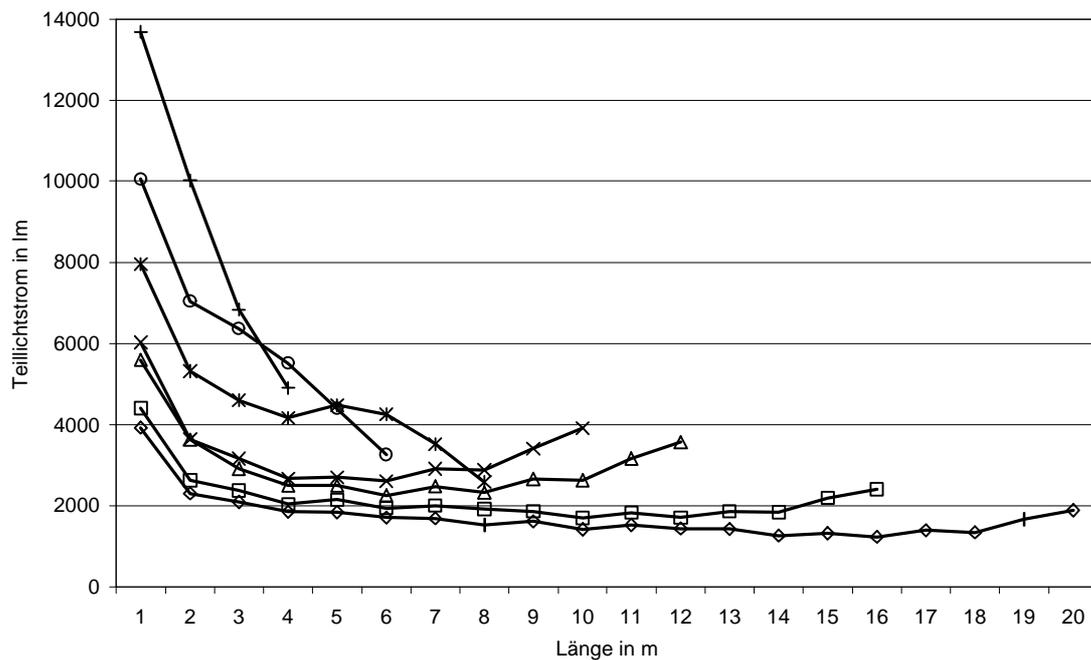


Bild 40: Ausgekoppelter Teillichtstrom in Abhängigkeit der Länge für modulare Hohllichtleiter

In Bild 40 sieht man bei allen untersuchten Typen einen erhöhten Lichtstrom am Anfang des Rohres. Ursache hierfür ist Strahlung der Lichtquelle außerhalb des Akzeptanzwinkels der Prismenfolie, die unabhängig vom Extraktor den

Hohllichtleiter verläßt. Der extreme Unterschied mit bis zu 3600 lm zwischen den ersten beiden Teillichtströmen der Lichtrohre mit den Längen 4 m, 6 m und 8 m bedeutet eine Differenz von 27 % und hat seine Ursache auch in dem modularen Aufbau des Systems. Eine exakte Anpassung der Extraktorfläche an die Lichtrohrlänge führt zu wesentlich besseren Ergebnissen, wie die Ergebnisse für ein Rohrsystem mit 10 cm Durchmesser und mit einem Lichtaustrittsfenster von 180° zeigen (Bild 41). Hier beträgt der Unterschied der ersten beiden Teilstücke nur 8 % bei 6 m Länge und einseitiger Einspeisung. Auch das 12 m lange Lichtrohr mit zweiseitiger Einspeisung erreicht eine gute Gleichmäßigkeit, was zu erwarten war, da es sich um zwei Rohre mit 6 m Länge handelt, die verbunden wurden. Problematisch ist bei dieser Meßreihe das 6 m lange Rohr mit bidirektionaler Einspeisung sowie das 18 m lange Lichtrohr, welches aus drei 6 m Stücken zusammengesetzt ist: Ein bidirektionales Rohr in der Mitte und zwei monodirektionale Rohre an den Enden. Hier wird deutlich, daß die beiden Endrohre zuviel Licht auskoppeln und im Mittelteil deshalb nicht mehr genügend Lichtstrom zur Verfügung steht.

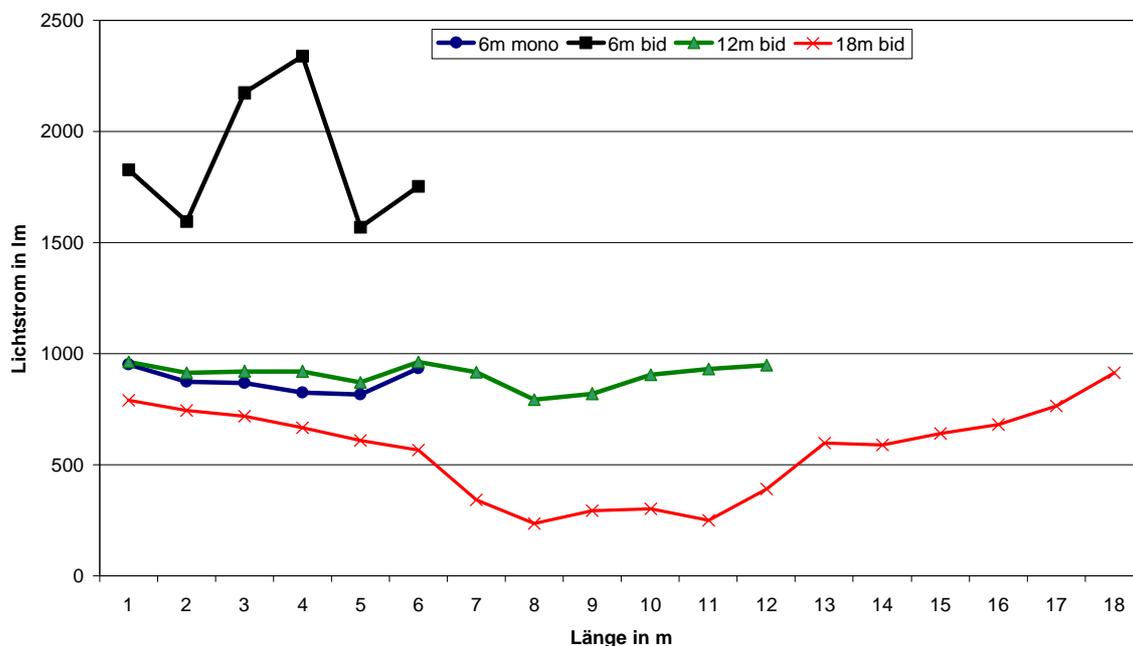


Bild 41: Ausgekoppelter Teillichtstrom unterschiedlicher Hohllichtleiter mit 10 cm Durchmesser

