

Beleuchtung von großen Gebäudetiefen mit optimierten Hohllichtleitersystemen

Vorgelegt von

**Diplom-Ingenieur
Hashem Alipour**

aus Berlin

von der Fakultät IV – Elektrotechnik und Informatik
der Technischen Universität Berlin
Fachgebiet Lichttechnik
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

Genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Orglmeister
Berichter:	Prof. Dr.-Ing Völker
Berichter:	Prof. Dr. Kasse
Berichterin:	Prof. Dr. Belloni

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 07.07.2009

Berlin 2009

D 83

Danksagung

Ich bedanke mich herzlich bei allen, die mich bei dieser Doktorarbeit unterstützt haben.

Insbesondere möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. rer. nat. Heinrich Kaase für die thematische Idee und die stetige wissenschaftliche Betreuung bedanken, die mir diesen Erfolg ermöglicht.

Zudem gilt mein Dank Dr. Felix Serick, der stets mit guter Laune alle meine Frage der Lichttechnik beantwortet hat. Desweiteren möchte ich mich für das Lesen der Arbeit bedanken.

Ich danke Herrn Dr. Sirri Aydinli, der jederzeit ein offenes Ohr für meine Fragen und Probleme hatte und mit seiner ständigen Hilfsbereitschaft und vielen Diskussionen sowie Korrekturlesen geholfen hat.

Frau Prof. Dr. Paola Belloni danke ich für die freundliche Unterstützung und Beratung sowie die Vorbereitung der vielen gefragten Utensilien.

Besonders danken möchte ich Herrn Prof. Dr. Völker für seine Unterstützung.

Bei Herrn Herr Dipl. Ing. Sohiel Moghtader bedanke ich mich für das konzentrierte Lesen der Arbeit.

Bei dem Mitarbeiter der Werkstatt des FG der Lichttechnik der TU Berlin, Herrn J. Oertwig bedanke ich mich für die tatkräftigen Arbeiten beim Aufbau des Tageslichtsystems.

Ein Dankeschön auch an die

Herren: S. Gramm und, K. Gutjahr für die Unterstützung beim Test, Aufbau im Versuchsraum und beim Montieren des Tageslichtsystem.

Schließlich danke ich mich bei meiner Familie, die mich während der ganzen Zeit unterstützt und versteht.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Modellierung des HLG	4
2.1	Begriffsdefinitionen	4
2.2	Rechnerprogramm TracePro	4
2.3	Simulationen mit TracePro	5
2.4	Simulation von Hohllichtleitersystemen	6
2.4.1	Scheinwerfer	6
2.4.2	Hohllichtleiter (HLG)	8
2.4.2.1	Außenzylinder	9
2.4.2.2	Extraktor	9
2.4.2.3	Reflektor	9
2.4.2.4	Prismenfolie	9
2.4.2.5	Endspiegel	10
2.5	Vergleich der gemessenen und berechneten LVK	10
3	Entwicklung zum Aufbau von HLG	17
3.1	Einsatz von Extraktoren im HLG	17
3.1.1	Extraktorfilm	17
3.1.2	Spiegelextraktor	20
3.2	Vergleich der Verschiedenen Extraktoren	20
3.3	Neue Entwicklung	21
3.4	Lichtverluste	24
3.4.1	Berechnung der Lichtverluste in der Schutzhülle	25
3.4.2	Berechnung der Lichtverluste am Endspiegel	26
3.4.3	Berechnung der Lichtverluste der Prismenfolie	26
3.4.4	Lichtverlust am Extraktor	28
3.4.5	Lichtverlust am Reflektor	28
3.5	Simulation der Lichtverluste im HLG	28

3.6	Temperaturen auf den Außerflächen von HLG	30
3.7	Der Betriebswirkungsgrades von HLG	31
3.8	Endspiegel	33
3.9	Neu entwickelter HLG	36
3.10	Untersuchung der Farb- und Farbwiedergabeeigenschaft von HLG	38
4	Eignung von Simulationsprogrammen für HLG - Systeme	42
4.1	Einleitung	42
4.2	Messung der LVK	42
4.2.1	HLG mit Extraktorfilm	44
4.2.2	HLG mit Spiegelextraktor	46
4.3	Versuchsraum	47
4.4	Messungen der Beleuchtungsstärkeverteilungen	48
4.4.1	Gemessene Beleuchtungsstärkeverteilungen des HLG mit Extraktorfilm	49
4.4.2	Gemessene Beleuchtungsstärkeverteilungen des HLG mit Spiegelextraktoren ..	51
4.5	Vergleich HLG mit Extraktorfilmen und Spiegelextraktoren	53
4.6	Berechnungen der Beleuchtungsstärkeverteilungen	54
4.6.1	Relative Abweichung mit Extraktorfilm	55
4.6.2	Relative Abweichung mit Spiegelextraktor	56
4.7	Untersuchung der Software	59
4.8	Untersuchung der LVK der unterteilten Abschnitte des HLG	62
4.9	Untersuchung der unterteilten Abschnitte des HLG im Rechnerprogramm	65
4.10	Weitere Untersuchungen	67
4.10.1	Messung der LVK eines Segmentes mit Spiegelextraktor (Fall 1)	67
4.10.2	Messung der LVK eines Segmentes mit Spiegelextraktor (Fall 2)	68
4.11	Abschätzung der Messgenauigkeiten	69
4.12	Leuchtdichte des HLG	70
4.12.1	Gemessene Leuchtdichte	70
4.12.2	Vergleich der gemessenen und berechneten Leuchtdichte	72
4.13	Blendung	74
4.14	Zusammenfassung	79

5	Tageslichtleitsysteme mit Heliostaten	81
5.1	Tageslichtleitsystem am FG Lichttechnik der TU Berlin	81
5.2	Heliostatensystem “ARTHELIO”	85
5.3	Mechanische Einkopplung	86
5.3.1	Lichtwellenleiter	87
5.3.2	Flüssigkeitslichtleiter	88
5.3.3	Hohllichtleiter	89
5.4	Realisierung einer mechanischen Einkopplung	91
5.5	Wirkungsgrad der mechanischen Einkopplung	95
5.6	Gemessener Wirkungsgrad des Tageslichtsystem mit HLG	102
5.7	Wartung des Tageslichtsystems	107
5.8	Empfangsfläche der Fresnel-Linse	107
5.9	Zusammenfassung und Ausblick	109
6	Zusammenfassung	111
7	Literaturverzeichnis	112

1 Einleitung

Die Idee des Designs und des Aufbaus von Lichtrohren mit dem Ziel der Trennung der Lichtquelle von der Lichtaustrittsfläche geht bis ins letzte Viertel des 19. Jahrhunderts zurück, als der russische Wissenschaftler Chikolev 1874 das erzeugte Licht einer leistungsstarken elektrischen Lichtquelle durch ein von innen verspiegeltes Rohr zu einer Werkstatt leitete, in der sich explosive Materialien befanden /65, 93/. Da diese elektrischen Lichtquellen Wärme erzeugen, konnten sie auch Brände oder Explosionen auslösen.

Der erste Aufbau eines Hohllichtleiters (HLG) bestand aus einem metallischen Rohr, dessen innere Oberfläche mit reflektierendem Material bedeckt war /93/. Um die dabei auftretenden Verluste zu reduzieren, fokussierten sich die anschließenden Forschungen auf die Weiterentwicklung hoch reflektierender Materialien, weil deren Absorptionsgrad zunächst über 10 % betrug /24/.

Henry Pearson veröffentlichte 1946 eine Arbeit über ein Lichtleitersystem, das das Licht mit hoher Effizienz durch das physikalische Phänomen der Totalreflexion weiterleiten konnte /92, 93/.

Die Totalreflexion ergibt sich aus dem snelliusschen Brechungsgesetz:

$$n_1 \cdot \sin(\delta_1) = n_2 \cdot \sin(\delta_2) \quad (1)$$

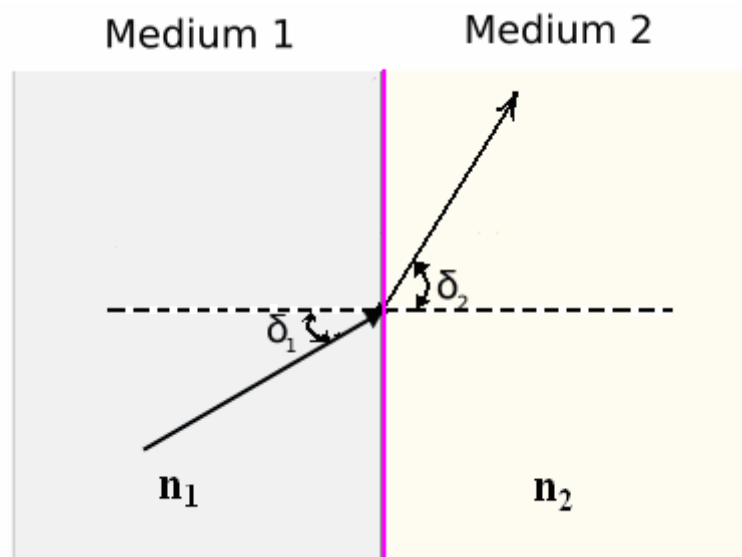


Abb. 1 Lichtbrechung an einer Grenzschicht

Dabei sind n_1 und n_2 die einheitenlosen Brechzahlen der jeweiligen Medien, und δ_1 bzw. δ_2 der Einfalls- bzw. Brechungswinkel gegenüber dem Lot auf die Grenzschicht.

Beim Übergang aus einem optisch dichteren in ein optisch dünneres Medium ($n_1 > n_2$) ergibt sich aus dem Brechungsgesetz eine bestimmte Winkelgrenze, bei der δ_2 den Wert 90° erreichen würde. Dieser Grenzwinkel δ_{1T} berechnet sich zu:

$$\delta_{IT} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2)$$

Für alle Winkel $\delta_i \geq \delta_{IT}$ kann das Licht also nicht mehr aus dem optisch dichteren in das optisch dünnere Medium übertreten, sondern wird innerhalb des optisch dichteren Mediums total reflektiert.

Im Jahre 1981 konnte ein großer Durchbruch bei der Entwicklung von Hohllichtleitern erzielt werden, als L. Whitehead von der University of British Columbia in Kooperation mit der Firma 3M die total reflektierende prismatische Folie (OLF: Optical Lightig Film) entwickelte /123/. Im Jahre 1985 entwickelten R. Appeldorn und S. Cobb von der Firma 3M in den USA das so genannte Mikroreplikationsverfahren, mit dem Prismenfolien aus transparentem PMMA mit einem Lichtreflexionsgrad bis zu 97 % für gewisse Lichteinfallrichtungen und Längen von mehreren Metern hergestellt werden konnten /1, 64, 97, 123/. Diese Entwicklung ermöglichte die Produktion langer Hohllichtleiter.

Im 1986 patentierte S. Sutton die MLP (Mirror Light Pipe) /107, 108/. Nach 1989 wurden Hohllichtleiter von P. Littlefair für die Tageslichtnutzung eingesetzt /82, 123/.

Ende der 90er Jahre wurde ein neuer Film (VMF: Visible Mirror Film) mit einem Lichtreflexionsgrad von mehr als 98 % aus einem vielschichtigen polymerischen Film entwickelt /2, 124/.

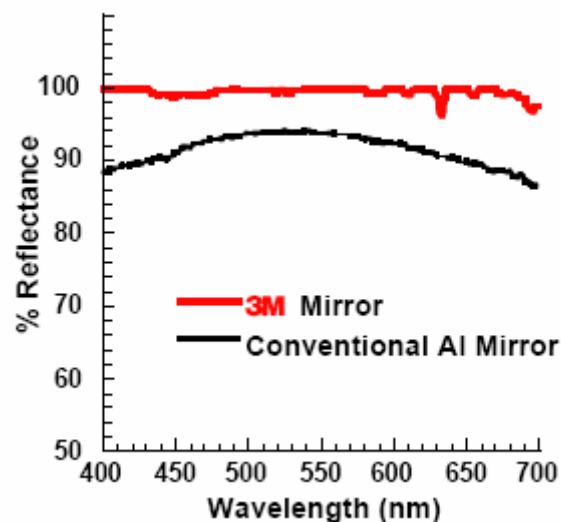


Abb. 2 Spektraler Reflexionsgrad von VMF im Vergleich zum Alu-Spiegel

Der Lichttransmissionsgrad (τ_p) des Lichtleiters mit beliebigem Querschnitt wurde zunächst von Zastrow und Wittwer bestimmt /134/:

$$\tau_p = \rho_p^{L \tan \theta / d_{eff}} \quad (3)$$

Dabei ist:

ρ_p : Lichtreflexionsgrad der Innenfläche eines Light Pipes

L: Länge eines Light Pipes

θ : Einfallswinkel der Strahlen bezogen auf die Achse eines Light Pipes

d_{eff} : Effektiver Durchmesser der Querschnittfläche, der z. B. für zylindrische MLP durch

$$d_{\text{eff}} = \frac{\pi d}{4} \quad (d: \text{Durchmesser des Querschnittes}) \text{ bestimmt wird.}$$

Swief und Smith haben für die Lichtweiterlenkung eines MLP eine andere Beziehung als geschlossenes Integral abgeleitet /109/.

In Folge wurden für Beleuchtungszwecke verschiedene Untersuchungen für die Leitung von Tageslicht und künstlichem Licht durch einen HLG durchgeführt, zum einen mit Hilfe einer verspiegelten Innenoberfläche und zum anderen durch den Einsatz von Prismenfolien.

Einige weltweite Anwendungen von HLG für Beleuchtungszwecke sind in der Literatur ausführlich diskutiert worden /3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 13, 29, 30, 40, 49, 72, 83, 85, 90, 93, 99, 100, 101, 125, 127/.

Demnach ergeben sich durch die Anwendung von HLG folgende Vorteile /93/:

- Einsatz von Lichtquellen mit hohem Leistungsumsatz
- Vergrößerung des Abstandes zwischen Lichtquelle und der zu beleuchtenden Fläche
- Leichter Zugang zu den Lampen für deren Reinigung bzw. deren Austausch
- Reduzierung der Lampenanzahl
- Geringer Wartungsfaktor
- Verlustarme Führung von Tageslicht über weite Strecken
- Effektbeleuchtung durch den Einsatz von Farbfiltern
- Einsatz im Bereich der Werbung und bei Dekorationen

Trotz der stetigen Entwicklung neuer Materialien mit verbesserten Reflexionseigenschaften in den letzten Jahren werden bisher HLG für Beleuchtungszwecke praktisch kaum eingesetzt.

Die Verbesserung dieser Situation, also der Einsatz von HLG für die Weiterleitung von Kunst- und Tageslicht bildet das zentrale Thema der vorliegenden Arbeit, die in drei Teile gegliedert ist.

Im ersten Teil wird der HLG durch eine adaptive Software simuliert, um die Vor- und Nachteile von HLG auszuloten. Dann werden aufwendig ermittelte Lösungen zur Verbesserung des Wirkungsgrades und der Gleichmäßigkeit des ausgekoppelten Lichtstroms erarbeitet.

Dabei werden berechnete Beleuchtungsstärkeverteilungen und Leuchtdichten von HLG mit Messwerten von realen Versuchsmustern verglichen. Das Ziel ist dabei die Optimierung der in den Lichtplanungsprogrammen verwendeten Lichtstärkeverteilung.

Im letzten Teil wird ein neues HLG-Tageslichtsystem mit hohem Wirkungsgrad vorgestellt.

2 Modellierung des HLG

2.1 Begriffsdefinitionen

Hohllichtleiter (HLG), gespeist durch künstliche Lichtquellen, werden zu verschiedenen Zwecken wie z.B. zur Tunnelbeleuchtung oder zur Innenraumbeleuchtung (Montagenhallen, Schwimmhallen, u.a.) eingesetzt /32/. Als besonderes nachteilig haben sich dabei der geringe Leuchtenbetriebswirkungsgrad und die örtliche Ungleichmäßigkeit des austretenden Lichtstroms. Deshalb arbeiten die Hersteller und Forscher an Verbesserungen der Einspeisungsscheinwerfer, der Extraktoren, der Endspiegel, der Prismenfolie und der Auskopplungsfenster, um die Verluste zu verringern und die LVK gleichmäßiger zu gestalten. Weil Praxistests sehr aufwendig und kostspielig sind, ist es neben der Anfertigung und der Vermessung von Prototypen vorteilhaft hier mathematische Modellierungs- und Simulationsverfahren einzusetzen. Da in den Simulationen alle wesentlichen Details berücksichtigt werden können, eignen sie sich für eine gezielte Produktentwicklung. Durch geeignete Software und Modelle ist die Abweichung zwischen dem Simulationsergebnis und dem Praxistest zu minimieren.

2.2 Rechnerprogramm TracePro

TracePro ist eine optomechanische Software zur modellhaften Darstellung der Ausbreitung des Lichtes in abbildenden und nicht abbildenden optomechanischen Systemen. Das Programm TracePro verwendet die Methode der Strahlverfolgung. Mit dem Modell und der Strahlenverfolgung lassen sich folgende Analysen erstellen /111, 121/:

- Lichtverteilung im Beleuchtungs- und Bilderzeugungssystem
- Leistung, Effizienz, Verlust oder Systemdurchlässigkeit
- Absorption von Lichtstrom oder Leistung durch Oberflächen oder Volumenmedien
- Lichtstreuung in biologischen Geweben
- Polarisierungseffekte
- Fluoreszenzeffekte
- Doppelbrechungseffekte

Es eignet sich für die optische Analyse von festen Modellen bzw. Hohllichtleitersysteme (Scheinwerfer und HLG). Weil sich die Strahlen entlang verschiedener Richtungen ausbreiten, verfolgt TracePro den Lichtstrom sehr vieler einzelner Strahlen. Es erfasst die Absorption, die gerichtete Reflexion sowie die Brechung, Beugung, und Lichtstreuung.

Im Modell von TracePro wird die Monte-Carlo Methode verwendet, um die Streuung und Reflexion des Lichtes zu simulieren, und durch die Strahlverfolgung genau zu modellieren. Bei Streuprozessen an Oberflächen treten z. T. kontinuierliche Verteilungen des Lichts auf.

Die Monte-Carlo-Methode ist ein Verfahren aus der Stochastik, mit dem Zufallsprozesse modelliert werden können. Die Methode von Monte-Carlo wird verwendet, um quantenmechanische Prozesse zu modellieren, die nur durch ihre Statistik beschrieben werden können. Sie wird dort verwendet, wo herkömmliche numerische Verfahren nicht anwendbar sind. In Bezug auf die Ausbreitung des Lichtes bietet die Monte-Carlo Methode neben dem stochastischen Verfahren auch den Einsatz herkömmlicher numerischer Verfahren an. Bei der Monte-Carlo Methode werden die Strahlverfolgungen, die Lichtstreuung- und Reflexionsprozesse als Zufallsprozesse behandelt. Statt der Ausbreitung der Lichtverteilung

werden Stichproben aus der Verteilung bzw. Strahlen betrachtet. Die Proben werden zufällig gewählt, unter Verwendung der Wahrscheinlichkeitsdichte. In der Monte-Carlo-Strahlverfolgung werden die Richtungen des Strahls zufällig gewählt, und somit wird ein zuverlässiges Ergebnis erreicht, wenn eine sehr große Zahl von Strahlen gewählt wird. Um zuverlässige Ergebnisse ohne großen Rechenaufwand zu erzielen, macht TracePro Gebrauch von Verfahren zur Varianz-Reduzierung (zur Reduzierung der Anzahl der Strahlen) /31, 121/.

2.3 Simulationen mit Tracepro:

Ein typischer Simulationsablauf mit TracePro erfolgt in den folgenden Schritten /121/:

1. Schritt: Erstellung eines Körpermodells

Zur Erstellung eines geometrischen Modells in TracePro bieten sich folgende Möglichkeiten an:

- Direkte Programmierung der Körpergeometrie in TracePro
- Import der Modelle aus Linsenkonstruktionsprogrammen
- Import aus CAD-Programmen (AutoCAD,...)

2. Schritt: Definition der Material- und Oberflächeneigenschaften

In diesem Abschnitt werden den Objekten und Oberflächen im Körpermodell physikalische Eigenschaften (z.B.: Reflexion, Streuung, Refraktion, Fresnel-Reflexionen, usw. ...) zugewiesen. Dabei kann der Anwender Eigenschaften festlegen oder aus dem TracePro-Eigenschaftenkatalog mit häufig eingesetzten und handelsüblichen Materialien und Beschichtungen auswählen.

3. Schritt: Verwendung von Eigenschaften

Sobald Eigenschaften der Materialien festgelegt werden, können die Eigenschaften auf das entsprechende Objekt und die Oberfläche des Modells übertragen werden. Physikalische Eigenschaften werden in das Körpermodell übertragen, das gebaut wird, wenn das Modell oder Design vollendet wird. Diese Eigenschaften haben einen direkten Einfluss auf die Strahlverfolgung.

4. Schritt: Raytracing in TracePro

Die Strahlverfolgung ist das Mittel, mit dem TracePro die Lichtverteilung der Strahlungsdichte überall in einem Modell simuliert.

Strahlen werden durch das Modell mit einer an bestimmten Startpunkten definierten Lichtquelle verfolgt. Zur Definition der Lichtquelle beim Raytracing gibt es drei Verfahren: Gitter, Oberflächen und Dateiquellen (importierte Quellen).

Bei der einfachen Anwendung der Monte Carlo- Methode gibt es keine Strahlspaltung oder Wichtigkeitsproben. Sobald ein Strahl eine Oberfläche trifft, werden die Absorption-, die Reflexion- und den Transmissionskoeffizienten der Oberfläche als Wahrscheinlichkeiten verwendet, und die Strahlteile werden zufällig gewählt. Es gibt zwei wichtige Faktoren, um eine ausreichende Genauigkeit zu erreichen. Der erste Faktor ist die Anzahl der Strahlen und die zweite ist die verzichtende Schwelle der Strahlungsdichte. Je kleiner die Schwelle und je größer die Anzahl der Strahlen ist, desto besser ist die Genauigkeit. Dabei werden alle Lichtanteile berücksichtigt, die oberhalb einer definierten Schwelle liegen. Eine häufig verwendete Grenze ist die Schwelle der Strahlungsdichte. Strahlen in TracePro fangen bei einer Lichtquelle an, und werden dann dauernd gespalten, bis die Strahlungsdichte unter der

Schwelle fällt. Der Gebrauch einer niedrigen Schwelle bewirkt, dass die Strahlverfolgung langsam fortgesetzt wird. Daneben gibt es die Möglichkeit in TracePro, die Anzahl der Strahlen zu erhöhen.

Wird die alternative Strahlspaltung in die Kontrolloption in TracePro aktiviert, erzeugt es viele gespaltene Strahlteile für jeden Startstrahl nach jedem Zusammenstoß, alle mit ungefähr derselben Strahlungsdichte, die die Zahl von Strahlen erhöhen.

5. Schritt: Analyse

Das Analysemenü von TracePro bietet eine umfassende Palette an Hilfsmitteln zur Anzeige und Analyse der Ergebnisse der Strahlverfolgung an. Eine Vielfalt der Analyse-Auswahl ist verfügbar, um die Position, die Ausdehnung und die Distribution der resultierenden Strahlungsdichte der Strahlverfolgung zu berücksichtigen. Im Folgenden werden einige wichtige Menüs für die Lichttechnik in TracePro dargestellt.

- Irradiance (Bestrahlungsstärke)- und Illuminance (Beleuchtungsstärke)-Karten: Ein Irradiance-Karte zeigt die einfallende oder absorbierte Bestrahlungsstärke auf einer gewählten Oberfläche.
- Luminance (Leuchtdichte)-/Radiance (Strahldichte)-Karten: Die Ergebnisse des Raytracing können entweder als Leuchtdichte - oder Strahldichte -Karte mit photometrischen Einheiten dargestellt werden.
- Candela-Graphiken: Candela-Graphiken stellen die Lichtstärke des Lichtstroms pro Raumwinkel dar.

2.4 Simulation von Hohllichtleitersystemen

Um das Hohllichtleitersystem in TracePro zu simulieren, muss zunächst ein Körpermodell erzeugt werden. Hohllichtleitersysteme bestehen aus 2 Teilen: Scheinwerfer und Hohllichtleiter (HLG).

2.4.1 Scheinwerfer

Zur Lichteinkopplung mit Scheinwerfern werden in der Literatur unterschiedliche optische Systeme beschrieben [9, 93]: einseitige und doppelseitige Einspeisungen, zentrale Einspeisung und Einspeisung in gekrümmte HLG. Da HLG ein gewisses Beleuchtungsniveau unterhalb der lang ausgedehnte Leuchte (mehrere Meter) haben muss, sollte die speisende Lampe einen entsprechenden großen Lichtstrom emittieren. Die LVK des Scheinwerfers bestimmt den Auskopplungslichtstrom des Hohllichtleitersystems, deswegen wird eine zuverlässige Simulation benötigt.

Für die Simulation wurden ein spezieller Scheinwerfer (Abb. 3) berechnet. Als Lampenbestückung wurden zwei Typen ausgewählt: Osram Lampe HQI-T 400 W und Osram Lampe NAV-T 600 (oder 400) W [115, 116, 117, 118, 119, 128].

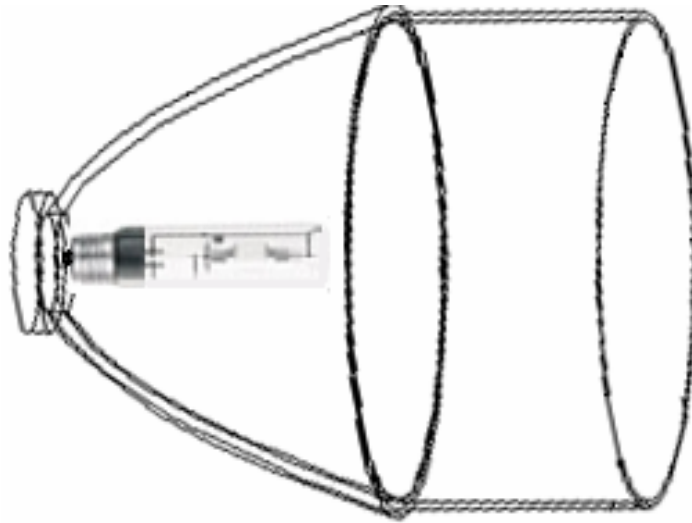


Abb. 3 Scheinwerfer und die Lampe von HLG

Der Scheinwerfer hat einen parabolischen Reflektor mit 0,22 m Länge und einen Zylinder mit 0,16 m Länge, der die Verbindung zum HLG sicher stellt. Der Reflexionsgrad der Innenfläche des Zylinders und des Reflektors wurde mit 0,85 (nach Angabe des Herstellers) angenommen.

Die Abbildungen 4, 5 zeigen die berechnete und gemessene LVK des Scheinwerfers in der C0-180 und der C90-270 Ebene mit der Lampe HQI 400-T W.

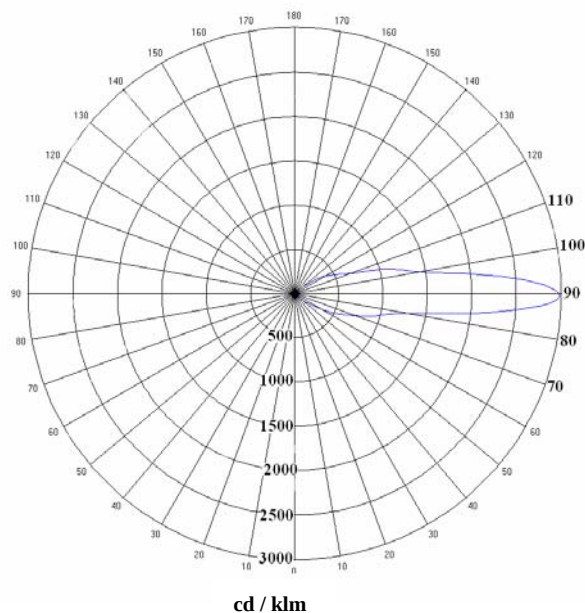


Abb. 4 Berechnete LVK des Scheinwerfers

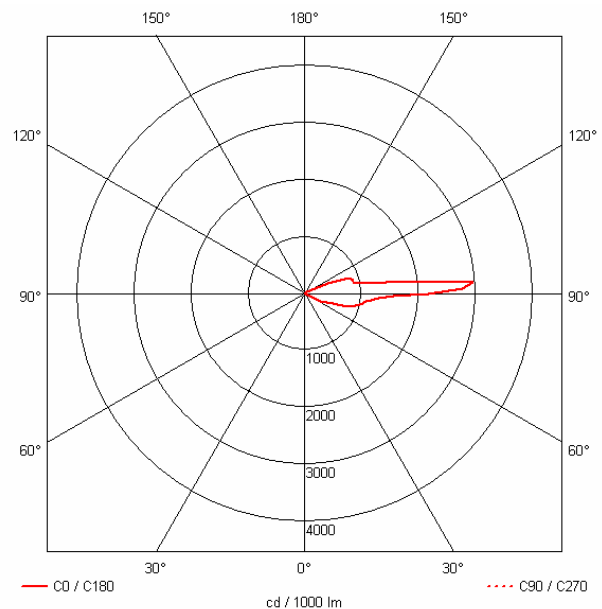


Abb. 5 Gemessene LVK des Scheinwerfers

2.4.2 Hohllichtleiter (HLG)

Ein Hohllichtleiter besteht aus den fünf genannten Bauteilen:

- Außenzylinder
- Extraktor
- Reflektor
- Prismenfolie (OLF)
- Endspiegel

Die Abb. 6 zeigt den Aufbau eines normalen Hohllichtleiters.

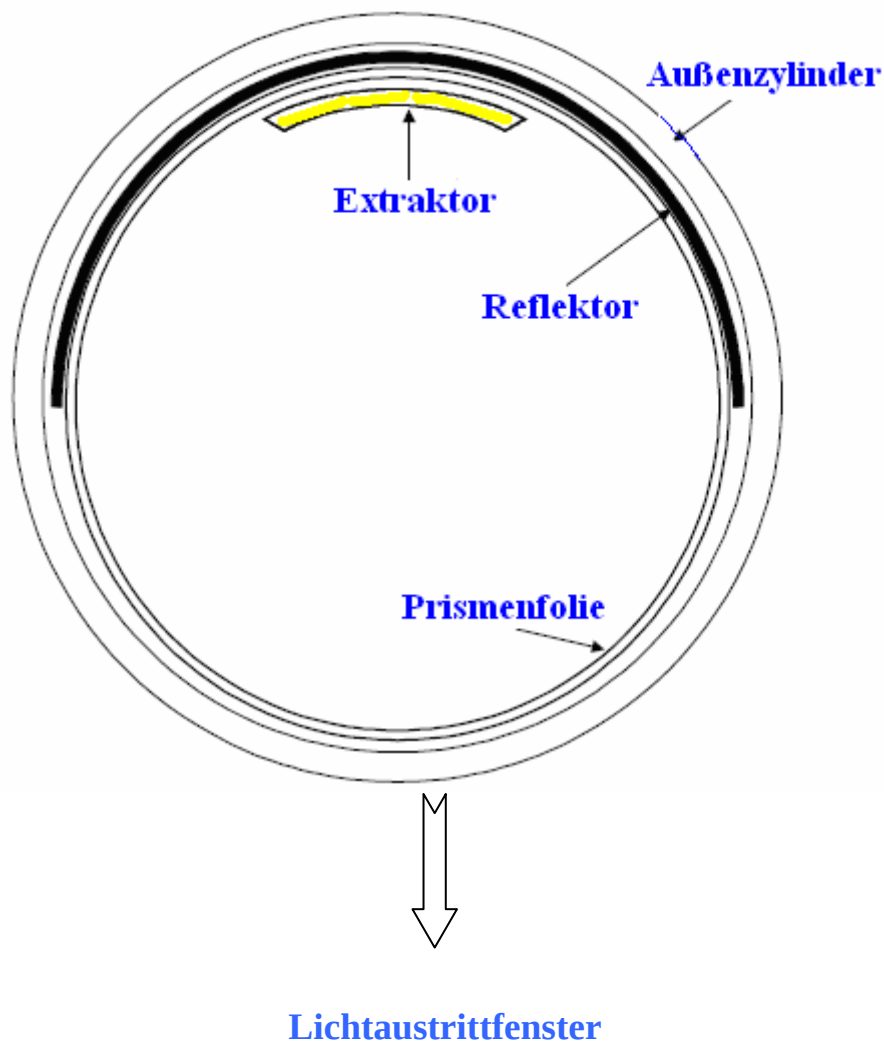


Abb. 6 Aufbau eines Prismen Lichtleiters

Im Folgenden werden die Hinweise für die Simulation jedes Teiles in TracePro vorgelegt. Ein Stück des HLG wird mit der Länge von 3 m und der Durchmesser von 0,3 m angenommen.

2.4.2.1 Außenzylinder

Der Außenzylinder (Schutzhülle) ist ein hohler Zylinder aus Polycarbonat (PC) mit dem Innenradius von 151 mm und einer Wandstärke von 2 mm bis 3 mm. Er schützt gegen mechanische Beschädigung und gegen äußeren Schmutz /1/.

2.4.2.2 Extraktor

Der Extraktor sorgt für den Lichtaustritt. Er besteht aus dem Spiegel oder weißem, diffus streuenden Material mit hohem Reflexionsgrad.

2.4.2.3 Reflektor

Da die HLG üblicherweise für eine direkte Beleuchtung verwendet wird, ist im Aufbau ein Reflektor vorgesehen, der die Abstrahlung nach oben verhindert. Dieser ist zwischen Schutzhülle und Prismenfolie angeordnet. Das Lichtaustrittsfenster wird vom Teil des Rohres gebildet, der nicht mit reflektierendem Material versehen ist. Typische Werte liegen hier zwischen 90° und 180°.

2.4.2.4 Prismenfolie

Bei der Prismenfolie (OLF: Optical Lighting Film) handelt es sich um einen transparenten Kunststoff aus PMMA oder PC mit einer äußerst präzisen prismatischen Struktur auf der einen und einer sehr glatten Oberfläche auf der anderen Seite. Die Dicke der Folie beträgt etwa 0,5 mm /1/. Abbildung 7 zeigt den Aufbau der Prismenfolie.

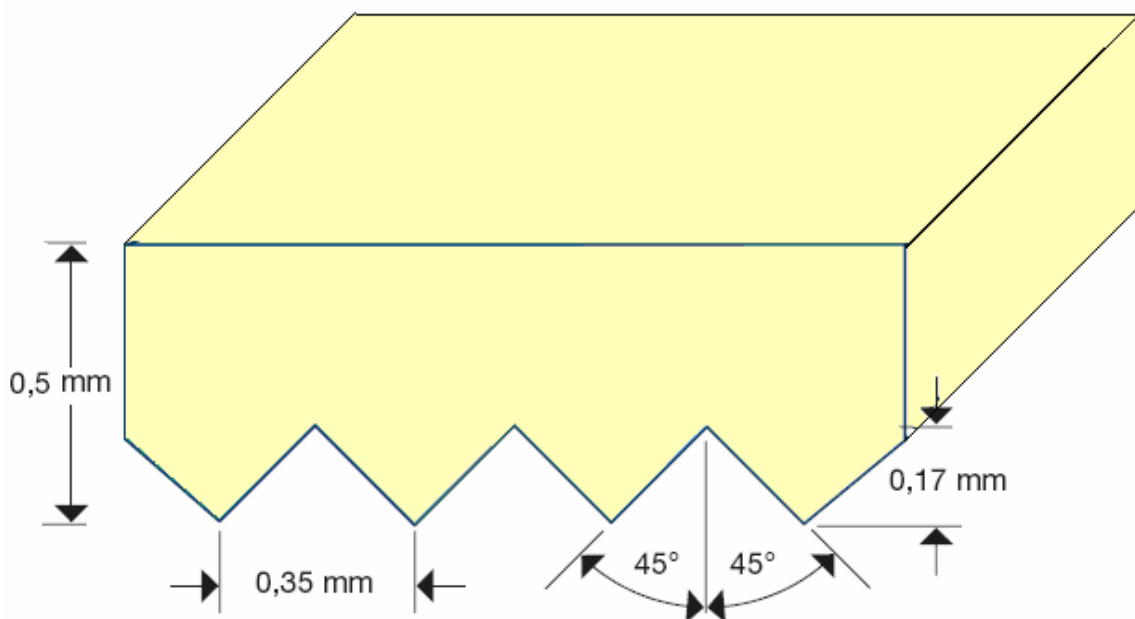


Abb. 7 Die Prismenfolie OLF

Für die Simulation in TracePro erweist sich der Aufbau als besonders schwierig für einen kreisförmigen OLF, da für einen Durchmesser von 300 mm ca. 2700 Zacken zu berücksichtigen sind (Abb. 8).

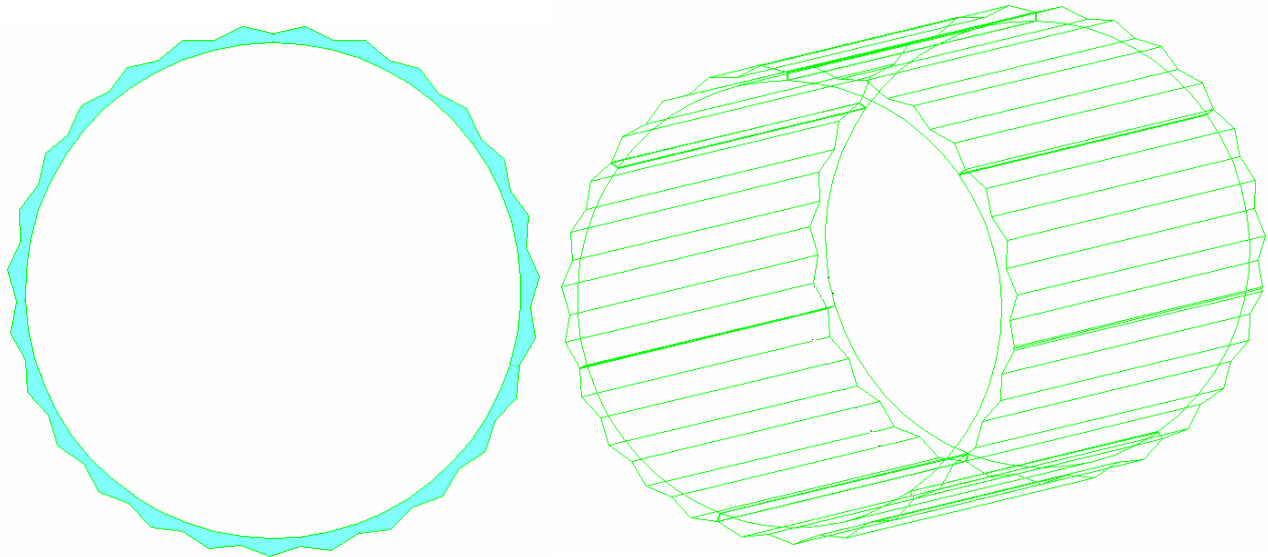


Abb. 8 Schematischer Aufbau des OLF des HLG

Um dieses Problem zu lösen, kann man mit Hilfe von zwei konzentrischen Kreisen zuerst die Koordinaten der Zacken festlegen und dann durch diese Punkte den Film OLF modellieren /112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 121, 128/.