Dennoch wird mit dem modularen System ab ca. 10 m Länge eine akzeptable Gleichmäßigkeit erreicht. Die Werte für 14 m Länge und 18 m Länge wurden nicht gemessen, sondern können aus den vorliegenden Daten interpoliert werden. Für die Anwendung von Hohllichtleitersystemen ist diese Ungleichmäßigkeit kein gravierender Nachteil. Da es nur selten Räume gibt, die eine gleichmäßige Beleuchtung über ihre gesamte Fläche benötigen, ist vielmehr die Kenntnis dieser Lichtstromverteilung vorteilhaft, um bestimmte Raumzonen zu akzentuieren.

Bei monodirektionalen Systemen wird am Ende des Lichtrohres häufig ein Spiegel montiert, der Licht, welches ohne Reflexion direkt auf den Spiegel fällt, in Richtung Lichteinspeisung reflektiert, damit diese auf dem Weg dorthin ausgekoppelt werden kann. In Bild 42 sieht man, daß der Einfluß des Endspiegels auf die Lichtstromverteilung nur im hinteren Bereich des Hohllichtleiters bemerkbar ist und dort zur gewünschten Anhebung des ausgekoppelten Lichtstromes führt.

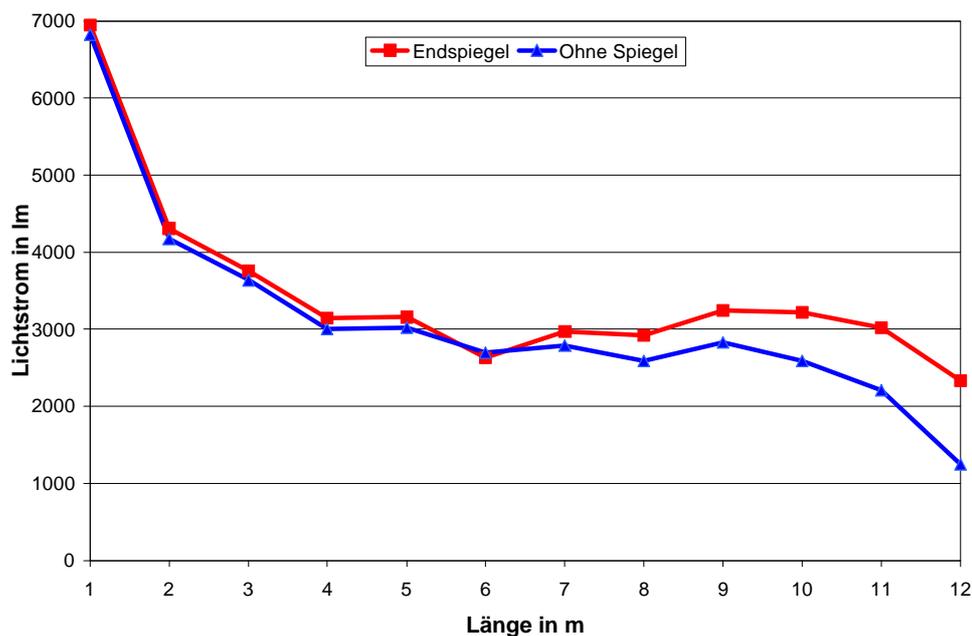


Bild 42: Einfluß des Endspiegels auf den ausgekoppelten Lichtstrom

Während der Endspiegel das hintere Ende des Hohllichtleiters beeinflusst, ist die Lichtstärkeverteilung des einspeisenden Strahlers für den Lichtaustritt am Anfang

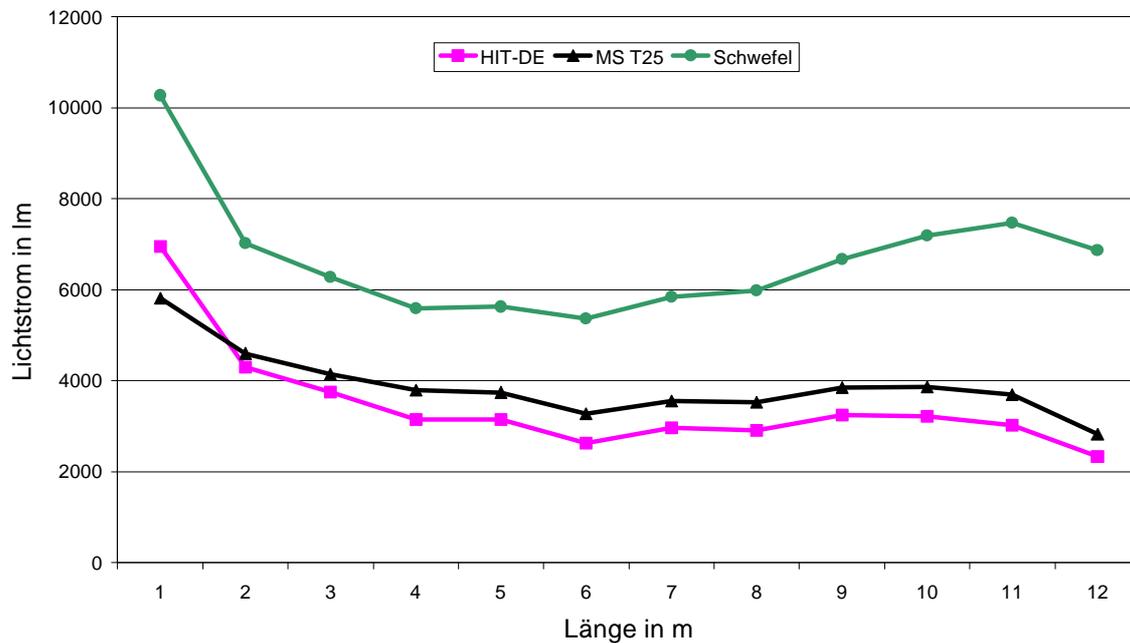


Bild 43: Ausgekoppelter Teillichtstrom für drei verschiedene Lichteinspeisungen

des Rohres bestimmend. In Bild 43 sieht man die Ergebnisse für einen 12 m langen prismatischen Hohllichtleiter von 25 cm Durchmesser, der mit drei verschiedenen Strahlern betrieben worden ist. Eine Schwefellampe mit 1400 W elektrischer Leistung und zwei Halogenmetallampfen mit je 1000 W elektrischer Leistung vom Typ HIT-DE und MS T25. Die beiden Halogenmetallampfen waren in unterschiedlichen Strahlertypen eingebaut. Es ist deutlich der höhere Lichtstrom in Segment 1 zu erkennen, der beim Strahler mit der HIT Lampe ausgekoppelt wird. Die Ursache hierfür liegt in der LVK des betreffenden Strahlers, die einen größeren Anteil von Licht enthält, der außerhalb des Akzeptanzwinkels der Folie liegt (Bild 44). Die Lichtstärkeverteilungskurve der Schwefellampe zeigt einen wesentlich kleineren Winkelbereich in den das Licht ausgestrahlt wird und der daher besser zum Akzeptanzwinkel der Prismenfolie paßt (Bild 45). Im weiteren verlaufen die Kurven parallel zur Kurve der Schwefellampe, die jedoch einen deutlich höheren Lichtstrom emittiert.

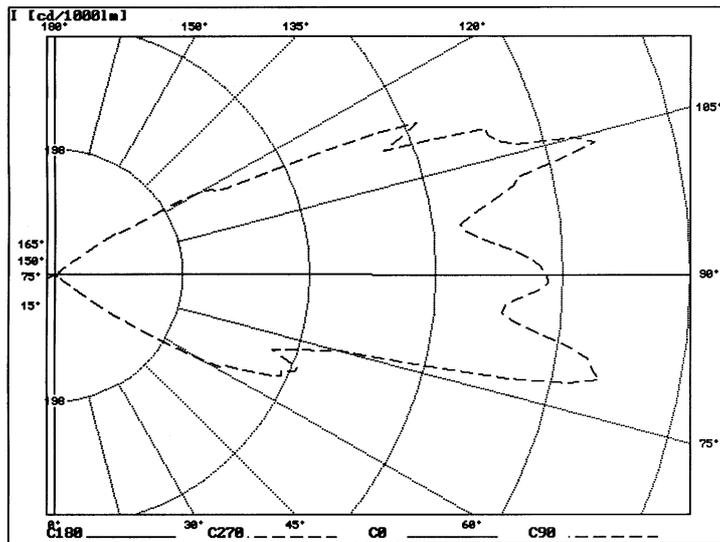


Bild 44: Lichtstärkeverteilungskurve für Strahler mit HIT-DE Lampe

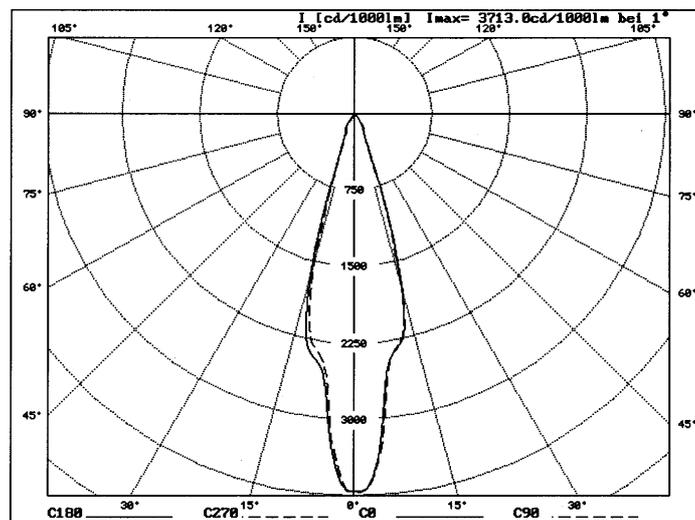


Bild 45: Lichtstärkeverteilungskurve für die Schwefellampe

### 7.3 Wirkungsgrade

Da die untersuchten Hohllichtleitersysteme mit verschiedenen Strahlern betrieben werden können, werden im wesentlichen nur Aussagen über den Wirkungsgrad des Lichtrohres  $\eta_{\text{pipe}}$  gemacht. Will man zu einer Aussage über den Gesamtwirkungsgrad eines solchen Systems kommen, muß der Lichtrohrwirkungsgrad mit dem Leuchtenbetriebswirkungsgrad des speisenden Strahlers multipliziert werden. Gerade bei der Schwefellampe ist dies jedoch nicht möglich, da der Hersteller einen Betrieb ohne den Reflektor verbietet /28/. Deshalb wird teilweise eine Darstellung in lm/W angegeben, die einen Vergleich mit herkömmlichen Beleuchtungsanlagen ermöglicht. Tabelle 5 zeigt die Wirkungsgrade der modular aufgebauten Hohllichtleiter. Zwischen den Systemen mit Lichtaustrittsfenstern von 90° und 180° sind nur geringe Unterschiede festzustellen, die meistens innerhalb der Meßunsicherheiten liegen. Bei beiden Typen ist eine Tendenz zu geringeren Wirkungsgraden bei größeren Systemlängen zu erkennen, die sich aus der größeren Anzahl der Reflexionen erklären. Eine Ausnahme bildet das 10 m lange System, welches im Vergleich zu dem 8 m System und dem 12 m System abfällt.

Tabelle 5: Meßwerte des Wirkungsgrades  $\eta_{\text{pipe}}$  für unterschiedliche prismatische Hohllichtleiter mit 25 cm Durchmesser und Lichtaustrittsfenstern von 90° und 180°

	4 m	6 m	8 m	10 m	12 m	16 m	20 m
90°	<b>80 %</b>	<b>83 %</b>	<b>83 %</b>	<b>77 %</b>	<b>82 %</b>	<b>79 %</b>	<b>78 %</b>
180°	<b>81 %</b>	<b>82 %</b>	<b>81 %</b>	<b>78 %</b>	<b>80 %</b>	<b>75 %</b>	<b>75 %</b>

Messungen an Hohllichtleitern mit 10 cm Durchmesser zeigen einen deutlichen Unterschied bei verschiedenen Lichtaustrittsfenstern. In Tabelle 6 sind die Ergebnisse für ein 6 m langes System dargestellt.