2.4.2.5 Endspiegel

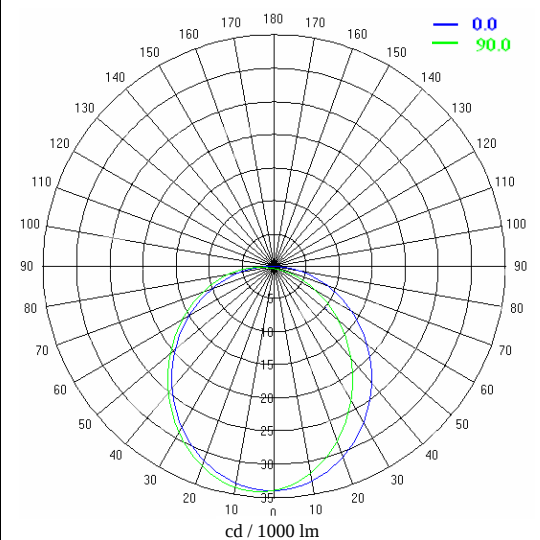
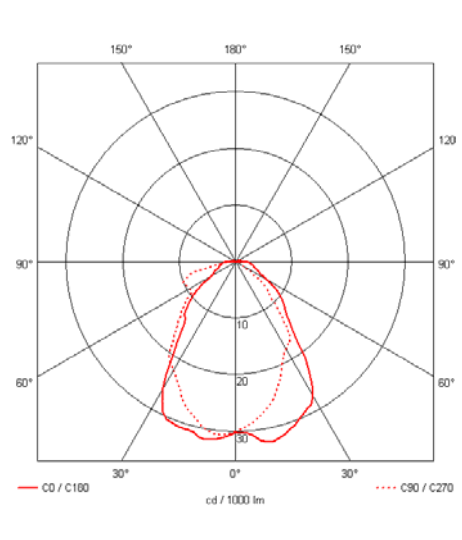
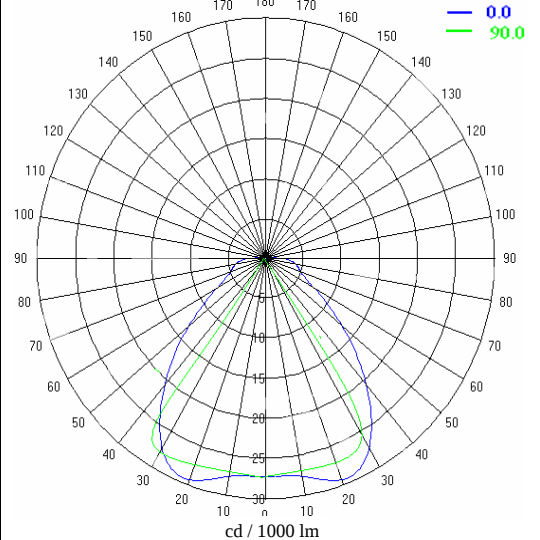
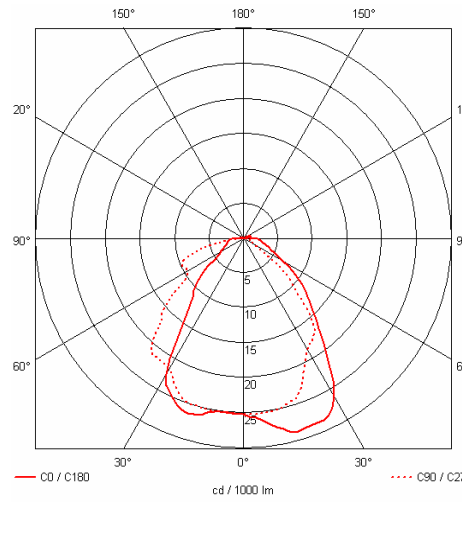
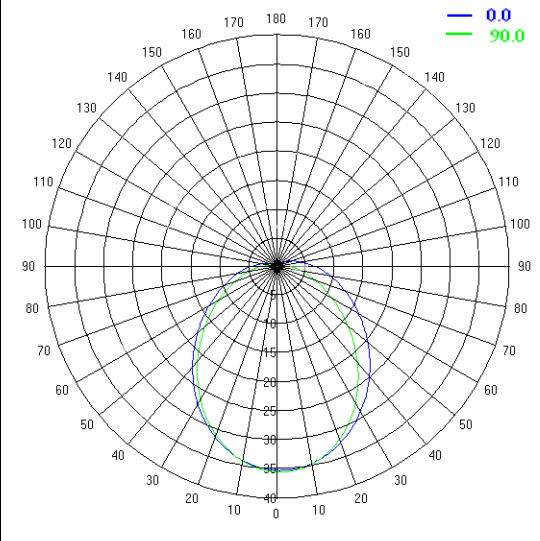
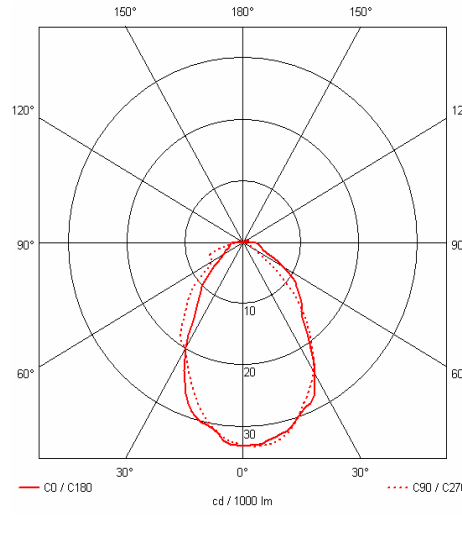
Da ein großer Teil des Einspeisungslichtes das Ende des HLG erreicht, wird ein Spiegel am Ende des HLG genutzt, um das Licht zunächst zurück und dann nach außen zu lenken. Zur besseren Lichtauskopplung des letzten Stücks des HLG hat deshalb der Endspiegel einen gemessenen Neigungswinkel von 45° , und der gemessene Reflexionsgrad des Endspiegels beträgt 85 %.

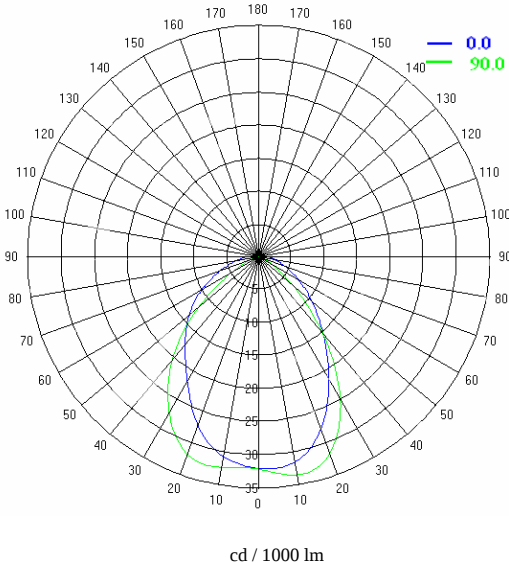
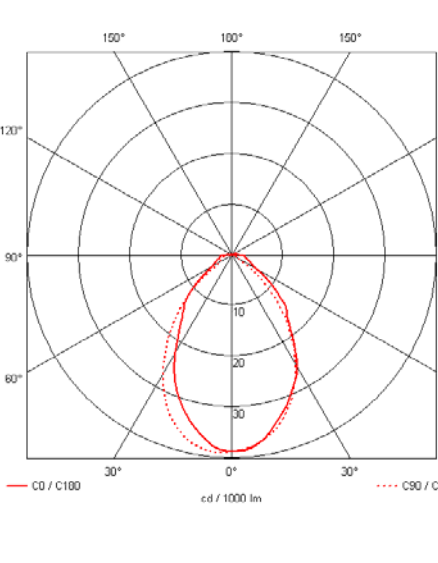
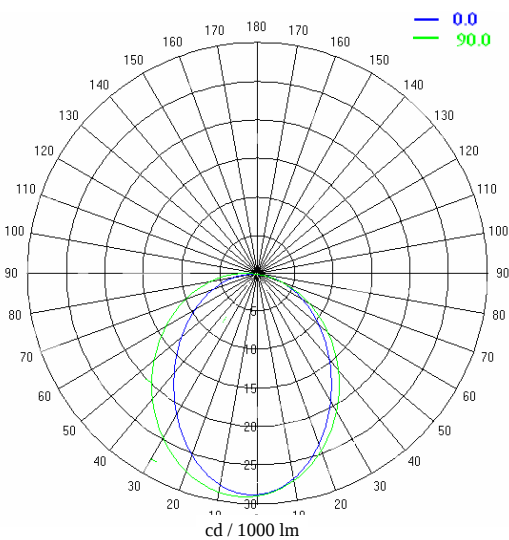
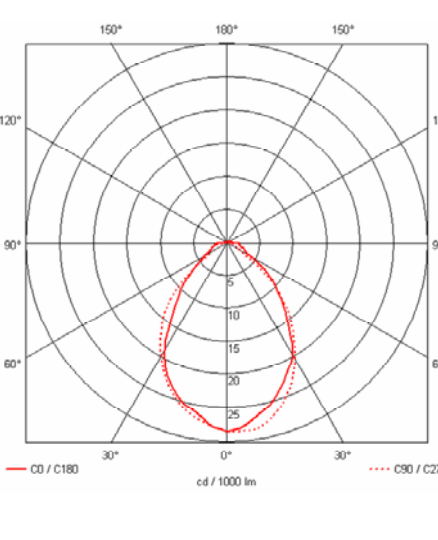
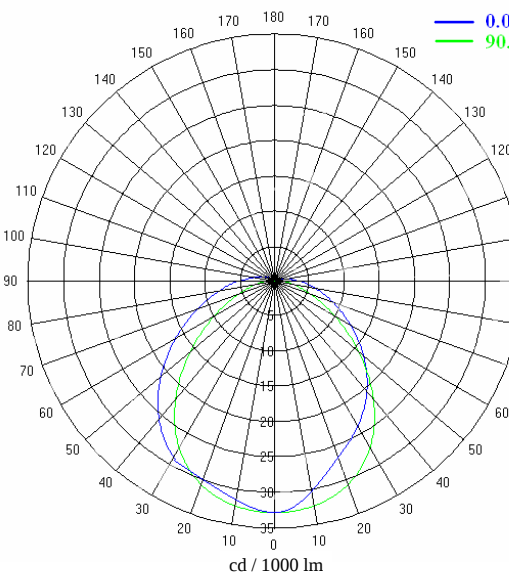
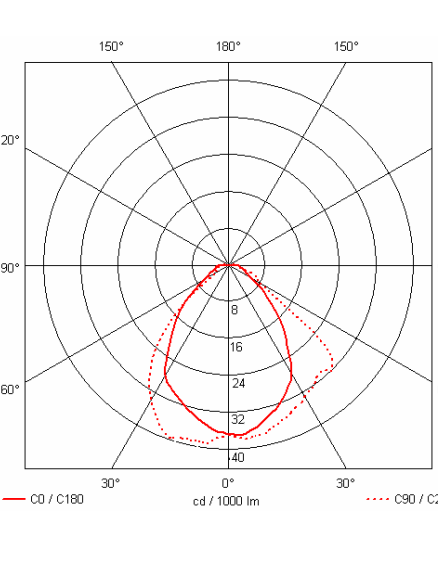
2.5 Vergleich der gemessenen und berechneten LVK

Um die Genauigkeit der Simulation und der Modellierung des Hohllichtleitersystems zu prüfen, wurden zwei Kriterium genutzt: Auskopplungslichtstrom und LVK. Dazu wurde für die Messungen und Berechnungen ein HLG mit der Länge von 6 m bei einem Durchmesser von 0,3 m in 6 Elemente mit der Länge von 1 m unterteilt.

In der Tabelle 1 sind die LVK des jeweiligen Elements C0-180, C90-270 für oben genannten HLG mit Extraktorfilm im Polardiagramm aufgezeichnet.

Tabelle 1 Gemessene und berechnete LVK 6 m HLG mit Extraktorfilm

Stück Nr.	Simulation	Messung
1		
2		
3		

Stück Nr.	Simulation	Messung
4	 Simulation diagram for piece 4. The diagram is a circular beam spread plot with concentric circles representing beam diameter in cm (0 to 30) and radial lines representing angles in degrees (0 to 180). Two curves are shown: a blue curve for 0.0 degrees and a green curve for 90.0 degrees. The curves are symmetric about the 0-degree axis. The x-axis is labeled 'cd / 1000 lm'.	 Measurement diagram for piece 4. The diagram is a circular beam spread plot with concentric circles representing beam diameter in cm (0 to 30) and radial lines representing angles in degrees (0 to 180). Two curves are shown: a solid red curve for C0 / C100 and a dotted red curve for C90 / C270. The curves are symmetric about the 0-degree axis. The x-axis is labeled 'cd / 1000 lm'.
5	 Simulation diagram for piece 5. The diagram is a circular beam spread plot with concentric circles representing beam diameter in cm (0 to 30) and radial lines representing angles in degrees (0 to 180). Two curves are shown: a blue curve for 0.0 degrees and a green curve for 90.0 degrees. The curves are symmetric about the 0-degree axis. The x-axis is labeled 'cd / 1000 lm'.	 Measurement diagram for piece 5. The diagram is a circular beam spread plot with concentric circles representing beam diameter in cm (0 to 30) and radial lines representing angles in degrees (0 to 180). Two curves are shown: a solid red curve for C0 / C180 and a dotted red curve for C90 / C270. The curves are symmetric about the 0-degree axis. The x-axis is labeled 'cd / 1000 lm'.
6	 Simulation diagram for piece 6. The diagram is a circular beam spread plot with concentric circles representing beam diameter in cm (0 to 30) and radial lines representing angles in degrees (0 to 180). Two curves are shown: a blue curve for 0.0 degrees and a green curve for 90.0 degrees. The curves are symmetric about the 0-degree axis. The x-axis is labeled 'cd / 1000 lm'.	 Measurement diagram for piece 6. The diagram is a circular beam spread plot with concentric circles representing beam diameter in cm (0 to 40) and radial lines representing angles in degrees (0 to 180). Two curves are shown: a solid red curve for C0 / C180 and a dotted red curve for C90 / C270. The curves are symmetric about the 0-degree axis. The x-axis is labeled 'cd / 1000 lm'.

Die Simulation mit TracePro hat gegenüber der Messung den Vorteil, dass mit ihr die gesamte LVK des HLG unabhängig von der Länge bestimmt werden kann. Nach der Methode über LVK-Messungen werden einzelne Abschnitte des HLG vermessen und anschließend als Einzeleuchte behandelt und in Lichtplanungsprogrammen verwendet.

Die Abbildung 9 stellt die gesamte berechnete LVK eines HLG mit der Länge von 6 m mit Extraktorfilm dar.

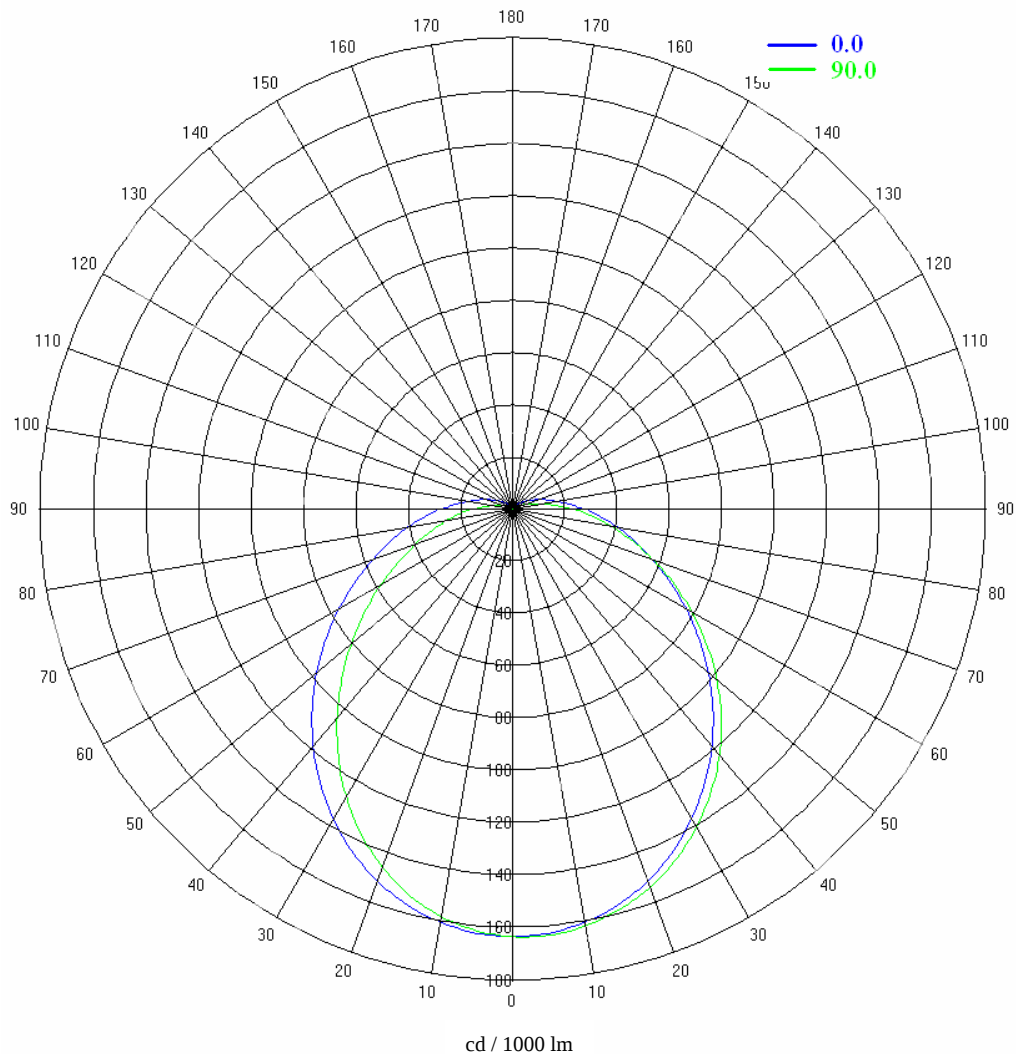
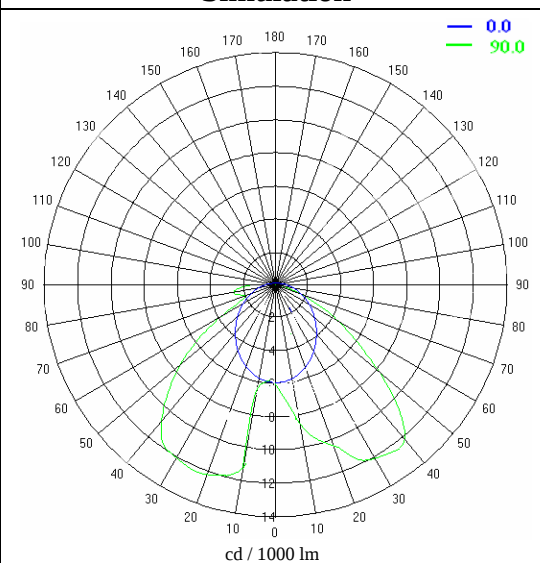
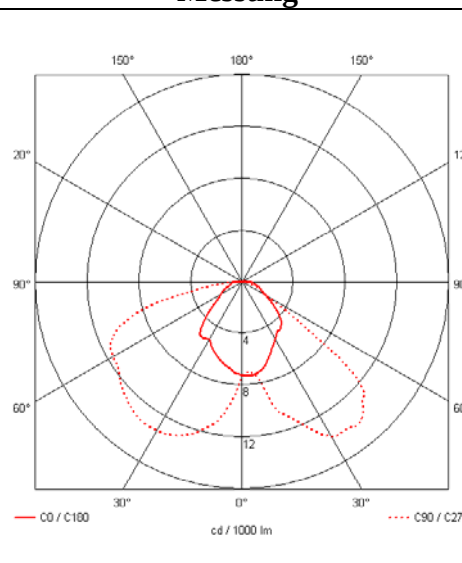
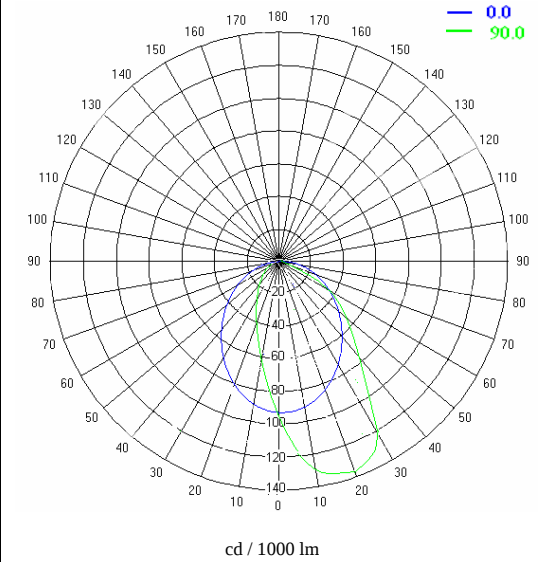
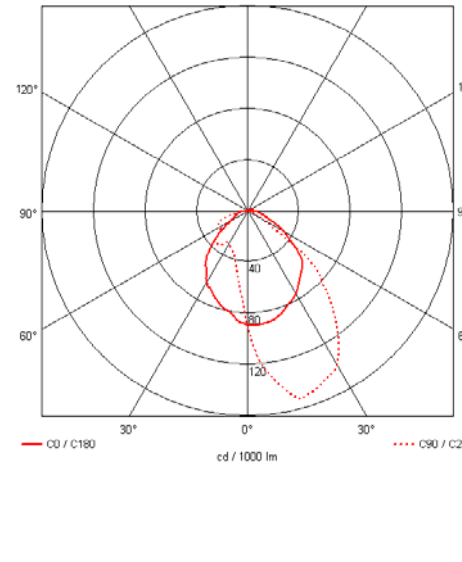
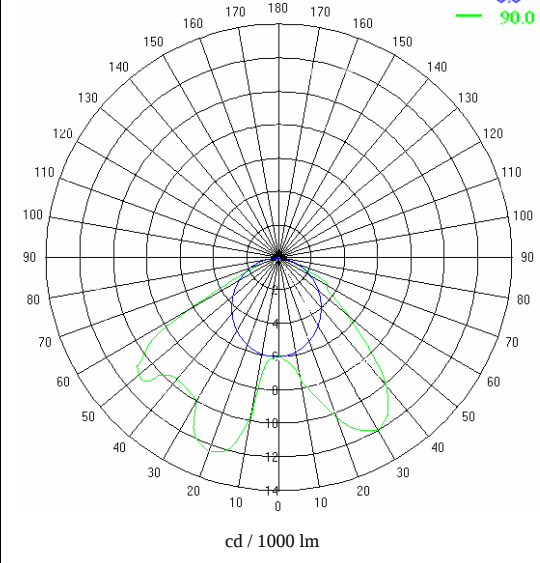
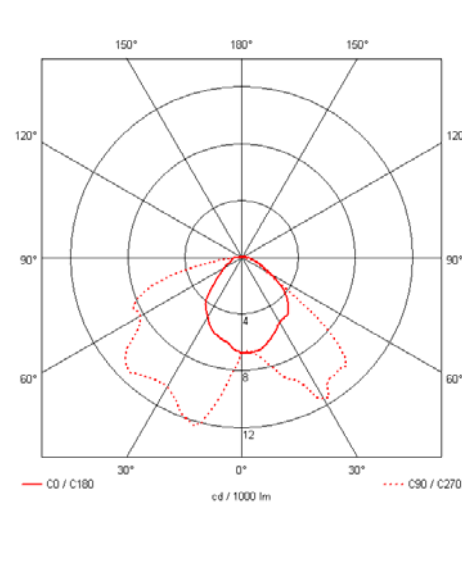
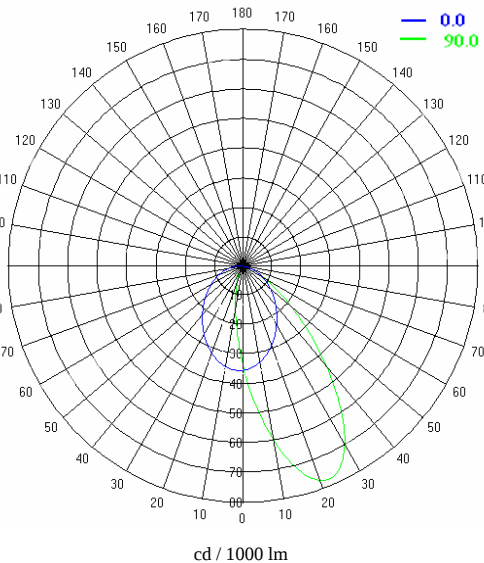
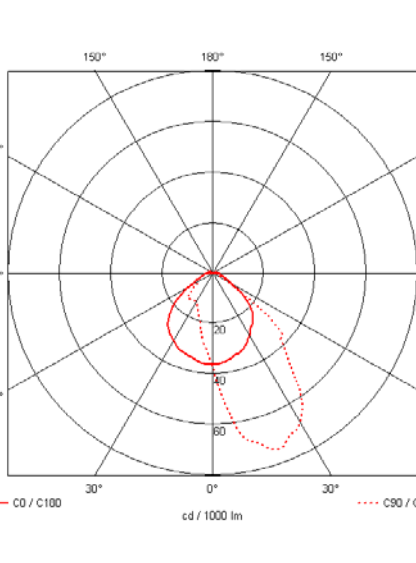
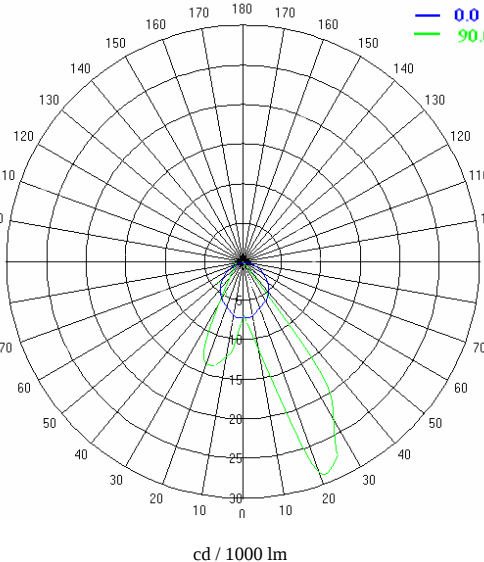
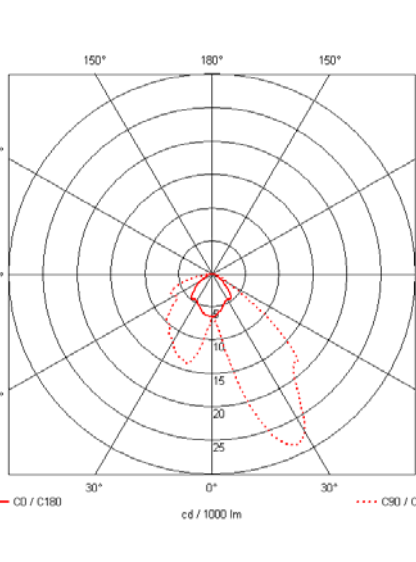
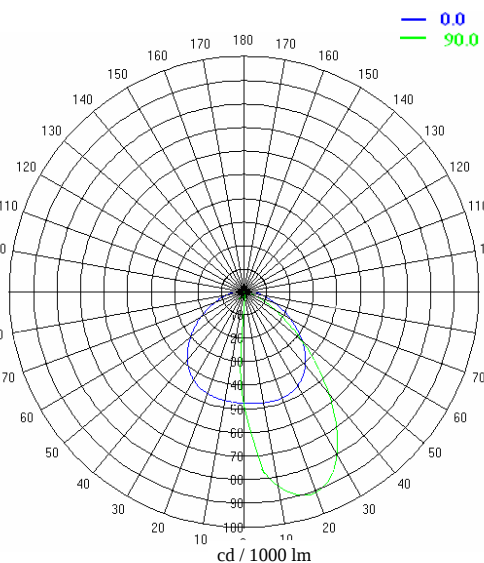
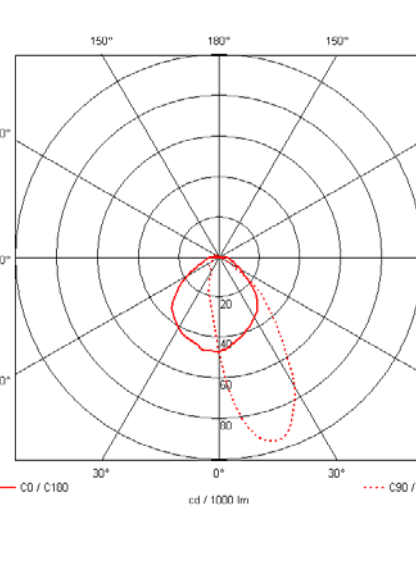