Tabelle 6: Meßwerte des Wirkungsgrades  $\eta_{\text{pipe}}$  für prismatische Hohllichtleiter mit 6m Länge, 10 cm Durchmesser und Lichtaustrittsfenstern von 90°, 120° und 180°

	70 W Strahler	100 W Strahler
90°	<b>51 %</b>	<b>57 %</b>
120°	<b>42 %</b>	<b>50 %</b>
180°	<b>50 %</b>	<b>59 %</b>

Während zwischen 90° und 180° keine großen Differenzen festzustellen sind, geht der Wirkungsgrad bei 120° um ca. 10% zurück. Auch erkennt man den Einfluß des Strahlers. Die Wirkungsgrade des 100 W Strahlers liegen um 6 % -9 % höher als beim 70 W Strahler. Insgesamt liegen diese Werte aber deutlich unter den vergleichbaren Daten für das System mit 25 cm Durchmesser. Erst wurde ein Zusammenhang mit der größeren Anzahl der Reflexionen in dem kleineren Rohr vermutet. Die Ursache liegt aber tatsächlich in der Ausführung des Extraktors, der vom Hersteller geändert wurde und nach einer zweiten Meßreihe zu wesentlich besseren Ergebnissen führt (Tabelle 7). Das System mit 120° Lichtaustrittsfenster wurde dabei nicht mehr berücksichtigt.

Tabelle 7: Wirkungsgrade  $\eta_{\text{pipe}}$  für prismatische Hohllichtleiter mit 10 cm Durchmesser und Lichtaustrittsfenstern von 90° und 180°

	6 m mono <sup>1</sup>	6 m bid <sup>2</sup>	12 m bid <sup>2</sup>	18m bid <sup>2</sup>
90°	<b>77 %</b>	<b>76 %</b>	<b>69 %*</b>	-
180°	<b>81 %</b>	<b>88 %</b>	<b>85 %</b>	<b>78 %*</b>

\*Austausch von Vorschaltgerätee und Lampe während der Messreihe

1: mono= einseitige Lichteinspeisung

2: bid = zweiseitige Lichteinspeisung

Die Wirkungsgrade liegen mit der verbesserten Ausführung nun in der gleichen Größenordnung wie bei den 25 cm Lichtrohren. Ein Abfall wird bei dem 18 m langen System deutlich. Die Ursache liegt hier in der Zusammensetzung des Lichtrohres aus den drei 6 m langen Einzelstücken. Zu beachten ist, daß bei dieser Meßreihe und bei der 12 m Messung mit 90° Lichtaustrittsfenster je ein Vorschaltgerät und eine Lampe getauscht wurden. Auffällig ist, daß fast alle gemessenen prismatischen Hohllichtleiter-Typen einen höheren Wirkungsgrad haben, als dies mit einer einfachen Berechnung nach Whitehead und Hoffmann /75/ zu erwarten war. Entweder sind die Annahmen in der Berechnung zu pessimistisch oder die verwendeten Materialien haben sich verbessert.

Zur besseren Vergleichbarkeit verschiedener Hohllichtleiter wurden Systeme mit ca. 6 m Länge unterschiedlicher Typen untersucht (Tabelle 8). Zunächst fällt auf, daß der Spaltlichtleiter einen deutlich schlechteren Lichtrohrwirkungsgrad aufweist als die Systeme mit Prismenfolie. Hier wirkt sich der niedrigere Reflexionsgrad des Aluminiums aus, das als Reflektormaterial verwendet wurde. Auch der Leuchtenbetriebswirkungsgrad der Einspeisung liegt mit 52 % recht niedrig, so daß der Gesamtwirkungsgrad auf 29 % sinkt. Auch bei dem System mit der 1000W Lampe vom Typ HIT-DE liegt der Leuchtenbetriebswirkungsgrad mit 53 % recht niedrig, aber ein höherer Lichtrohrwirkungsgrad führt zu einem besseren Gesamtergebnis. Reflektorlampen, die zur Zeit in Leistungsstufen bis 150 W hergestellt werden, bieten eine ideale Lichtquelle für Hohllichtleiter.

Tabelle 8: Wirkungsgrade für Hohllichtleiter

	Prismenfolie 5m, Ø 25cm Schweifellampe 1400W	Prismenfolie 6m, Ø 25cm HIT-DE Lampe 1000W	Prismenfolie 6m Ø 10cm HIT-R Lampe 100W	Spaltlichtleiter 5,4m Ø 23cm HIT Lampe 400W
$\eta_{\text{pipe}}$	<b>66 %</b>	<b>83 %</b>	<b>81 %</b>	<b>56 %</b>
$\eta_{\text{LB}}$	-	<b>53 %</b>	<b>86 %</b>	<b>52 %</b>
$\eta_{\text{Gesamt}}$	-	<b>44 %</b>	<b>70 %</b>	<b>29 %</b>
lm/W	<b>57</b>	<b>33</b>	<b>42</b>	<b>21</b>

Aufgrund der kleinen Abmessungen läßt sich das Licht sehr gut bündeln und mit nur geringen Verlusten in den Hohllichtleiter einspeisen. Ein Gesamtwirkungsgrad von 70 % ist sogar im Vergleich mit konventionellen Beleuchtungsanlagen ein sehr guter Wert.

Für das System mit der Schwefellampe kann kein Betriebswirkungsgrad angegeben werden, 66 % Lichtrohrwirkungsgrad weisen aber darauf hin, daß dieser Typ von Hohllichtleiter nicht optimal konfiguriert ist. Dennoch wird eine beachtliche Lichtausbeute von 57 lm/W erreicht. Diese liegt deutlich über den anderen vermessenen Systemen und macht deutlich, wie gut dieser Lampentyp für den Einsatz mit Hohllichtleitern geeignet wäre.

## 8 Ausblick

Hohllichtleitersysteme haben meistens einen niedrigeren Wirkungsgrad als vergleichbare konventionelle Beleuchtungsanlagen und damit verbunden auch höhere Betriebskosten /57/. Diesen Nachteil können sie teilweise durch geringere Wartungskosten ausgleichen. Die Wartungskosten entstehen durch den Wechsel der Lampen am Lebensdauerende oder auch durch notwendige Reinigungen der Beleuchtungsanlage und können in schwierigen Situationen, wenn Gerüste oder Steiger eingesetzt werden müssen, enorme Kosten verursachen. Diese Kosten können sich durch eventuelle Betriebsbeeinträchtigungen während der Wartungsarbeiten weiter erhöhen und im Extremfall die Kosten für die Installation der Lichtrohre und die Energiekosten für deren Betrieb um ein vielfaches überschreiten. Typische Gebäude sind Produktionshallen mit großen Höhen, Eingangsbereiche und Foyers von repräsentativen Bürogebäuden und Hotels. Schwierige Wartungsarbeiten können auch in Sporthallen und bei Beleuchtungsanlagen über Wasserflächen in Schwimm- und Hallenbädern auftreten (Bild 46). Bei diesen Gebäuden ist es in vielen Fällen möglich, die Anzahl der Lampen und damit die Wartungskosten für den Lampenwechsel deutlich zu reduzieren. Im günstigsten Falle können die Lampen sogar in Bereiche verlagert werden, die ohne große Probleme erreichbar sind.



Bild 46: Hohllichtleiterinstallation in einem Schwimmbad /68/

Ein weiteres Anwendungsgebiet ist die Beleuchtung von Räumen für spezielle Einsatzbereiche. Hierzu zählen Kühlhäuser, bei denen es möglich ist, einen großen Teil der Wärme, die bei der Lichterzeugung entsteht, außerhalb des Kühlraumes abzuleiten (Bild 47). Bei explosionsgeschützten Räumen können sämtliche elektrische Bauteile außerhalb des gefährdeten Bereichs angeordnet werden, was eine Erhöhung der Sicherheit in diesen Räumen bedeutet. Das gleiche gilt für feuchte und nasse Räume wie z.B. Waschstraßen oder Schwimmbäder. Auch in Reinräumen, wo kein Staub entstehen darf, können die Lampen außerhalb des Raumes montiert werden.



Bild 47: Kühlhaus mit Hohllichtleiter /1/

Neben wirtschaftlichen und sicherheitstechnischen Aspekten spielt die Einbindung von Beleuchtungsanlagen in die Architektur des Gebäudes eine wichtige Rolle. Bei passenden Bauvorhaben können hohle Lichtleiter mit ihren großen Abmessungen eine interessante Alternative zu bekannten Lösungen darstellen (Bild 48).



Bild 48: Hohllichtleiterinstallation in einem Foyer

In neuerer Zeit ist die Nutzung des Sonnenlichtes in Kombination mit hohlen Lichtleitern immer wichtiger geworden. Über Heliostaten kann das Sonnenlicht in die Lichtrohre gelenkt werden und steht zur Beleuchtung von Räumen zur Verfügung, wo das Sonnenlicht sonst auf direktem Weg nicht hingelangt /60/. Hierbei sind nicht nur energetische Gesichtspunkte zu berücksichtigen, sondern auch die Qualität des Sonnenlichtes, das den visuellen Komfort dieser Räume positiv beeinflussen kann.

Für den kombinierten Einsatz von Kunst- und Sonnenlicht sollen die Demonstrationsanlagen, die im Laufe des ARTHELIO-Projektes realisiert werden, effiziente Lösungen bieten.

Der ARTHELIO-Prototyp 1 wird in einem bestehenden 3M-Fabrikgebäude in Carpiano/Italien installiert. Das Tageslicht wird über einen 1-achsig der Sonne nachgeführten Heliostatenkopf vom Dach des Gebäudes durch ein hochreflektierendes Rohr über 10 m in eine tiefergelegene Fabrikhalle geleitet. In Abhängigkeit von den Tageslichtverhältnissen wird Kunstlicht über horizontale

Lichtrohre und elektronisch verfahrbare Schatter dosiert in die tageslichtgefluteten Zonen transportiert.

Der zweite ARTHELIO-Prototyp wird zur Tageslichtbeleuchtung eines fensterlosen Treppenhauses im Gebäude der Firma Semperlux in Berlin aufgebaut /55/.

Das auf den 2-achsig nachgeführten Heliostatenspiegel auftreffende Sonnenlicht wird mit Hilfe von vier Fresnellinsen fokussiert und über Parabolreflektoren ins Gebäudeinnere gelenkt. In einer Mischeinheit wird je nach Sonnenlichtangebot Kunstlicht ergänzt. Das kombinierte Kunst-Sonnenlichtgemisch wird auf zwei vertikale Hohllichtleiter aufgeteilt, die das Treppenhaus über drei Stockwerke gleichmäßig beleuchten (Bild 49).