Abb. 9 Gesamte berechnete LVK 6 m HLG mit Filmextraktor

In der Tabelle 2 sind die LVK des jeweiligen Elements in C0-180, C90-270 für einen 6 m HLG mit Spiegelextraktor zusammengestellt.

Tabelle 2 Gemessene und berechnete LVK 6 m HLG mit Spiegelextraktor

Stück Nr.	Simulation	Messung
1	 cd / 1000 lm	 cd / 1000 lm
2	 cd / 1000 lm	 cd / 1000 lm
3	 cd / 1000 lm	 cd / 1000 lm

Stück Nr.	Simulation	Messung
4		
5		
6		

Die Abbildung 10 stellt die gesamte berechnete LVK von HLG mit der Länge von 6 m mit Spiegelextraktor dar.

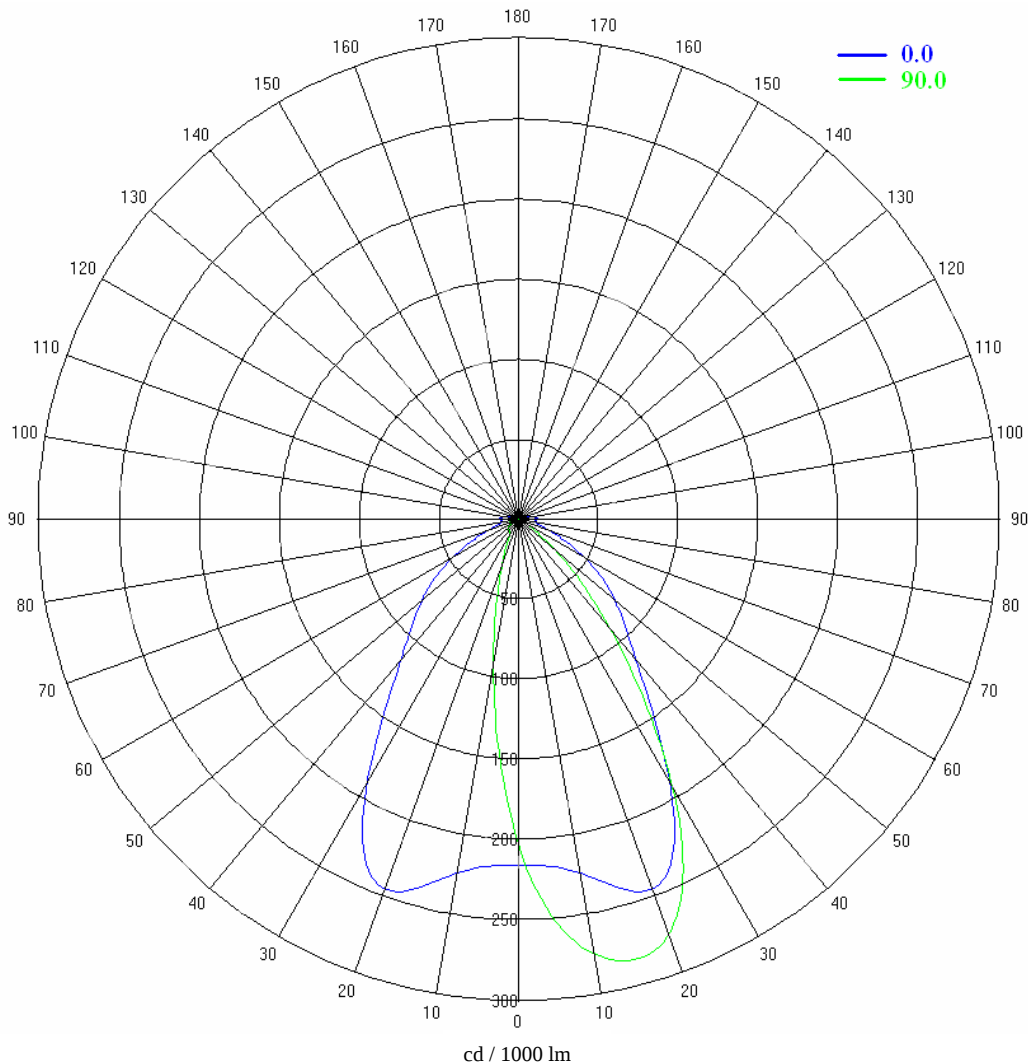


Abb. 10 Gesamte berechnete LVK 6 m HLG mit Spiegelextraktor

Wie aus Tabelle 1 und 2 zu entnehmen ist, sind die Unterschiede zwischen gemessenen und berechneten LVK nur unwesentlich. Die maximale relative Abweichung des gemessenen und berechneten Lichtstroms beträgt 8 %. Die Ursache der Abweichung sind:

- Schmutzpartikel (Verunreinigungen) auf den Oberflächen aller Elemente vor allem der Schutzhülle
- die Oberfläche der Prismenfolie ist nicht ideal glatt
- Halteschienen und mechanische Verbindung
- Die Lampe im Scheinwerfer ist nicht exakt zentriert, (siehe gemessene LVK in Abb. 5)

Zusammenfassend kann man nunmehr sicher sein, dass die Simulation und die Modellierung des Hohllichtleitersystems in TracePro erfolgreich ist und man weitere Untersuchungen zu anderen Problemen mit HLG zur Optimierung durchführen kann.

3 Entwicklungen zum Aufbau von HLG

3.1 Einsatz von Extraktoren im HLG

Für die Hersteller und Planer von Lichtsystemen mit HLG ist eine gleichmäßige Lichtauskopplung des eingespeisten Lichtstroms entlang des gesamten HLG von besonderer Bedeutung. Um das Licht entlang des Hohllichtleiters auszukoppeln, muss ein Extraktor verwendet werden, da sonst wegen der Totalreflexion an der nur ein geringer Anteil des Lichtes aus dem Hohllichtleitersystem Prismenfolie austreten kann. Damit bestimmt der Extraktor die LVK des ausgekoppelten Lichtes des HLG.

Derzeit sind hierfür zwei verschiedene Extraktoren /1, 130/ im Einsatz:

- 1- Ein diffus reflektierender Extraktor, der als "Extraktorfilm" bezeichnet wird
- 2- Ein Spiegelextraktor

3.1.1 Extraktorfilm

Der Extraktorfilm besteht aus weißem, diffus streuenden Material mit hohem Reflexionsgrad (z.B. Scotchcal Farbfolie 100-20 weiß, matt mit 86 % Reflexionsgrad oder LEF (Light Enhancement Film) 3635-100 mit 96 % Reflexionsgrad), der das lambertsche Gesetz erfüllt /1/. Da der Extraktor auf der Innenfläche des HLG ähnlich wie ein Film aufgeklebt wird, wird er Extraktorfilm genannt. Das Extraktorverhältnis (Angabe in Prozent) ist festgelegt als der Quotient aus der Extraktorfläche zur Gesamtoberfläche des jeweiligen HLG Abschnitts /126/.

$$E_{ex,n} = \frac{A_{Ex,n}}{A_{Fl,n}} \quad (4)$$

n : laufende Nummer eines Abschnitts

$E_{ex,n}$: Extraktorverhältnis des Abschnitts n

$A_{Ex,n}$: Fläche des Extraktors im Abschnitt n

$A_{Fl,n}$: Gesamtoberfläche des Abschnitts n

Das Extraktorverhältnis des jeweiligen Abschnitts bestimmt den ausgekoppelten Teillichtstrom und die Gleichmäßigkeit der LVK. In der Abbildung 11 ist der gemessene Teillichtstrom des jeweiligen Abschnitts eines HLG (Länge: 6 m) dargestellt, wenn das Extraktorverhältnis für alle Abschnitte konstant (10 %, 15 % und 20 %) bleibt.

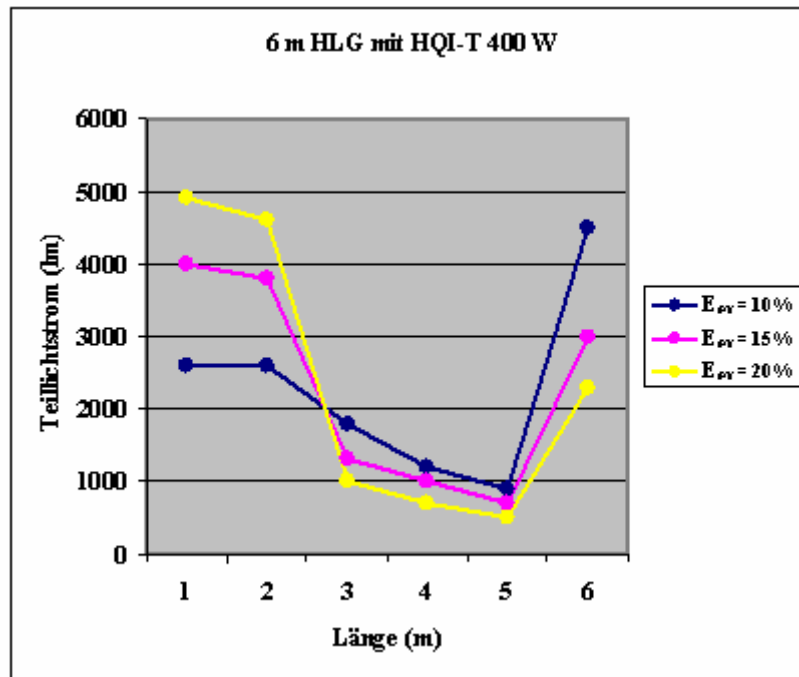


Abb. 11 Gemessene Teillichtströme für 1 m lange Abschnitte eines 6 m HLG mit einem konstanten Extraktorverhältnis

Wie Abbildung 11 zeigt, kann eine homogene Lichtausstrahlung entlang des HLG nicht mit einem konstanten Extraktorverhältnis erreicht werden. So sollte ein breit verlaufender Extraktor verwendet werden, der im ersten Abschnitt ein minimales bzw. im letzten Abschnitt ein maximales Extraktorverhältnis vorweist, um den relativen Anteil des auszukoppelnden Lichtstroms über die Länge des HLG zu vergrößern. Da sich am Ende des HLG ein Endspiegel befindet, kann im vorletzten Abschnitt des HLG ein maximaler Wert des Extraktorverhältnisses eingestellt werden. Die Höhe der maximal mit Extraktorfilm abgedeckten Oberfläche im Innern des HLG hängt von dem Auskoppelungsfenster des HLG ab. Der Extraktorfilm darf das Auskoppelungsfenster nicht bedecken, da das Licht sonst nicht austreten kann. Abbildung 12 stellt einen breit verlaufenden Extraktor dar.

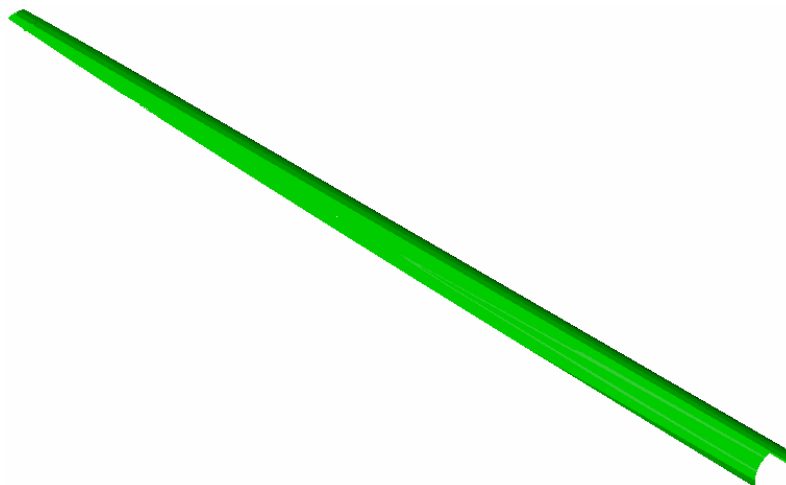


Abb. 12 Breit verlaufender Extraktor

In Tabelle 3 sind der gemessene Teillichtstrom und das Extraktorverhältnis des jeweiligen Abschnitts eines 6 m langen HLG aufgeführt.

Tabelle 3 Gegenüberstellung des ausgekoppelten Lichtstroms und des Extraktorverhältnisses eines einzelnen HLG-Segmentes

		Segment 1	Segment 2	Segment 3	Segment 4	Segment 5	Segment 6
Situation 1	Lichtstrom in lm	1700	4300	2200	1900	1000	2400
	Extraktorverhältnis in %	7	15	23	30	40	50
Situation 2	Lichtstrom in lm	2000	4200	2100	1800	900	2600
	Extraktorverhältnis in %	8	16	25	32	41	50
Situation 3	Lichtstrom in lm	2400	4200	1900	1800	800	2500
	Extraktorverhältnis in %	9	17	26	33	42	50
Situation 4	Lichtstrom in lm	2700	4100	1900	1800	900	2300
	Extraktorverhältnis in %	10	18	27	34	43	50
Situation 5	Lichtstrom in lm	2900	4100	1900	1800	700	2300
	Extraktorverhältnis in %	11	19	28	35	43	50

Abbildung 13 zeigt die gemessenen Lichtströme des einzelnen Segmentes, die in der Tabelle 3 dargestellt sind.

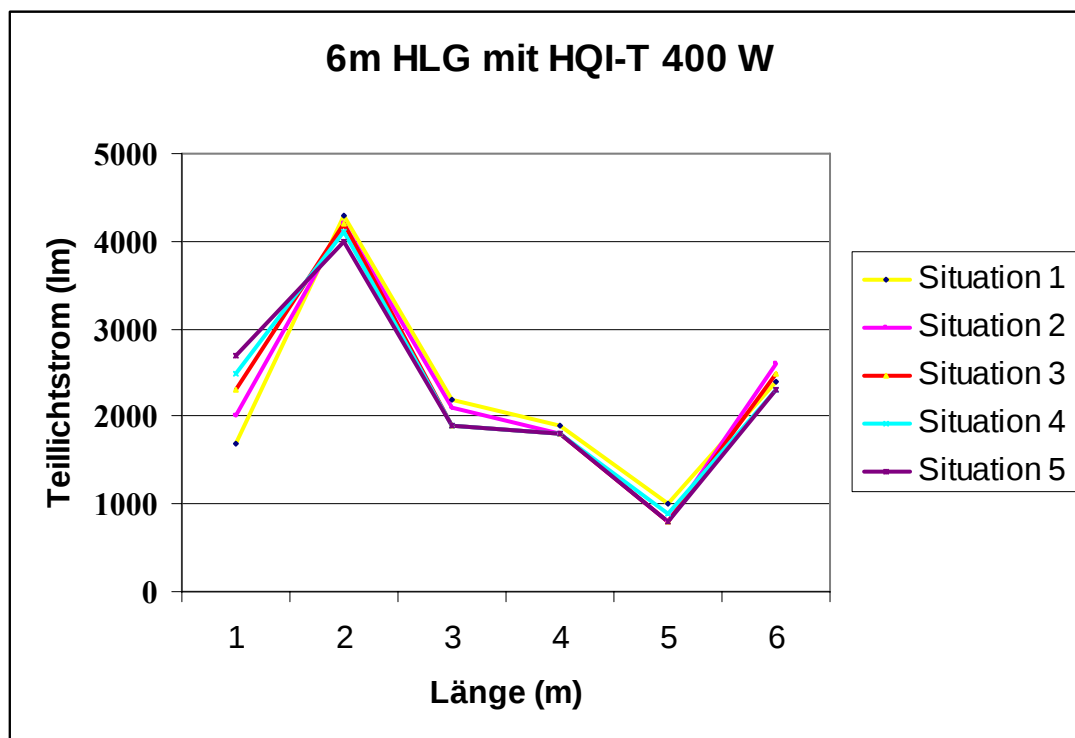


Abb. 13 Gemessene Teillichtströme für 1 m lange Abschnitte des 6 m HLG in Abhängigkeit der Länge bei verschiedenen Extraktorverhältnissen

Wie Abbildung 13 zeigt, ist der ausgekoppelte Lichtstrom des jeweiligen Abschnitts des HLG mit einem breit verlaufenden Extraktor homogener als bei Einsatz eines Extraktors mit konstantem Extraktorverhältnis (Abb. 11).

3.1.2 Spiegelextraktor

Alternativ kann ein Spiegelextraktor als Ersatz für den Extraktor des HLG eingesetzt werden. Dies hat große Vorteile für die Hersteller, weil der Spiegelextraktor schnell und einfach im Innern des HLG eingesetzt werden kann. Der Reflexionsgrad des Spiegelextraktors steigt auf bis zu 89 %. Abbildung 14 zeigt den gemessenen Teillichtstrom des jeweiligen Abschnitts eines 6 m langen HLG mit zwei Spiegelextraktoren (in den Segmenten 2 und 4) zusätzlich zum Endspiegel.

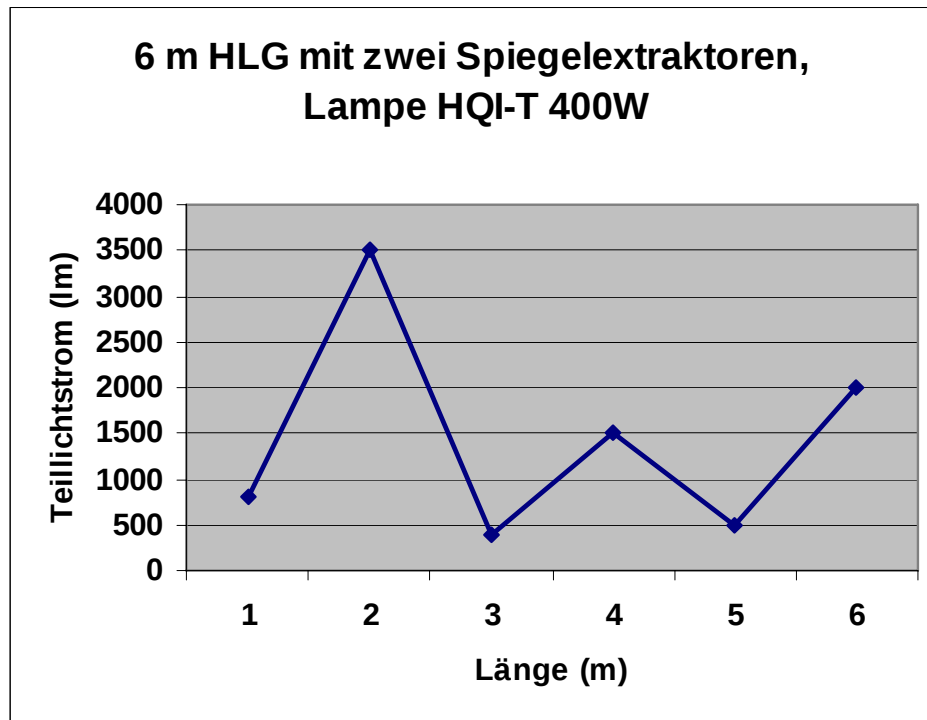


Abb. 14 Teillichtströme des jeweiligen Abschnitts eines 6 m HLG mit Spiegelextraktoren

3.2 Vergleich der verschiedenen Extraktoren

Trotz der unterschiedlich austretenden Teillichtströme eines einzelnen Segments des HLG bei Einsatz eines diffus reflektierenden Extraktors entweder eines Extraktors mit konstantem Extraktorverhältnis oder eines breit verlaufenden Extraktors hat jeder Abschnitt eine symmetrische LVK. Die LVK eines Segments mit Spiegelextraktoren hat eine stark asymmetrische Ausstrahlungscharakteristik. Abbildungen 15 und 16 stellen die gemessenen LVK alternativ für ein Segment mit Extraktorfilm und einem Segment mit Spiegelextraktor

dar. Der Unterschied besteht nicht nur in der räumlichen Verteilung, sondern auch im Absolutwert der einzelnen Lichtstärke.

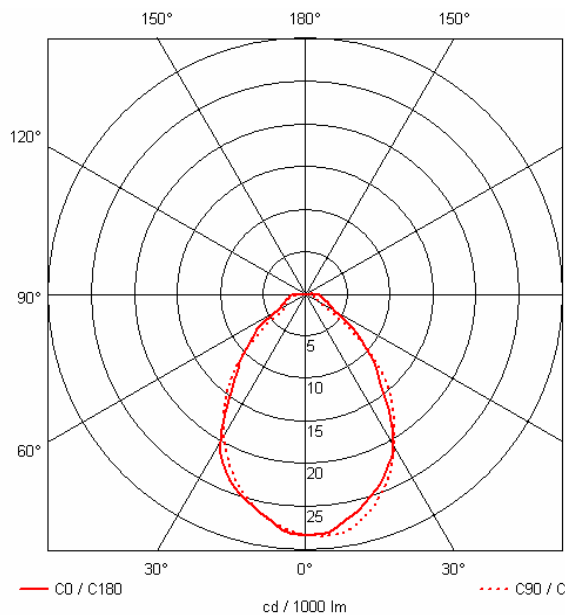


Abb. 15 LVK eines Segmentes mit Extraktorfilm

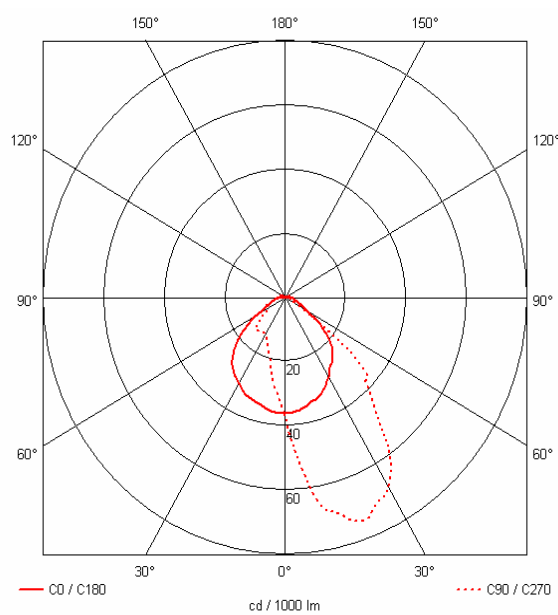


Abb. 16 LVK eines Segmentes mit Spiegelextraktor

3.3 Neue Entwicklung

Wie bereits dargestellt, ist weder der Einsatz eines Spiegelextraktors noch eines Extraktorfilms eine optimale Lösung, da diese zwar den austretenden Lichtstrom erhöhen, jedoch eine symmetrische strahlende LVK und einen ausgekoppelten Lichtstrom pro Längeneinheit des HLG nicht ermöglichen. Dadurch kann keine gleichmäßige Beleuchtung auf der zu beleuchtenden Nutzebene realisiert werden. Gleichzeitig beschränkt dieser Nachteil den Einsatz eines HLG im Innenraum.

Hier wird ein neuer Ansatz präsentiert, der die Nachteile der oben genannten Extraktoren nicht aufweist. Dieser Ansatz basiert auf den separaten Einsatz eines diffus reflektierenden Extraktors für jedes Segment eines HLG ähnlich wie der Einsatz von Spiegelextraktoren. Jeder separate Extraktor ist wie ein Rechteck aufgebaut, dessen Breite unverändert konstant bleibt, aber dessen Länge abhängig von der Länge des HLG und der LVK des Scheinwerfers variiert.

Aufgrund neuer Entwicklungen zeigt die Abbildung 17 die Extraktoren eines einzelnen Abschnitts eines 9 m HLG.

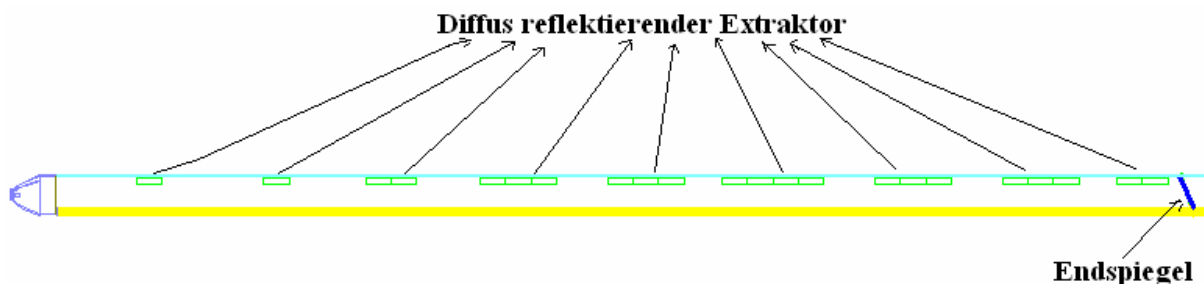


Abb. 17 Ein 9m HLG mit einem separaten Extraktor

Die Vorteile durch den Einsatz eines separaten Extraktors sind wie folgt:

- ähnlicher Lichtstrom pro Längeneinheit des HLG;
- symmetrische LVK des jeweiligen Abschnitts des HLG ;
- leichte Montage im Vergleich zu einem HLG mit Extraktorfilm;
- verbesserter Wirkungsgrad des Hohllichtleitersystem im Vergleich zu einem HLG mit Spiegelextraktoren

In den Abbildungen 18 und 19 sind die gemessenen LVK in C0 / C180- und C90 / C270-Ebene sowie der gemessene Lichtstrom der einzelnen Abschnitte graphisch dargestellt, sie sind annähernd symmetrisch.

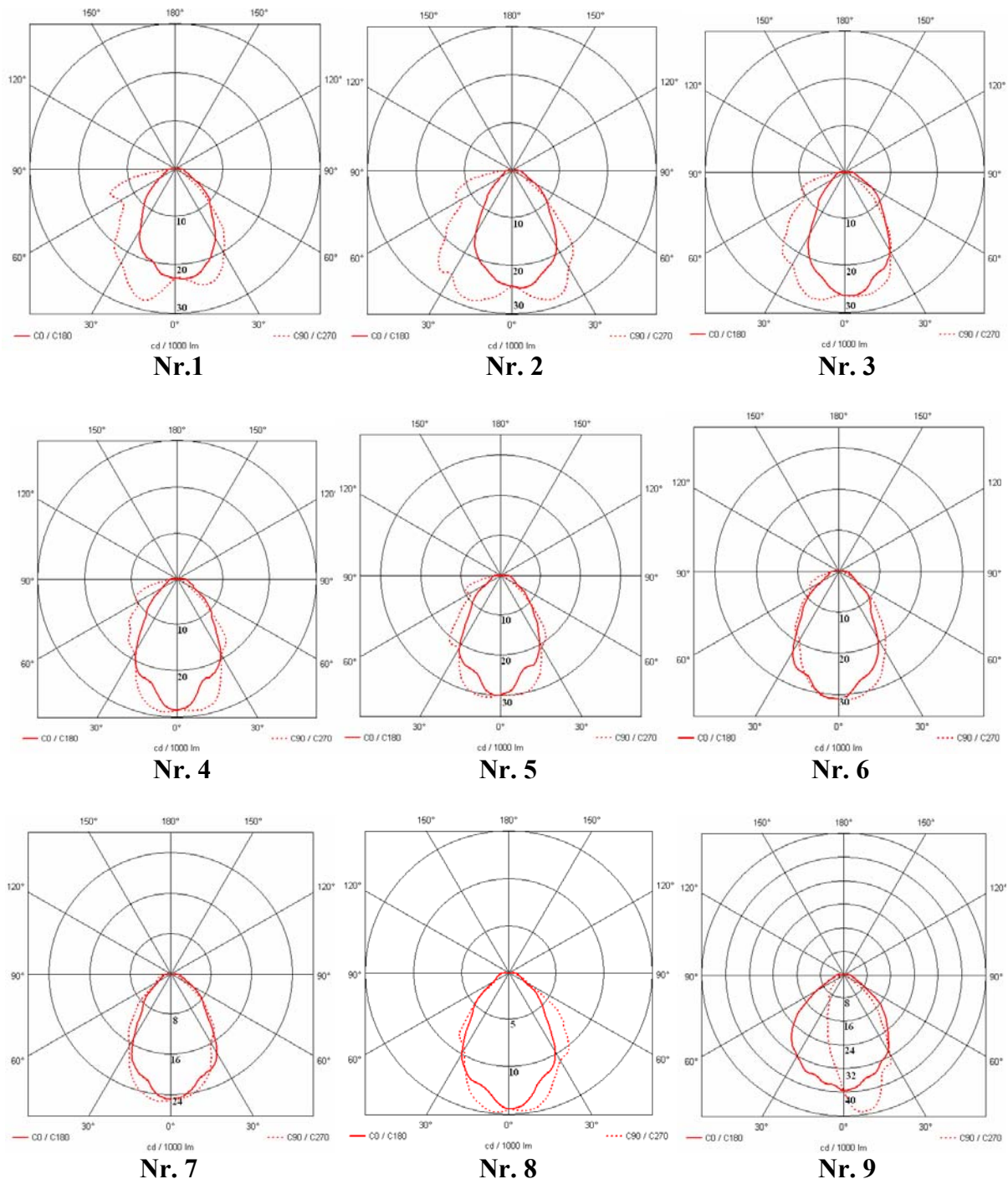


Abb. 18 Gemessene LVK des jeweiligen Abschnitts des HLG

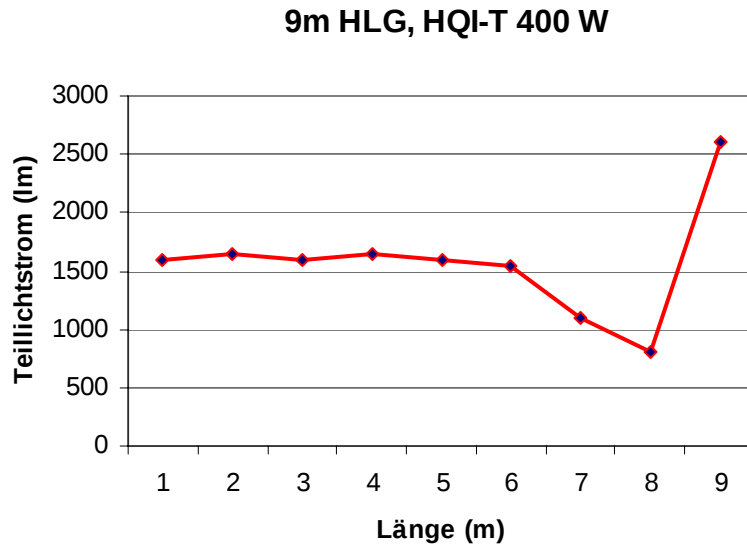


Abb. 19 Gemessener Teillichtstrom des 9 m HLG mit separaten Extraktor

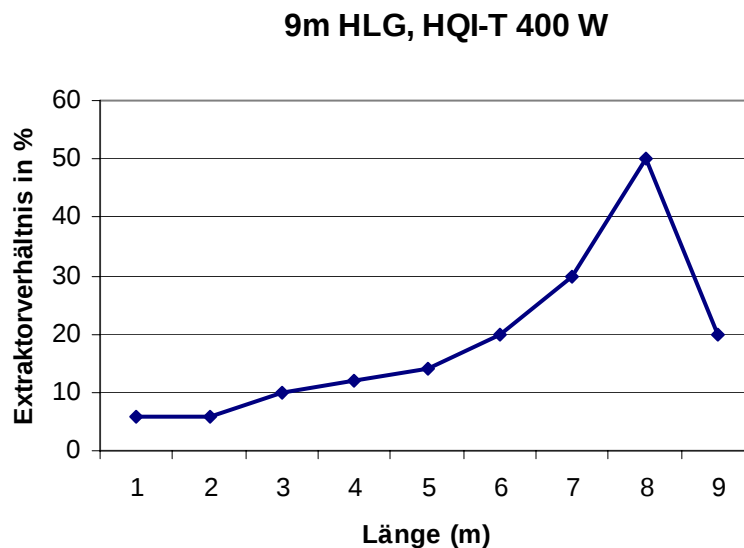


Abb. 20 Extraktorverhältnis der jeweiligen Segmente eines 9 m HLG

Aus den Ergebnissen des untersuchten Hohllichtleiters in Abb. 19 und 20 ergeben sich folgende Schlüsse:

- 1- Je größer das Extraktorverhältnis des Abschnittes n ist, desto kleiner ist die Lichteinkopplung des Abschnitts $n+1$.
- 2- Aufgrund des Einflusses des Endspiegels eignet sich für den letzten Abschnitt ein kleiner Extraktor.
- 3- Die Auskopplungslichtströme der Abschnitte 7 bzw. 8 lassen sich mit dem Extraktorverhältnis nicht beliebig erhöhen. Z. B. beträgt die Lichtauskoppelung des vorletzten Abschnitts (Nr. 8) bei Extraktorverhältnissen von $E_{\text{ex}, 8} = 50 \%$, $\Phi_8 = 800$ lm, und für $E_{\text{ex}, 8} = 70 \%$ ergibt sich $\Phi_8 = 900$ lm.

- 4- Die Reflexionseigenschaften und die Form des Endspiegels beeinflussen die Größe des ausgekoppelten Lichtstroms und die LVK des letzten und vorletzten Abschnitts.
- 5- Wegen des starken Einflusses der LVK des Scheinwerfers und der Länge des HLG, ist die Ermittlung geeigneter Extraktorverhältnisse mittels einer Simulation wünschenswert.

3.4 Lichtverluste

Nach Abschluss der umfangreiche Messungen weist ein HLG mit einem Durchmesser von 0,3 m mit Spiegelextraktor einen Wirkungsgrad kleiner als 37 % bzw. bei Einsatz eines Extraktorfilm (LEF) 53 % auf. Tabelle 4 zeigt den gemessenen Wirkungsgrad des HLG mit dem Endspiegel für verschiedene Längen, Scheinwerfer, Auskopplungsfenster und Extraktoren.

Tabelle 4 Gemessene Wirkungsgrad von HLG mit 0,3 m Durchmesser

Nr.	Länge (in m)	Lampe	Extraktorenart	Auskopplungsfenster (in Grad)	Gesamt- lichtstrom (in lm)	Betriebswirkungsgrad (in %)
1	18	HQI-T 400 W	3 Spiegel	120	9100	34
2	18	NAV-T 400 W	3 Spiegel	120	11000	31
3	18	NAV-T 600 W	3 Spiegel	120	17700	31
4	18	HQI-T 400 W	2 Spiegel	120	8500	32
5	18	NAV-T 400 W	2 Spiegel	120	10000	28
6	18	NAV-T 600 W	2 Spiegel	120	16000	28
7	15	HQI-T 400 W	2 Spiegel	105	9100	34
8	15	NAV-T 400 W	2 Spiegel	105	10300	29
9	15	HQI-T 400 W	2 Spiegel	120	8900	33
10	15	NAV-T 400 W	2 Spiegel	120	12000	33
11	12	HQI-T 400 W	2 Spiegel	120	8800	33
12	12	NAV-T 400 W	2 Spiegel	120	11300	32
13	12	NAV-T 600 W	2 Spiegel	120	17300	30
14	12	NAV-T 400 W	1 Spiegel	120	9500	27
15	9	HQI-T 400 W	2 Spiegel	120	8800	33
16	9	HQI-T 400 W	3 Spiegel	120	9100	34
17	9	HQI-T 400 W	4 Spiegel	120	9800	37
18	9	HQI-T 400 W	ohne	120	7400	28
19	9	HQI-T 400 W	Extraktorfilm	120	14200	53
20	6	HQI-T 400 W	ohne	120	7600	29
21	6	HQI-T 400 W	2 Spiegel	120	8900	33
22	6	HQI-T 400 W	Extraktorfilm	120	14000	53

Der gemessene Reflexionsgrad des Spiegels, d. h. sowohl des Endspiegels als auch des Spiegelextraktors, beträgt 0,85, und der gemessene Reflexionsgrad des Reflektors beträgt 0,8. Der Lichtstrom der einzelnen Scheinwerferlampen ist nachfolgend aufgeführt:

Einspeisungslichtstrom des HLG mit NAV-T 400 W: 35500 lm

Einspeisungslichtstrom des HLG mit NAV-T 600 W: 57000 lm

Einspeisungslichtstrom des HLG mit HQI-T 400 W: 26600 lm

Aufgrund der Struktur des HLG verursachen die nachfolgenden Elemente einen Lichtverlust:

- 1- Prismenfolie
- 2- Endspiegel
- 3- Schutzhülle
- 4- Extraktor
- 5- Reflektor

Bedingt durch die komplizierte Bindung zwischen den Elementen des HLG, lässt sich der Beitragverlust des jeweiligen Elements nicht genau erkennen. Der Lichtverlust eines einzelnen Elements hängt von den Lichtverlusten aller Elemente ab, und die Eigenschaft des jeweiligen Elements beeinflusst den Lichtverlust innerhalb der anderen Elemente.