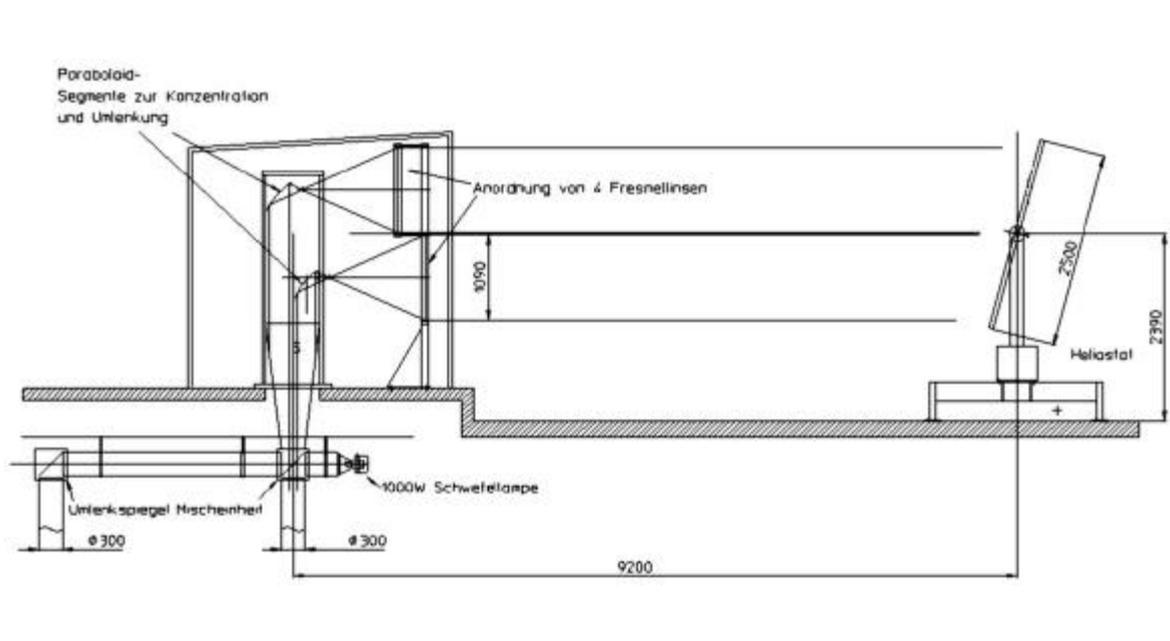


Bild 49: ARTHELIO-Demonstrationsanlage 2

Beide Demonstrationsanlagen werden mit einem Meßsystem zum Langzeitmonitoring der erreichten Beleuchtungsstärken in den jeweiligen Nutzebenen ausgerüstet. Gleichzeitig werden die Betriebsparameter der Kunstlichtquellen sowie die Stellungen von Mischeinheit und Shuttern registriert, so daß ein Vergleich mit den zuvor errechneten Werten möglich ist.

## 9 Zusammenfassung

Beleuchtungsanlagen mit Hohllichtleitern können eine interessante Alternative zu bekannten Beleuchtungslösungen darstellen und haben sich in einem Teilbereich der Lichttechnik fest etabliert. Durch die stete Weiterentwicklung von Materialien und Lichtquellen wurde die Effizienz von Hohllichtleitersystemen kontinuierlich verbessert und es werden heute Wirkungsgrade erreicht, die mit denen einfacher konventioneller Leuchten vergleichbar sind. Einer weiteren Verbreitung von hohlen Lichtleitern stand der Mangel an lichttechnischen Daten im Wege, die für die Lichtplanung notwendig sind. Aufgrund der großen Längen von Hohllichtleitern war das Messen des Lichtstromes und der Lichtstärkeverteilung mit herkömmlichen Meßmethoden nicht möglich.

Für dieses Problem wurde eine Lösung entwickelt und ein Meßaufbau realisiert. Das Meßsystem arbeitet auf Basis einer bildauflösenden CCD-Kamera, die die Messung der Lichtstärkeverteilung innerhalb der photometrischen Grenzentfernung erlaubt. Dieses erste Goniophotometer für Hohllichtleiter ermöglicht die abschnittsweise Messung von hohlen Lichtleitern, wobei sowohl die Messung der Lichtstärkeverteilung als Grundlage der Beleuchtungsberechnung mit Lichtplanungsprogrammen möglich ist, wie auch die Bestimmung des Lichtstromes, der wichtige Aussagen über den Wirkungsgrad von Hohllichtleitersystemen liefert.

Die erzielten Meßwerte zeichnen sich durch geringe Meßunsicherheiten und eine hohe Reproduzierbarkeit aus.

Die gemessenen lichttechnische Daten können problemlos in bestehende Lichtberechnungsprogramme eingebunden werden. Vergleiche zwischen berechneten Beleuchtungsstärken und in Testräumen gemessenen Beleuchtungsstärken ergeben Abweichungen, die im Rahmen der Rechengenauigkeit dieser Programme liegt.

Bereits während dieser Arbeit konnten Meßergebnisse, die mit dem Goniophotometer gewonnen wurden, zur Verbesserung von Hohllichtleitersystem genutzt werden.

Als problematisch wurde zunächst die Meßdauer von ca. zwei Stunden je Hohllichtleiter-Teilstück angesehen. Da die Messung jedoch automatisch abläuft

und der Bediener aufgrund der hohen Zuverlässigkeit während der Messung nicht eingreifen muß, erwies sich die lange Meßzeit als unkritisch.

Das neue Goniophotometer ist zum Patent angemeldet und das Deutsche Patent- und Markenamt hat am 10.8.2000 die Offenlegungsschrift herausgegeben /31/.

## 10 Literatur

- /1/ 3M Lighting; Produktinformationen "Throwing new light on the future", 2000
- /2/ Aizenberg, J. B., Aleshina, N. A., Pjatigorskij, V. M.; Arched Hollow Light Guides at the Chkalovskaya Moscow Subway Station; Light & Engineering, Vol. 4, No. 3, 1996
- /3/ Aizenberg, J. B., Buchman, G. B., Pjatigorskij, V. M., Korobko, A. A.; Beleuchtungsanlagen mit Schlitzlichtleitern; Licht 7-8/ 1992
- /4/ Aizenberg, J. B., Bukhman, G. B., Pjatigorskij, V.M.; A New Principle of Lighting Premises by Means of the Illuminating Devices With the Slit Lightguides; CIE Publication No. 36, S. 412-425, 1975
- /5/ Aizenberg, J. B., Korobko, A. A., Pjatigorskij, W. M., Buob, W., Signer, R.; Ein Beleuchtungssystem mit hohlen Lichtwellenleitern für das richtige Licht zum Lernen - Teil 1; Licht 6 / 97 Teil 2; Licht 10/97
- /6/ Aizenberg, J. B., Korobko, A. A., Hollow Light Guides Based On Prismatic Total-Internal-Reflektion Film (A Review); Light & Engineering Vol. 2, No. 4, S. 4-8, 1994
- /7/ Ashdown, I.; Near Field Photometry In Practice; IESNA, Annual Conference 1993, Houston, S 413-425
- /8/ Ashdown, I.; Near Field Photometry: A New Approach; Journal of the IES, Winter 1993 S. 163-180
- /9/ Ashdown, I.; Near-field photometric method and apparatus; U.S. Patent Nr. 5253036
- /10/ Ashdown, I.; Solving The Near-Field Problem; Lighting Magazine 6, 1992, S 38-40.
- /11/ Boyce, P. R., Eklund, N. H.; An Evaluation of Subway Platform Lighting Using the Solar 1000 Sulphur Lamp; Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, 1997
- /12/ Bradford, R. A., Stannard, S.; Refinements to Application Distance Photometry; IESNA, Annual Papers, 1991, S 241-273
- /13/ CIE TC 3-30; Hollow Light Guides Technical Publication; Hollow Light guide Technology and Applications; 1999