Über die Bestimmung des Verlustes im HLG sind hier zwei Arbeiten zu nennen, wobei allerdings die Angabe über die detaillierten Aufbaustrukturen, z. B. Länge, Durchmesser, Extraktortyp, usw. und Materialeigenschaften fehlen.

1. 1994 hat Aizenberg folgende Angabe über die Verlustanteile für ein typisches HLG angegeben /11/:
 - a) Verlust durch die Prismenfolie und den Reflektor: 20 %
 - b) Verlust durch den Endspiegel: 3 %
 - c) Verlust durch die Schutzhülle: 6 %
 - d) Verlust im Scheinwerfer: 19 %Der Wirkungsgrad des Hohllichtleitersystems beträgt dabei 52 %.
2. 1998 gab Wheathead folgende Verlustanteile für ein typisches HLG an /129/.
 - a) Verlust durch die Prismenfolie: 17 %
 - b) Verlust durch den Endspiegel: 1 %
 - c) Verlust durch den Extraktor: 3 %
 - d) Verlust durch die Schutzhülle: 9 %
 - e) Verlust im Scheinwerfer: 30 %

Der Wirkungsgrad des Hohllichtleitersystems beträgt dabei 40 %.

Im Folgenden wird eine in der Anwendung bewährte Methode für die Berechnung des Lichtverlustes aller Elemente des HLG vorgestellt.

3.4.1 Berechnung der Lichtverluste in der Schutzhülle

Die Schutzhülle besteht aus PC (Polycarbonat) mit einer Dicke von 2 mm bis 3 mm. Der Reflexionsgrad der Oberfläche des PC wird mit 4 % für senkrecht einfallende Strahlung angenommen /1/. Die reflektierte Strahlung kann durch die Prismenfolie noch einmal zur Schutzhülle oder ins Innere des HLG gelenkt werden. Im HLG können die oben genannten Strahlen wieder durch den Extraktor, den Reflektor oder den Endspiegel die Schutzhülle erreichen.

Die vereinfachte Methode für die Berechnung des Lichtverlustes in der Schutzhülle berechnet den Auskopplungslichtstrom des HLG mit und ohne die Schutzhülle, und durch den Vergleich beider Auskopplungslichtströme wird der Lichtverlust der Schutzhülle berechnet. Es wird betont, dass die Schutzhülle die Ursache des Lichtverlusts darstellt, da die Strahlen im Extraktor, Reflektor, usw. absorbiert werden können.

3.4.2 Berechnung der Lichtverluste am Endspiegel

In der Praxis beträgt der maximale Reflexionsgrad des Endspiegels 89 %. Um den Lichtverlust des Endspiegels zu bestimmen, reicht es nicht aus, ausschließlich den Anteil der Strahlen zu berücksichtigen, der am Ende des HLG den Endspiegel trifft, weil die Strahlen nach dem ersten Zusammenstoß mit dem Endspiegel nicht austreten können; wodurch eine Mehrfachreflexion zwischen dem Endspiegel und der Prismenfolie oder der Extraktor entsteht.

Der Lichtverlust des Endspiegels wird mittels einer Simulation bestimmt. Für einen vorgegebenen Einspeisungslichtstrom wird der gesamte Auskopplungslichtstrom des berücksichtigenden HLG ohne die Schutzhülle berechnet und der Lichtverlust durch die Gleichung 5 bestimmt ($\Phi_{\text{loss}, 1}$).

$$\Phi_{\text{loss}, i} = \Phi_{\text{in}} - \Phi_{\text{out}, i} \quad (5)$$

Dabei ist:

Φ_{in} : gesamter Einspeisungslichtstrom des HLG

$\Phi_{\text{out}, i}$: gesamter Auskopplungslichtstrom des HLG in der Situation i

$\Phi_{\text{loss}, i}$: gesamter Lichtverlust des HLG in der Situation i

Anschließend wird der ideal angenommene Endspiegel mit einem Reflexionsgrad von 100 % durch einen realen Endspiegel im HLG ohne die Schutzhülle ersetzt. Wiederum wird mit Hilfe der Gleichung 5 der Lichtverlust berechnet ($\Phi_{\text{loss}, 2}$). Der gesamte Lichtverlust des Endspiegels (Φ_{Sp}) wird durch die Gleichung 6 beschrieben.

$$\Phi_{\text{Sp}} = \Phi_{\text{loss}, 1} - \Phi_{\text{loss}, 2} \quad (6)$$

3.4.3 Berechnung der Lichtverluste der Prismenfolie

Die Prismenfolie besteht entweder aus PMMA mit einer Brechzahl von 1,492 oder aus PC mit einer Brechzahl von 1,586 [11]. Theoretisch haben PMMA und PC einen zu vernachlässigenden Lichtverlust. Die Berechnung des Lichtverlustes der Prismenfolie ist sehr komplex, weil die Prismenfolie zwei Funktionen hat: Zum einen die Begrenzung der Transmission durch die Schutzhülle und darüber hinaus die Verstärkung der Reflexion der Strahlen, um das Licht weiter ins Innere des HLG zu lenken. Praktisch entstehen hohe Lichtverluste in der Prismenfolie durch die folgenden Ursachen:

- 1- Mehrfache Totalreflexionen in der Prismenfolie
- 2- Absorption durch die Materialien
- 3- Reflexion und Streuung auf der Oberfläche des Lichteinfalls in alle Richtungen

Die Abbildungen 21 und 22 zeigen einen Strahl bei Totalreflexion bzw. vollständiger Transmission durch die Prismenfolie.

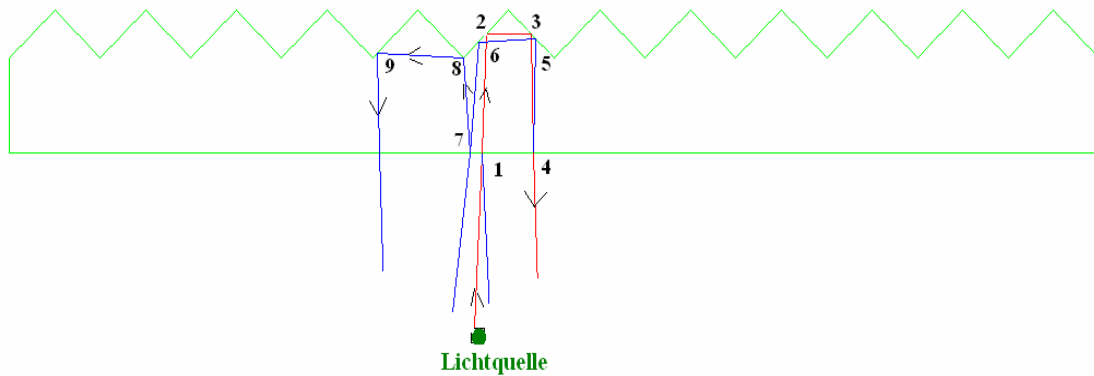


Abb. 21 Mehrfache Totalreflexionen des Strahles in der Prismenfolie

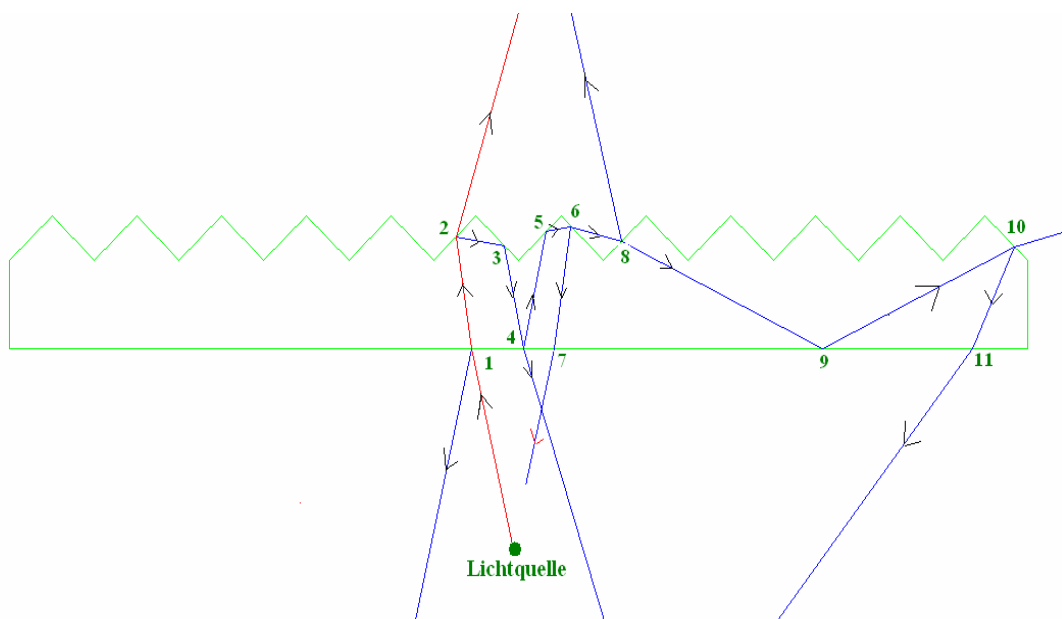


Abb. 22 Vollständige Transmission des Strahles

Wie in den Abbildung 21 und 22 dargestellt, erzeugt das Auftreffen eines Strahls auf einer Fläche einen Reflexionsanteil des Strahls, wodurch der Reflexionsteil vor allem im Innen der Prismenfolie den Lichtverlust erhöht.

Der Lichtverlust der Prismenfolie des HLG kann nicht allein mit Hilfe des Scheinwerfers und der Prismenfolie bestimmt werden, da ohne Extraktor und Endspiegel nur eine geringe Menge des Lichts entlang der Prismenfolie ausgekoppelt wird, dazu muss das komplette Modell des HLG benutzt werden.

Dazu wird für einen gegebenen Einspeisungslichtstrom der gesamte Auskopplungslichtstrom des betrachteten HLG ohne Berücksichtigung der Schutzhülle berechnet. Anschließend wird die Berechnung mit einem ideal angenommenen Endspiegel, Reflektor und Extraktor (Reflexionsgrad von 100 %) wiederholt, hierbei wird der Lichtverlust der Prismenfolie durch die Gleichung 5 bestimmt.

3.4.4 Lichtverlust am Extraktor

Der Lichtverlust an den Extraktoren, d. h. sowohl an den Spiegelextraktoren als auch an den Extraktorfilmern, werden wie Lichtverluste des Endspiegels berechnet.

3.4.5 Lichtverlust am Reflektor

Der Verlust am Reflektor wird wie der Verlust in der Schutzhülle berechnet.

3.5 Simulation der Lichtverluste im HLG

Der Lichtverlust im HLG wurde mittels des Rechnerprogramms "Tracepro" durch den berechneten Lichtstrom ermittelt.

Nach den Messungen der LVK und der Teillichtströme des HLG wurde folgende Materialeigenschaft des Hohllichtleitersystems in der Simulation angesetzt:

Reflexionsgrad des Endspiegels und des Spiegelextraktores: 85 %

Reflexionsgrad des Reflektors : 80 %

Im Folgenden wird die Methode bei der Berechnung des Lichtverlusts des jeweiligen Elements eines 6m HLG mit HQI-T 400 W, Spiegelextraktor, beschrieben.

In Tabelle 5 sind berechnete Lichtströme des HLG mit den verschiedenen Situationen der Simulation aufgeführt. Als perfektes Material wurde bewusst ein Material mit einem Reflexionsgrad von 100 % und einem Absorptionsgrad von 0 % bzw. ohne Lichtverlust definiert. In der Simulation ist eine perfekte Prismenfolie ohne Lichtverlust nicht anwendbar, weil der Lichtverlust in der Prismenfolie wegen der Reflexion oder durch Mehrfachreflexionen auftritt.

Tabelle 5 Berechnete Lichtströme des HLG

Φ_{lamp}: Gesamter Lichtstrom der Lampe	37000 lm
Φ_1: Gesamter Einspeisungslichtstrom des HLG	26600 lm
Φ_2: Gesamter Auskopplungslichtstrom des normalen HLG	9600 lm
Φ_3: Gesamter Lichtstrom des normalen HLG ohne Schutzhülle	11700 lm
Φ_4: Gesamter Lichtstrom des normalen HLG ohne Schutzhülle und Reflektor	13500 lm
Φ_5: Gesamter Lichtstrom des normalen HLG ohne Schutzhülle mit verlustlosem Endspiegel	12500 lm
Φ_6: Gesamter Lichtstrom des normalen HLG ohne Schutzhülle mit verlustlosem Extraktor	15300 lm
Φ_7: Gesamter Lichtstrom des HLG ohne Schutzhülle und verlustlosen Materialien	18400 lm
Φ_8: Gesamter Lichtstrom des HLG ohne Schutzhülle und Reflektor sowie mit verlustlosem Endspiegel und Extraktor	21500 lm

Die Lichtverluste im HLG bzw. in den einzelnen Elementen des HLG sind wie folgt:

$$\text{Gesamter Lichtverlust des HLG: } \Phi_{\text{HLG}} = \Phi_1 - \Phi_2 = 26600 - 9600 = 17000 \text{ lm} \quad (7)$$

$$\text{Betriebwirkungsgrad des HLG in \%: } \eta_{\text{HLG}} = (9600 / 26600) \times 100 = 36 \% \quad (8)$$

$$\text{Lichtverlust der Schutzhülle: } \Phi_{\text{Sh}} = \Phi_3 - \Phi_2 = 11700 - 9600 = 2100 \text{ lm} \quad (9)$$

$$\text{Lichtverlust des Reflektors: } \Phi_{\text{Re}} = \Phi_4 - \Phi_3 = 13500 - 11700 = 1800 \text{ lm} \quad (10)$$

$$\text{Lichtverlust des Endspiegels: } \Phi_{\text{Sp}} = \Phi_5 - \Phi_3 = 12500 - 11700 = 800 \text{ lm} \quad (11)$$

$$\text{Lichtverlust des Extraktors: } \Phi_{\text{Ex}} = \Phi_6 - \Phi_3 = 15300 - 11700 = 3600 \text{ lm} \quad (12)$$

$$\text{Lichtverlust der Prismenfolie: } \Phi_{\text{Pr}} = \Phi_1 - \Phi_7 = 26600 - 18400 = 8200 \text{ lm} \quad (13)$$

$$\text{Gesamte Lichtverluste des HLG: } \Phi_{\text{gesamt}} = \Phi_{\text{Sh}} + \Phi_{\text{Re}} + \Phi_{\text{Sp}} + \Phi_{\text{Ex}} + \Phi_{\text{Pr}} = 16500 \text{ lm} \quad (14)$$

Der gesamte berechnete Lichtverlust des HLG nach Gleichung 7 zeigt im Vergleich mit der Gleichung 14 keinen wesentlichen Unterschied, deswegen wurde die Methode der Berechnung des Lichtverlusts des jeweiligen Teils des HLG bestätigt.

Die größten Lichtverluste weisen die Prismenfolien bei einem Lichtstrom von 8200 lm und der Extraktor bei einem Lichtstrom von 3600 lm auf. Aufgrund Φ_8 beträgt der Lichtverlust der Prismenfolie nur 5100 lm, aber der Reflektor des HLG erhöht den Lichtverlust der Prismenfolie, obwohl der Reflektor keinen Lichtverlust hat.

Die Tabelle 6 zeigt den verschiedenen Anteilverlust eines jeweiligen Elements des oben genannten HLG am Gesamtverlust.

Tabelle 6 Anteil des Lichtverlustes des jeweiligen Teiles eines 6m HLG mit Spiegelextraktor, HQI-T 400 W

Prismenfolie	Schutzhülle	Endspiegel	Reflektor	Spiegelextraktor
31 %	8 %	3 %	7 %	14 %

Trotz des gesamten berechneten Lichtverlusts des HLG von 17000 lm (entspricht 64 % des Gesamtlichtstroms) beträgt der gesamte gemessene Lichtverlust des HLG 17700 lm (entspricht 67 %) des Gesamtlichtstroms. Dieser Unterschied hat ihre Ursache in den folgenden Punkten:

- Schmutzpartikel (Verunreinigungen) auf der Oberfläche alle Elemente vor allem der Schutzhülle
- die Oberfläche der Prismenfolie ist nicht ideal glatt
- Halteschienen und mechanische Verbindung im HLG
- Lücke zwischen der Prismenfolie und dem Reflektor vor allem auf der Schiene

Tabelle 7 zeigt die verschiedenen berechneten Verlustanteile eines jeweiligen Elements des verschiedenen HLG am Gesamtverlust.

Tabelle 7 Anteil des Lichtverlustes des jeweiligen Teiles der HLG (die in Tabelle 4 genannt wurden)

Nr.	Prismenfolie	Schutzhülle	Endspiegel	Reflektor	Extraktor
1	32 %	9 %	2 %	9 %	12 %
2	33 %	9 %	2 %	9 %	12 %
3	33 %	9 %	2 %	9 %	12 %
4	34 %	8 %	3 %	9 %	11 %
5	36 %	8 %	3 %	9 %	11 %

Nr.	Prismenfolie	Schutzhülle	Endspiegel	Reflektor	Extraktor
6	36 %	8 %	3 %	9 %	11 %
7	30 %	9 %	3 %	9 %	11 %
8	33 %	8 %	3 %	10 %	12 %
9	30 %	9 %	3 %	9 %	11 %
10	31 %	8 %	3 %	10 %	11 %
11	30 %	9 %	3 %	10 %	11 %
12	32 %	8 %	3 %	11 %	10 %
13	31 %	8 %	3 %	11 %	12 %
14	34 %	8 %	8 %	13 %	6 %
15	29 %	9 %	3 %	10 %	11 %
16	28 %	10 %	2 %	9 %	12 %
17	26 %	11 %	1 %	6 %	15 %
18	34 %	8 %	12 %	14 %	0
19	24 %	11 %	2 %	6 %	4 %
20	33 %	8 %	13 %	13 %	0
21	31 %	8 %	3 %	7 %	14 %
22	25 %	11 %	3 %	6 %	3 %

In der Praxis kann sich der Lichtverlust in der Schutzhülle aufgrund der Verschmutzung der Oberfläche der Schutzhülle auf bis zu 13 % des gesamten Lichtverlustes des HLG erhöhen. Wie die Tabelle 7 zeigt, ist die Prismenfolie das wichtigste Verlustsegment eines HLG. Wenn ein HLG ohne Einsatz eines Reflektors benutzt wird, kann der Lichtverlust der Prismenfolie um bis zu 17 % reduziert werden. Wegen der nicht-idealen Eigenschaften von Prismenfolien (Absorption, nur näherungsweise Totalreflexion) ergeben sich unter realen Bedingungen größere Lichtverluste.

3.6 Temperatur auf den Außenflächen von HLG

In Tabelle 8 sind Temperaturen der Außenfläche der verschiedenen Punkte eines HLG, der eine Länge von 6 m und zwei Spiegelextraktoren in 1,8 m und 3,8 m sowie einen Endspiegel in 5,8 m Entfernung vom Scheinwerfer hat, in Abhängigkeit vom Zeitverlauf dargestellt. Die Temperatur wurde mittels eines Infrarotthermometers der Firma Raytec, Modell RAYR3ILTC2D mit der gemessenen Breite von 8 – 14 µm gemessen.

Tabelle 8 Die Temperatur einiger Punkte des HLG im Verlauf der Zeit

Verlauf der Zeit	Scheinwerfer	Abstand von Scheinwerfer in m													
		0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	1	1,8	2	2,5	3,8	5	5,8
5 Minuten	21°	23°	22°	22°	22°	22°	22°	22°	22°	24°	21°	22°	24°	22°	24°
30 Minuten	21°	29°	27°	26°	25°	24°	24°	24°	24°	26°	22°	23°	25°	22°	24°
60 Minuten	22°	35°	31°	28°	27°	25°	24°	24°	24°	27°	23°	23°	25°	23°	26°
180 Minuten	27°	42°	38°	33°	30°	27°	25°	25°	24°	27°	23°	23°	26°	23°	26°
360 Minuten	27°	42°	38°	33°	30°	27°	25°	25°	24°	27°	23°	23°	26°	23°	26°

Da der Scheinwerfer durch viele Gerüste installiert wurde und die Temperatur des Spezialversuchsraums 21° betrug, konnte sich die Temperatur des Scheinwerfers nicht auf mehr als 27° erhöhen. Am Anfang des HLG und im Bereich des Spiegelextraktors ergeben sich relativ hohe Temperaturen, weil in diesem Bereich mehr Strahlen auf die Prismenfolie treffen.

3.7 Der Betriebswirkungsgrad von HLG

Die Prismenfolie dient der Weiterleitung (entsprechend der Reflexionseigenschaft) und in bestimmten Bereichen der Auskopplung von Licht (entsprechend der Transmissionseigenschaft). Zur Weiterleitung des Lichtes wird ein diffus reflektierendes Blatt (Reflektor) zwischen Prismenfolie und Schutzhülle eingesetzt. Da diese Sammlung des Reflektors und der Prismenfolie nur für die Reflexion des Lichts angewendet wird, wurde als erster Ansatz die Reduzierung des Lichtverlusts der Sammlung mit der Substitution durch andere Materialien mit einem hohen Reflexionsgrad entwickelt. Ein guter Ersatz ist der Visible Mirror Film (VMF) mit einem durchschnittlichen Reflexionsgrad von 98 % für alle Winkel der einfallenden Strahlen.

Die Tabelle 9 zeigt den gemessenen wie auch den berechneten Auskopplungslichtstrom des HLG mit Endspiegel und 120° Auskopplungsfenster für verschiedene Längen, Scheinwerfer und Extraktoren.

Tabelle 9 Gemessene und berechnete Lichtströme des verschiedenen Hohllichtleitersystems

Nr.	Länge (m)	Lampe	Extraktorenart	Gemessene Lichtstrom des normalen HLG (in lm)	Berechnete Lichtstrom des normalen HLG (in lm)	Berechnete Lichtstrom des HLG mit VMF (in lm)
1	18	HQI-T 400 W	3 Spiegel	9100	9700	15500
2	18	NAV-T 400 W	3 Spiegel	11000	11800	18500
3	18	NAV-T 600 W	3 Spiegel	17700	19200	31000
4	18	HQI-T 400 W	2 Spiegel	8500	9100	14800
5	18	NAV-T 400 W	2 Spiegel	10000	10800	16800
6	18	NAV-T 600 W	2 Spiegel	16000	17300	27700
7	15	HQI-T 400 W	2 Spiegel	8900	9600	15200
8	15	NAV-T 600 W	2 Spiegel	16000	17000	27000
9	12	HQI-T 400 W	2 Spiegel	8800	9500	15100
10	12	NAV-T 400 W	2 Spiegel	11300	12200	17000
11	12	NAV-T 600 W	2 Spiegel	17300	18400	28000
12	12	NAV-T 400 W	1 Spiegel	9500	10300	16000
13	9	HQI-T 400 W	2 Spiegel	8800	9400	15300
14	9	HQI-T 400 W	3 Spiegel	9100	9800	15700
15	9	HQI-T 400 W	4 Spiegel	9800	10600	16500
16	6	HQI-T 400 W	2 Spiegel	8900	9600	15500

Wie Tabelle 9 zeigt, kann der Beleuchtungswirkungsgrad des HLG mit Hilfe eines VMF und Spiegelextraktor theoretisch auf 38 % bis zu 62 % verbessert werden.

In der Tabelle 10 ist der berechnete Auskopplungslichtstrom des HLG mit VMF (Abb. 23) und verschiedenen Auskopplungsfenster für die Hohllichtleitersysteme der Tabelle 9 aufgeführt.

Tabelle 10 Berechnete Lichtströme von oben genannten (Tabelle 9) HLG mit dem verschiedenen Auskopplungsfenster

Nr.	Lichtstrom mit dem Auskopplungsfenster von 105° (in lm)	Lichtstrom mit dem Auskopplungsfenster von 90° (in lm)	Lichtstrom mit dem Auskopplungsfenster von 75° (in lm)
1	15500	15800	15900
2	18900	19200	19400
3	31500	32000	32200
4	15000	15300	15400
5	17000	17500	17600
6	28000	28600	28700
7	15200	15600	15400
8	27000	27500	27300
9	14900	15400	15000
10	17000	17500	17200
11	28000	29000	28600
12	16000	16400	16000
13	15000	15400	14400
14	15500	15700	14800
15	16800	16400	15000
16	15500	15200	14300

Wie Tabelle 10 zeigt, beträgt das optimierte Auskopplungsfenster des HLG 90°, aber für eine Länge größer als 15 m kann man das Auskopplungsfenster bis auf 75° reduzieren, um einen maximalen Wirkungsgrad zu erreichen.

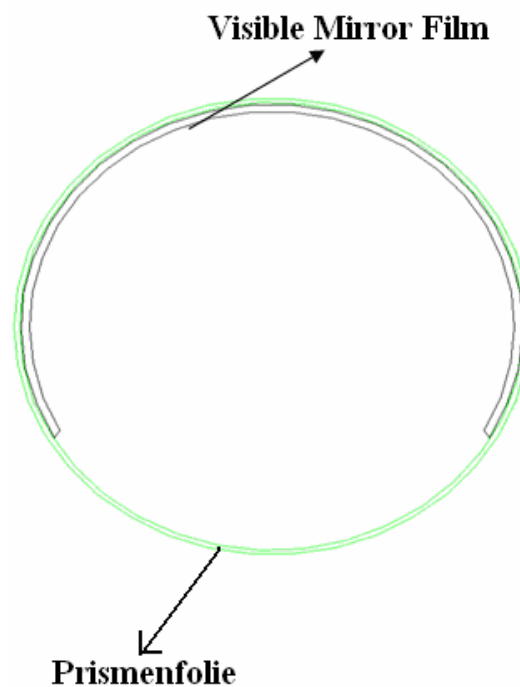


Abb. 23 HLG mit VMF

In der Tabelle 11 sind die gemessenen und berechneten Lichtströme der verschiedenen HLG mit VMF und einem Auskopplungsfenster von 90° aufgeführt.

Tabelle 11 Berechnete und gemessene Lichtströme von HLG mit und ohne VMF

Nr.	Länge (in m)	Lampe	Extraktorenart	Berechneter Lichtstrom (in lm) mit VMF	Gemessener Lichtstrom (in lm) mit VMF	Gemessener Lichtstrom (in lm) Ohne VMF
1	6	HQI-T 400 W	2 Spiegel	15200	14800	8900
2	6	HQI-T 400 W	Extraktorfilm	21500	19800	14000
3	6	HQI-T 400 W	Ohne	10000	9400	7400
4	9	HQI-T 400 W	2 Spiegel	15400	14800	8800
5	9	HQI-T 400 W	Extraktorfilm	21700	19900	14200
6	9	HQI-T 400 W	Ohne	10200	9700	7700

Die gemessenen Lichtströme des HLG zeigen auch eine wesentliche Entwicklung des Wirkungsgrads von HLG. Weil der gemessene Reflexionsgrad des angewendeten Extraktorfilms fast 0.96 (LEF) beträgt, haben HLG mit Extraktorfilm einen hohen Wirkungsgrad im Vergleich zu einem HLG mit Spiegelextraktoren. Mit Hilfe eines Extraktorfilms mit einem Reflexionsgrad von 96 % (LEF) und VMF kann der Wirkungsgrad des HLG theoretisch von 55 % bis auf 82 % verbessert werden.

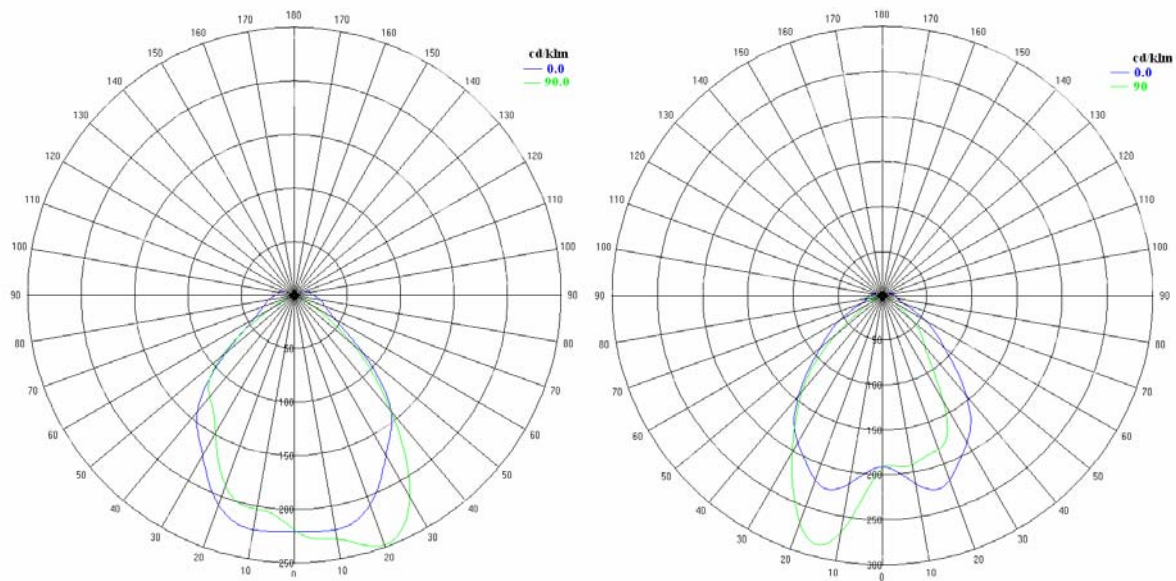
Zudem kann man mit dieser Methode der Wirkungsgrad des Scheinwerfers auch verbessert werden, weil eine engstrahlende LVK des Scheinwerfers für eine Totalreflexion durch den VMF noch nicht erforderlich ist (Maximum 27°). Z. B. hat der spezielle Scheinwerfer mit der HQI-T 400 W Lampe einen Wirkungsgrad von 62 % /38, 72/, um den maximalen Wirkungsgrad des HLG zu erreichen.

Zusammenfassend hängt die optimale LVK des verwendeten Scheinwerfers von der Länge, der Existenz des VMF, der Art des Extraktors und dem Neigungswinkel des Endspiegels des HLG ab.

3.8 Endspiegel

Da ein wesentlicher Anteil des eingespeisten Lichtstroms das Ende des HLG erreicht, spielt der Endspiegel für die Lichtauskopplung des HLG eine wichtige Rolle. Der Wirkungsgrad und die LVK des HLG werden durch die lichttechnischen Eigenschaften und die Struktur sowie durch den Neigungswinkel des Endspiegels beeinflusst.

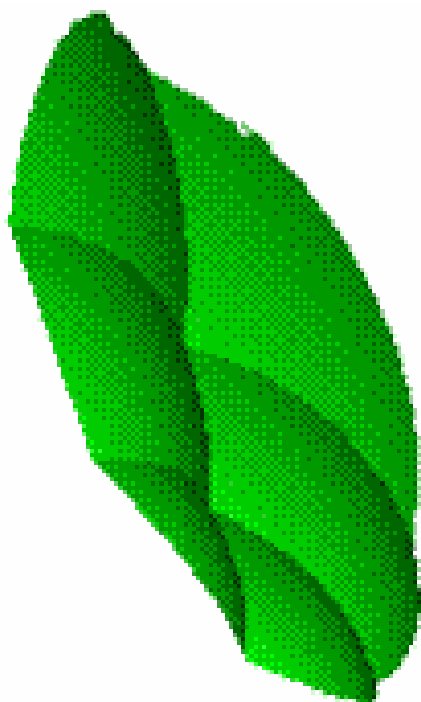
Abbildung 24 zeigt die berechnete LVK eines 6 m HLG mit Extraktorfilm für den verschiedenen Neigungswinkel eines flachen Endspiegels.



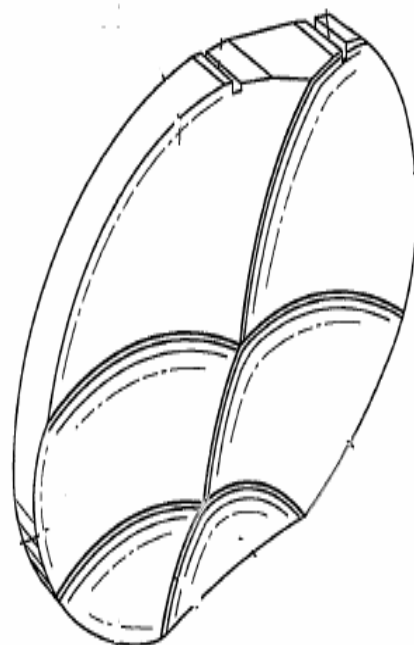
A) Der Neigungswinkel des Endspiegels von 25° B) Der Neigungswinkel des Endspiegels von 45°
Abb. 24 Die LVK eines 6m HLG mit Extraktorfilm

Die bisher verwendeten Endspiegel werden nur hinsichtlich des maximalen Wirkungsgrades des HLG und nicht der geeigneten LVK des HLG optimiert.

Der Endspiegel der Firma 3M hat eine besondere Form mit einem Reflexionsgrad bis zu 89 % und einen festen Neigungswinkel von 45°. In Abb. 25 ist dieser 3M-Spiegel wiedergegeben.



(a) Ansicht von hinten



(b) Ansicht von vorne

Abb. 25 Der Endspiegel der Firma 3M /133/

Hier wird der durch den Endspiegel reflektierte Lichtstrom hauptsächlich im Bereich des Endspiegels ausgekoppelt. Daraus ist der ausgekoppelte Lichtstrom des letzten Segments hoch und umgekehrt des vorletzten Segments klein (Abb. 19). Um einen gleichmäßigen ausgekoppelten Lichtstrom am Ende des HLG zu erreichen, soll ein flacher Endspiegel eingesetzt werden.

Der flache Endspiegel besteht aus einer runden Scheibe. Darauf ist eine VMF mit einem Reflexionsgrad von 98 % aufgeklebt. Der Neigungswinkel des Endspiegels gegen die Vertikale darf nicht zu klein sein, weil sonst ein wesentlicher Anteil des eingespeisten Lichtes zum Scheinwerfer zurückreflektiert und damit der Wirkungsgrad des HLG vermindert wird.

Tabelle 12 zeigt den gemessenen Lichtstrom des HLG für verschiedene Längen, Endspiegel, Scheinwerfer und Extraktoren.

Tabelle 12 Der gemessene Wirkungsgrad von HLG mit den verschiedenen Längen, Lampen und Extraktortypen für unterschiedliche Endspiegel

Nr.	Rohr	Lampe	Endspiegel	Gesamter Lichtstrom in lm	Extraktortyp	Wirkungsgrad in %
1	6 m normaler HLG	HQI-T 400 W	Normal 3M	8900	2 Spiegel	33
2	6 m normaler HLG	HQI-T 400 W	Flach mit dem 18° Neigungswinkel	6800	2 Spiegel	25
3	6 m HLG mit VMF	HQI-T 400 W	Normal 3M	14800	2 Spiegel	56
4	6 m HLG mit VMF	HQI-T 400 W	Flach mit dem 18° Neigungswinkel	13800	2 Spiegel	52
5	6 m HLG mit VMF	HQI-T 400 W	Normal 3M	19800	Extraktorfilm	74
6	6 m HLG mit VMF	HQI-T 400 W	Flach mit dem 18° Neigungswinkel	19200	Extraktorfilm	72
7	9 m normaler HLG	HQI-T 400 W	Normal 3M	8800	2 Spiegel	33
8	9 m normaler HLG	HQI-T 400 W	Flach mit dem 18° Neigungswinkel	7100	2 Spiegel	27
9	9 m normaler HLG	HQI-T 400 W	Flach mit dem 13° Neigungswinkel	6900	2 Spiegel	26
10	9 m HLG mit VMF	HQI-T 400 W	Normal 3M	14800	2 Spiegel	56
11	9 m HLG mit VMF	HQI-T 400 W	Flach mit dem 18° Neigungswinkel	14100	2 Spiegel	53
12	9 m HLG mit VMF	HQI-T 400 W	Flach mit dem 13° Neigungswinkel	13800	2 Spiegel	52
13	9 m HLG mit VMF	HQI-T 400 W	Normal 3M	19900	Extraktorfilm	75
14	9 m HLG mit VMF	HQI-T 400 W	Flach mit dem 18° Neigungswinkel	19500	Extraktorfilm	73
15	9 m HLG mit VMF	HQI-T 400 W	Flach mit dem 13° Neigungswinkel	19100	Extraktorfilm	72
16	9 m HLG mit VMF	NAV-T 600 W	Normal 3M	41800	Extraktorfilm	73
17	9 m HLG mit VMF	NAV-T 600 W	Flach mit dem 18° Neigungswinkel	40600	Extraktorfilm	71
18	9 m HLG mit VMF	NAV-T 600 W	Flach mit dem 13° Neigungswinkel	40000	Extraktorfilm	70
19	9 m normaler HLG	NAV-T 600 W	Flach mit dem 13° Neigungswinkel	15000	2 Spiegel	26
20	9 m normaler HLG	NAV-T 600 W	Normal 3M	17200	2 Spiegel	30
21	12 m normaler HLG	HQI-T 400 W	Normal 3M	8800	2 Spiegel	33
22	12 m normaler HLG	HQI-T 400 W	Flach mit dem 13° Neigungswinkel	7700	2 Spiegel	29

Nr.	Rohr	Lampe	Endspiegel	Gesamter Lichtstrom in lm	Extraktortyp	Wirkungsgrad in %
23	12 m normaler HLG	NAV-T 600 W	Normal 3M	17300	2 Spiegel	30
24	12 m normaler HLG	NAV-T 600 W	Flach mit dem 13° Neigungswinkel	15900	2 Spiegel	27
25	15 m normaler HLG	HQI-T 400 W	Normal 3M	9400	3 Spiegel	35
26	15 m normaler HLG	HQI-T 400 W	Flach mit dem 13° Neigungswinkel	8700	3 Spiegel	33
27	15 m normaler HLG	NAV-T 600 W	Normal 3M	18200	3 Spiegel	32
28	15 m normaler HLG	NAV-T 600 W	Flach mit dem 13° Neigungswinkel	17300	3 Spiegel	30

Nach Abschluss der Messungen ergeben sich folgende Ergebnisse:

- 1- Der Einfluss des Endspiegels eines HLG mit VMF auf den Wirkungsgrad ist kleiner als auf einen normalen HLG, weil die Verluste des durch den Endspiegel reflektierten Lichtes wegen des VMF geringer sind.
- 2- Der Einfluss des Endspiegels auf einen HLG mit Extraktorfilm ist kleiner als auf einen HLG mit Spiegelextraktoren, weil:
 - der hintere Spiegelextraktor matt ist, wird ein wesentlicher Anteil des reflektierten Lichtes durch den Endspiegel absorbiert
 - das Licht besser entlang des HLG ausgekoppelt werden kann, und der Reflexionsgrad des diffus reflektierenden Extraktors (96 %) höher als der Reflexionsgrad der Spiegelextraktoren (85 %) ist.
- 3- Je kleiner die Länge des HLG, desto größer ist der Einfluss des Endspiegels, weil ein größerer Anteil des Lichts auf den Endspiegel trifft.
- 4- Trotz des niedrigeren Reflexionsgrads des Endspiegels der Firma 3M (von 85 %) bewirkt dieser wegen seiner Struktur insgesamt immer einen höheren Wirkungsgrad (ca. 2 % für Extraktorfilm und 5 % für Spiegelextraktoren) im Vergleich mit einem HLG mit VMF und flachem Endspiegel mit dem Reflexionsgrad von 98 %.

3.9 Neu entwickelter HLG

Hier wird ein neu entwickelter HLG mit einer Länge von 9 m vorgestellt, der einen hohen Betriebswirkungsgrad und einen gleichmäßig ausgekoppelten Lichtstrom durch die Entwicklung eines Endspiegels und eines Extraktors sowie des Konstruktionsmaterials von HLG vorweist.

Zuerst wurde ein 9 m HLG mit VMF mit einem Auskopplungsfenster von 90° versehen, dann separate Extraktoren mit bestimmten Verhältnissen für die jeweiligen Segmente auf dem VMF aufgeklebt und danach ein flacher Endspiegel mit dem Neigungswinkel von 18° am Ende eingesetzt. Abb. 26 zeigt den Querschnitt des 3 m HLG mit VMF und separate Extraktoren.