- /14/ CIE-Publ. 13.2; Verfahren zur Messung und Kennzeichnung der Farbwiedergabe-Eigenschaften von Lichtquellen; 1988
- /15/ Cobb, Jr.; Totally internally reflecting light conduit has structured outer surface including linear array of right-angle isosceles prism arranged side-by-side to form grooves; US Patent 4805984; April 1989
- /16/ DIN 5032, Teil 6; Lichtmessung, Photometer, Begriffe, Eigenschaften und deren Kennzeichnung
- /17/ DIN 5032, Teil 7; Lichtmessung, Klasseneinteilung von Beleuchtungsstärke und Leuchtdichtemeßgeräten
- /18/ DIN 5035 Teil 1 Beleuchtung mit künstlichem Licht Begriffe und allgemeine Anforderungen
- /19/ Dolan, J. T., Ury, M. G., Wood, C. H.; A Novel High Efficiency Microwave Powered Light Source; Sixth International Symposium on the Science and Technology of Light Sources, Technical University of Budapest, 1992
- /20/ Eklund, N. H., Boyce, P. R.; A Comparison of a Solar 1000 Sulphur Lamp Installation and Conventional Fluorescent Installations in Two Similar Post Terminals; Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, 1997/
- /21/ Fischbach, I., Riemann, M., Schmidt, F.; Zur Leistungsfähigkeit der Messung von Lichtstärkeverteilungskurven mittels bildauflösender Fotometrie; Licht 7-8 1995 S 640-645
- /22/ Fischbach, I., Krüger, U.; Erfassung photometrisch richtiger Daten mit CCD-Kameras; 43. Intern. Wiss. Kolloquium d. TU Ilmenau, 21.-24.9.97, Band 1, S.658-664, 1998
- /23/ Föhlich, W.; Neue Erfahrungen mit einem Autokollimationsphotometer in Verbindung mit einem Si-Photoelement; Licht'86, Lichttechnische Gemeinschaftstagung Baden, Tagungsband S. 330-340
- /24/ Föhlich, W., Schelzke, E.; Lichttechnische Meßmöglichkeiten mit einem Goniophotometer mit drehbaren Raster-Photometerkopf. Licht 11/1981
- /25/ Franck, K.; A Method of Testing and Evaluating Fluorescent Luminaires; Illuminating Engineering, Dezember 1950, S. 763-770
- /26/ Gerthsen, C., Kneser, H.O, Vogel, H.; Physik, Springer Verlag, 16. Auflage 1992, S 456-457

- /27/ Horn, C. E., Little, W. F., Salter, E. H.; Relation of Distance to Candlepower Distribution From Fluorescent Luminaires; Illuminating Engineering, February 1952, S.99-104
- /28/ IKL/ CELSIUS GROUP; Light Drive™ 1000 type 1400-E2/1; Installations and Operation Manual; 06.03.1998
- /29/ Kaase, H.; Aydinli, S.; Jakobiak, R.; u.A.; Bericht zum Forschungsprojekt "Tagelichtnutzung in Gebäuden"; BMBF Förderkennzeichen 29037B; 2000
- /30/ Khazanov, V.S.; Shishov, D.M.; Method and Equipment for Measuring Light Guide Luminous Flux; Svetoteknika No. 11, S. 9,10, 1981
- /31/ Kaase, H.; Kloss, S.-H.; Müller, T.; Rosemann, A.; Czibula, G.; Klimroth, M.; Gerät zur Messung des Lichtstromes und der Lichtstärkeverteilung, Offenlegungsschrift DE 199935761A1, Deutsches Patent- und Markenamt
- /32/ Kiwull, N.; Evaluierung der Einbindung von LVK-Meßdaten ausgewählter Hohllichtleiter in Beleuchtungsplanungsprogramme; Diplomarbeit Institut für Elektronik und Lichttechnik, TU-Berlin 2000; noch nicht veröffentlicht.
- /33/ Kloss, S.-H.; Nah- und Fernfeldphotometrie: Vergleichende Untersuchungen und Anwendung in der Beleuchtungsberechnung von Innenräumen.; Diplomarbeit, Technische Universität Berlin 1995
- /34/ Kloss, S.-H., Müller, T., Rosemann, A., Steinwandt, C., Kaase, H.; Photometrische und spektrale Eigenschaften der Schwefellampe; Tagungsband OTTI - Fünftes Symposium Innovative Lichttechnik in Gebäuden, Kloster Banz, 1999, S. 223-228
- /35/ Lautzenheiser, T., Weller, G., Stannard, S.; Photometry for near field applications; Journal of the IES, January 1984, S.262-269
- /36/ LBM Lichtleit-Fasertechnik; Produktinformationen; 1999
- /37/ Leuthold, B.; Die Photometrie von Beleuchtungsanlagen mit hohlen Lichtleitern; Diplomarbeit FH Köln Fachbereich Photoingenieurwesen 1994
- /38/ Leuthold, B.; Untersuchungen der Firma Siteco; persönliche Mitteilung Juni 2000
- /39/ Lewin, I., Laird, R., Carruthers, B.; Development of New Photometer Concepts for Quality Control Applications; Journal of the IES, Summer 1990, S.90-97
- /40/ Marx, P.; Lichtstromintegrator; Deutsches Patent Nr.: 1928815

- /41/ Marx, P.; Exzenter-Drehspiegelsystem zur Lichtmessung; Deutsches Patent Nr. 38 02 115
- /42/ Mistrick, R. G., English, C. R.; A Study of Near-Field Indirect Lighting Calculations; Journal of the IES, Summer 1990, S.103-112
- /43/ Müller, T., Kloss, S.-H., Rosemann, A., Kaase, H.; ARTHELIO - Ein Europäisches Forschungsprojekt zur kombinierten Nutzung von Tageslicht und dem Kunstlicht der Schwefellampe in Gebäuden; Tagungsband OTTI - Fünftes Symposium Innovative Lichttechnik in Gebäuden, Kloster Banz, 1999, S. 34-40
- /44/ Ngai, P. Y.; On Near-Field Photometry; Journal of the IES, Summer 1987, S. 129-136
- /45/ Ngai, P., Zhang, F.G., Zhang, J.X.; Near Field Photometry: Measurement and Application for Fluorescent Luminaires; IESNA, N.Y., Annual Papers 1991, S. 274-315
- /46/ Qi, N., Ayers, M.J., Butcher, G., Carter, D.J.; Discrete emitters for remote-source lighting systems; Lighting Research and Technologies, Vol.28, S 53-58, 1996
- /47/ Pearson, H.; Piping light with acrylic materials; Modern Plastics, August 1946, S. 123-127
- /48/ PRC Krochmann GmbH, Meßprotokoll Photometerkopf vom 18.05.1998
- /49/ Pritchard, E. H., Simons, R. H.; High-speed photometer for measuring light intensity distributions; Lighting Research and Technologies 24(2) 107-111 1992
- /50/ Rattunde, R., Stolzenberg, K.; Das neue Goniophotometer mit Drehspiegel am Institut für Lichttechnik der Technischen Universität Berlin; LICHT 3-4/1989, S250-253
- /51/ Rea, M.S., Jeffrey I.G.; A new Luminance and Image Analysis System for Lighting and Vision; JOURNAL of the Illuminating Engineering Society Winter 1990 S. 64-72
- /52/ Riemann, M., Schmidt, F., Poschmann, R.; Verfahren und Anordnung zur Messung der Lichtstärkeverteilung von Leuchten und Lampen; Patentschrift DE4110574 C2; Deutsches Patent- und Markenamt

- /53/ Riemann, M., Schmidt, F., Poschmann, R.; Zur Bestimmung der Lichtstärkeverteilung von Leuchten innerhalb der fotometrischen Grenzentfernung mittels eines bildauflösenden Goniofotometer.; Licht 7-8 1993 S. 592-597
- /54/ Rosemann, A., Kloss, S.-H., Müller, T., Kaase, H.; Hohllichtleiter mit kombinierter Tages- und Kunstlichteinkopplung - Demonstrationsanlage an der TU Berlin; Tagungsband OTTI - Sechstes Symposium Innovative Lichttechnik in Gebäuden, Kloster Banz, 2000
- /55/ Rosemann, A., Eine energieoptimierte und umweltfreundliche Hohllichtleiterbeleuchtungsanlage mit Tageslichteinkopplung, Dissertation TU Berlin , Fachgebiet Lichttechnik noch nicht veröffentlicht
- /56/ Saxe, S. G.; Prismatic Film Light Guides: Performance and Recent Developments; Solar Energy Materials, Vol. 19, 1989
- /57/ Schmidt, J.; Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Beleuchtungssystemen mit Hohllichtleitern; Studienarbeit Institut für Elektronik und Lichttechnik, TU-Berlin 2000
- /58/ Schüßler, J.; CCD Videotechnik und Bildverarbeitung in der Photometrie; Licht 92 Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaften Deutschlands, der Niederlande, Österreichs und der Schweiz.Tagungsband S. 216-233
- /59/ Semperlux AG; Projektinformationen Gerichtsgebäude Littenstr. Berlin
- /60/ Shao, L., Riffat, S. B., Hicks, W., Yohannes, I.; A Study Performance of Light Pipes Under Cloudy and Sunny Conditions in the UK; Right Light 4, Vol. 1, 1997
- /61/ Siminovitch, M., Gould, C., Page, E.; A High-Efficiency Indirect Lighting System Utilizing the Solar 1000 Sulfur Lamp; Right-Light 4 Conference, Copenhagen, Denmark, 1997
- /62/ Stannard, S., Brass, J.; Application Distance Photometry; Journal of the IES, Winter 1990, S. 39-46
- /63/ Stefanov, E., Riemann, M.; V(Lambda) Anpassung von bildauflösenden Lichtmeßgeräten; Licht 94 Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaften Deutschlands, der Niederlande, Österreichs und der Schweiz. Tagungsband S. 797-811

- /64/ Stockmar, A.; Eulumdat - Ein Leuchten-Datenformat für den europäischen Beleuchtungsplaner; Licht 90, Tagungsband der 9. Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaften in
- /65/ Takhashi, S., Okads, S., Katsuto, F.; Development of luminance pattern analyser utilizing industrial TV techniques; Journal of the IES, April 1982, S. 147-152
- /66/ Tansley, Brian W., Houser, Kevin W., Pasini, Ivan C.; The IQCam Digital Image Photometer System: Principles of Operation and Comparative Performance; Journal of the IES, Winter 1999 S. 182-200
- /67/ TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH; Benutzerhandbuch Goniofotometer RiGO 601; 1999 S.33
- /68/ TIR Systems Ltd.; Projektbeispiele: "Arena Health Club, Target Center, Minneapolis"; <http://www.tirsys.com>
- /69/ Turbosyde; Optical Guide "Fying Lux"; Handbook 1999
- /70/ Turner, B. P., Ury, M.G., Leng, Y., Love, W.G.; Sulfur Lamps - Progress in Their Development; IES Annual Conference August 1995 New York
- /71/ Vizmanos, J. G., Fuentes, L. M., Gutierrez Mendez, J. A.; Disability Glare measurement Using A CCD Camera; Light & Engineering Vol.5, NO. 1, pp. 59-66, 1995
- /72/ Wheeler, W.; Apparatus for Lighting Dwellings or other Structures; US Patent Nr. 247229, September 1881
- /73/ Whitehead, L. A., Donaldson, M.; Investigation of Light Distribution with Annular Lens Light Guide; Journal of the IES, Sommer 1998, S. 3-12
- /74/ Whitehead, L. A.; New Simplified Design Procedures for Prism Light Guide Luminaires; Journal of the Illuminating Society, Summer 1998
- /75/ Whitehead, L. A., Hoffmann, K.; Method for Estimating the Efficiency of Prism Light Guide Luminaires; Journal of the Illuminating Engineering Society, Summer 1998
- /76/ Whitehead, L., Kan, P., Lui, K.; Improved Extractor Design for Modular Light Guides; Journal of the Illuminating Engineering Society, Summer 1999
- /77/ Whitehead, L.; Prism light guide having surfaces which are in octature; US Patent Nr. 4260220, März 1982

- /78/ Whitehead, L., Kan, P., Lui, K., Jacob, S.; Near Field Photometry of Prism Light Guide Luminaires Using a CCD Camera; Journal of the Illuminating Engineering Society, Summer 1999
- /79/ Yeni, M.; Dimmung von Halogenmetalllampen mit Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Keramikkbrenner; Studienarbeit Technische Universität Berlin, Institut für Elektronik und Lichttechnik; 1997
- /80/ Zwick, P.; Untersuchungen der Fehlerquellen bei der Berechnung von Beleuchtungsstärken für langgestreckte Leuchten; Diplomarbeit; Institut für Lichttechnik; TU Berlin 1984