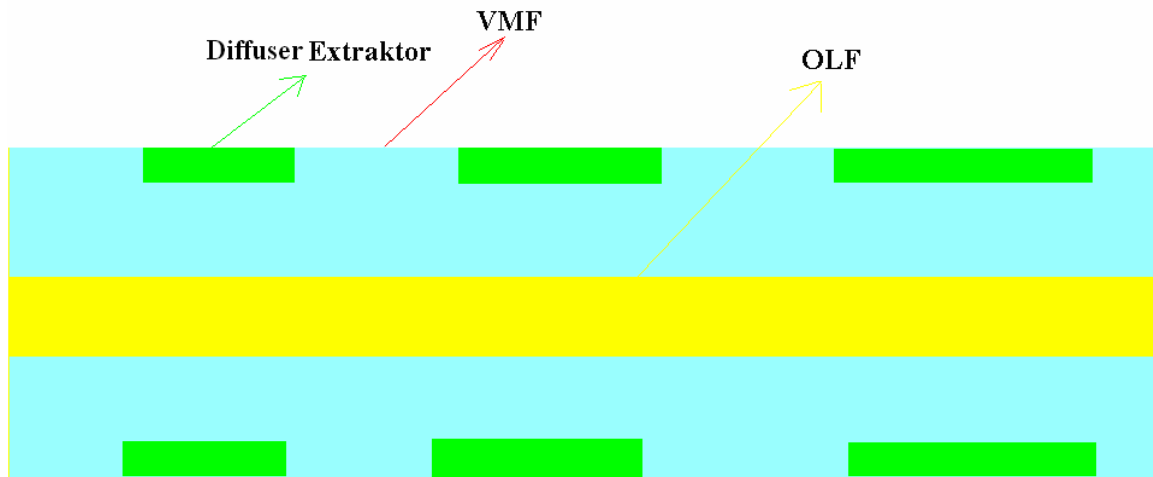


Abb. 26 Querschnitt des 3 m HLG mit VMF und separate Extraktoren

Die Abbildungen 27 und 28 zeigen das Extraktorverhältnis und den gemessenen Teillichtstrom des 9 m HLG. Der gemessene ausgekoppelte Lichtstrom durch einen Scheinwerfer mit einer Lampe HQI-T 400 W beträgt 19500 lm, was einem Wirkungsgrad von 73 % entspricht.

9m HLG mit VMF, HQI-T 400 W

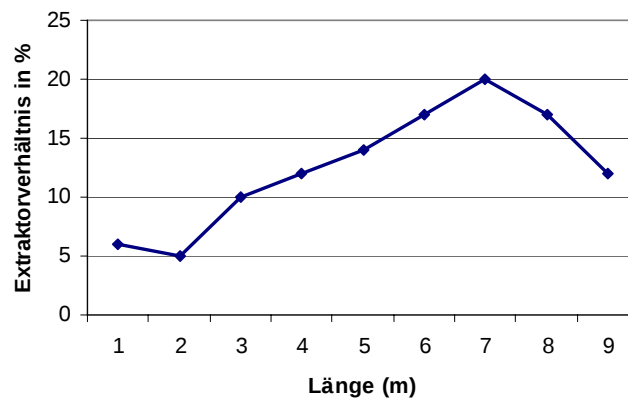


Abb. 27 Extraktorverhältnis der jeweiligen Segmente

9m HLG mit VMF, HQI-T 400 W

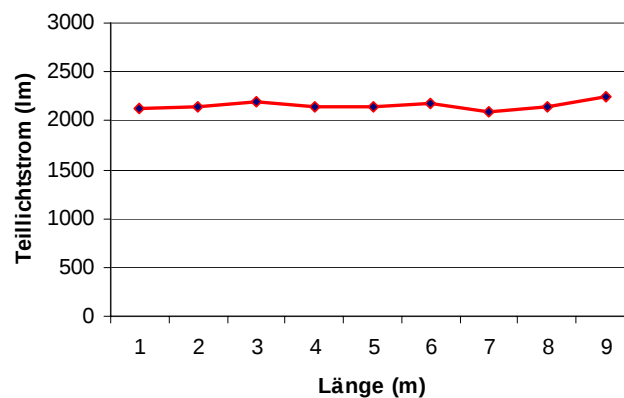


Abb. 28 Teillichtstrom der jeweiligen Segmente

Abbildung 29 zeigt die berechnete Beleuchtungsstärke des mit diesen Exraktoren erweiterten 9m HLG in der Höhe 3,75 m mit der Lampe HQI-T 400 Watt auf der Nutzebene in der Höhe von 0,7 m durch das Lichtplanungsprogramm RELUX.

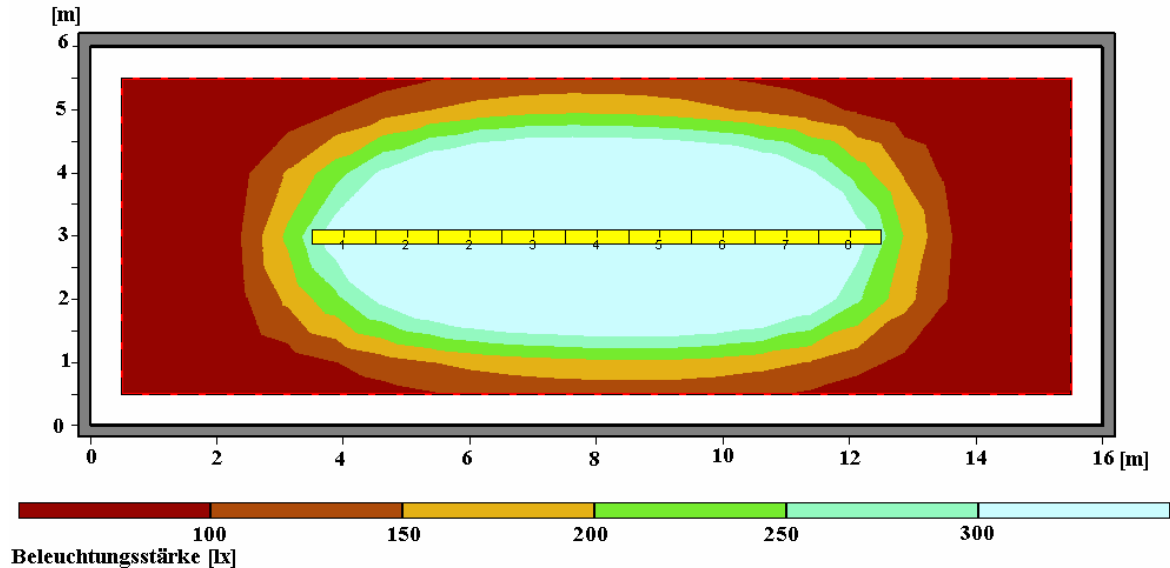


Abb. 29 Die berechnete Beleuchtungsstärke auf der Nutzebene (in der Höhe von 0,7 m) durch ein 9 m HLG mit dem flachen Endspiegel (in der Höhe von 3,75 m)

Da der Betriebswirkungsgrad des HLG mit VMF mit dem flachen Endspiegel im Vergleich zum HLG mit dem 3M Endspiegel nicht wesentlich geringer ist, kann eine gleichmäßige Beleuchtungsstärke auf der Nutzebene sowie ein gutes Betriebswirkungsgrad durch einen HLG mit VMF und separat diffus reflektierendem Papier und einem flachen Endspiegel, erreicht werden.

3.10 Untersuchung der Farb- und Farbwiedergabeeigenschaften von HLG

Zur Bestimmung der Farb- und Farbwiedergabeeigenschaft von HLG wurden zunächst die relativen spektralen Strahlungsverteilungen des Scheinwerfers und des Hohllichtleitersystems mit einem Spectroradiometer „Specbos 1201“ der Firma JETI im Wellenlängenbereich von 380 nm bis 780 nm auf Basis der spektralen Bestrahlungsstärke bestimmt. Die Lichteinspeisung erfolgte durch einen Scheinwerfer mit einer Lichtquelle HQI-T 400 W der Firma Osram.

Die relative spektrale Strahlungsverteilung des Scheinwerfers und des durch den eingespeisten HLG sind in den Abbildungen 30 und 31 in Abhängigkeit von der Wellenlänge dargestellt.

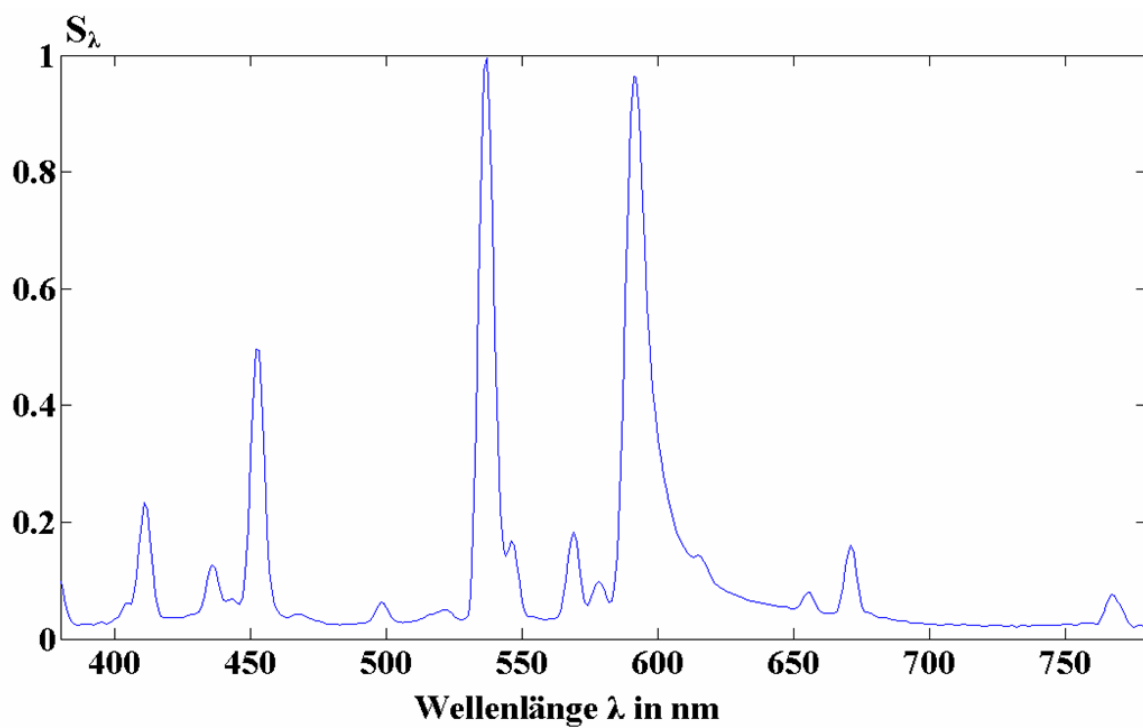


Abb. 30 Relative spektrale Strahlungsverteilung des Scheinwerfers in Abhängigkeit von der Wellenlänge

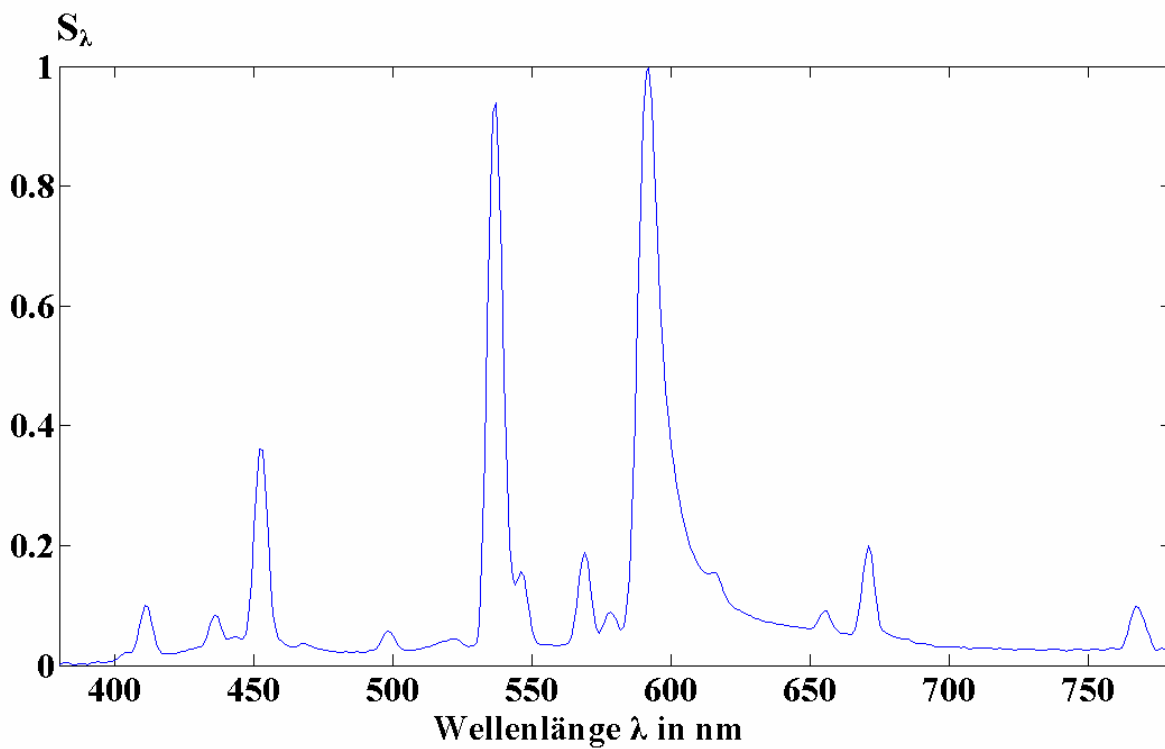


Abb. 31 Relative spektrale Verteilung des Hohllichtleiters in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Abbildungen 30 und 31 zeigen, dass die höchsten Werte der relativen spektralen Verteilung des Scheinwerfers bei einer Wellenlänge von 540 nm und für den HLG bei einer Wellenlänge von 600 nm auftreten. Die Einfallswinkelabhängigkeit des spektralen Transmissionsgrades der Prismenfolie (PMMA) und der Schutzhülle (PC) des HLG ist die Ursache dieses Phänomens. Wie die Abbildungen 32 und 33 zeigen, hängt der spektrale Transmissionsgrad der PC und PMMA von der Wellenlänge und dem Lichteinfallswinkel ab (/58,121/)

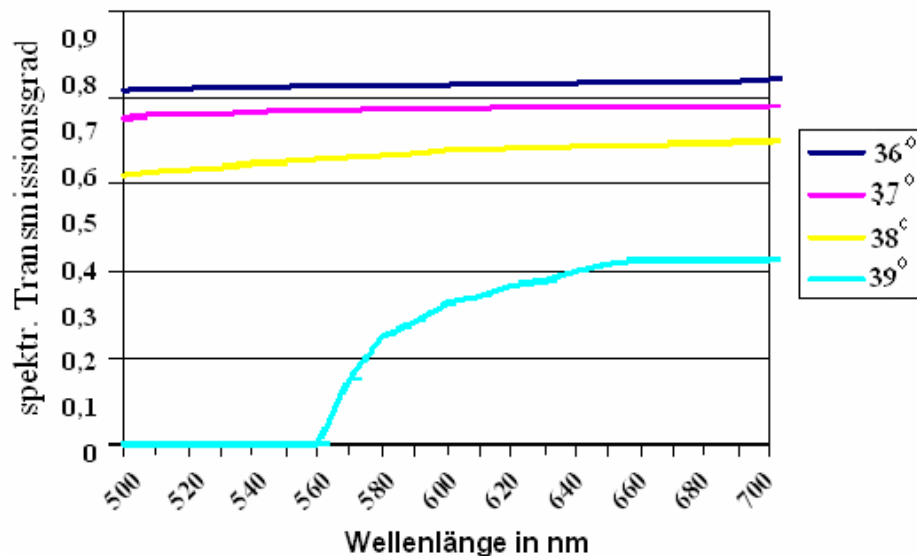


Abb. 32 Spektraler Transmissionsgrad von PC-Material
Parameter: Lichteinfallswinkel

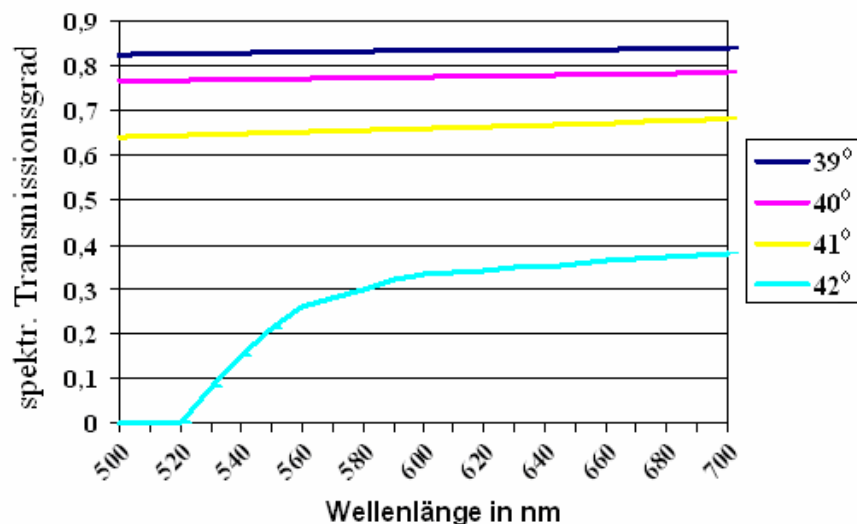


Abb. 33 Spektraler Transmissionsgrad von PMMA-Material
Parameter: Lichteinfallswinkel

Aus Abb. 32 und 33 zeigen, dass der spektrale Transmissionsgrad insbesondere bei großen Lichteinfallrichtungen mit kleinen Wellenlängen stark abnimmt.

Aus den Strahlungsfunktionen wurden die ähnlichste Farbtemperatur T_{CP} und die speziellen Farbwiedergabeindizes R_i sowie der allgemeine Farbwiedergabeindex R_a berechnet und in Tabelle 13 angegeben /22, 34, 39/.

Tabelle 13 Ermittelte Werte der ähnlichste Farbtemperatur T_{CP} und Farbwiedergabeindizes R_i des Scheinwerfers und des HLG

R_i	Scheinwerfer	HLG
R1	68	66
R2	83	83
R3	78	82
R4	71	70
R5	66	64
R6	75	75
R7	65	64
R8	10	5
R9	-146	-149
R10	45	47
R11	72	71
R12	36	35
R13	77	76
R14	87	89
R15	41	37
R_a	65	64
T_{CP} (K)	3500	3150

Daraus ist zu erkennen, dass durch HLG die ähnlichste Farbtemperatur um 350 K herabgesetzt wird. Die Farbwiedergabeeigenschaften werden geringfügig beeinträchtigt.

4 Eignung von Simulationsprogrammen für HLG - Systeme

4.1 Einleitung

Es gibt mehrere Veröffentlichungen [17, 60, 61, 71, 98, 106], die sich mit Vergleichen zwischen berechneten und gemessenen Lichtplanungsparametern befassen. Daraus ergeben sich attraktive Forschungsthemen für neue Leuchten bzw. Lichtplanungsprogramme.

Ziel dieses Kapitels ist es, gemessene und berechnete Lichtplanungsparameter: Beleuchtungsstärkeverteilung und Leuchtdichte sowie die psychologische Blendung von HLG-Systemen zu vergleichen, da die Lichtstärkeverteilungskurven der gesamten HLG nur stückweise gemessen werden können. Es musste also ein Algorithmus geschaffen werden, mit dem geprüft werden kann, wie gut und genau sich die mit dem Spezialgoniophotometer gemessenen LVK als Basis für eine Beleuchtungsplanung eignen.

Bei dem untersuchten System handelt es sich um einen 6 m langen Hohllichtleiter der Firma 3M mit einem Durchmesser von 0,3 m.

Das Testobjekt besteht aus der Schutzhülle, der Prismenfolie, dem VMF, dem Extraktor und einem Endspiegel. Innerhalb dieses Hohllichtleiters wird vom Reflektor VMF ein Winkelbereich von 270° und vom OLF (Auskopplungsfenster) von 90° abgedeckt.

4.2 Messungen der LVK

Die LVK-Messungen des HLG erfolgten an einem Spezialgoniophotometer des FG Lichttechnik der Technischen Universität Berlin, das für die Vermessung von Leuchten großer Längen, wie z.B. Hohllichtleitersysteme mit Längen von bis zu 30 m, konstruiert worden ist [73].

Die Abbildungen 34 und 35 stellen den Aufbau des Spezialgoniophotometers dar.

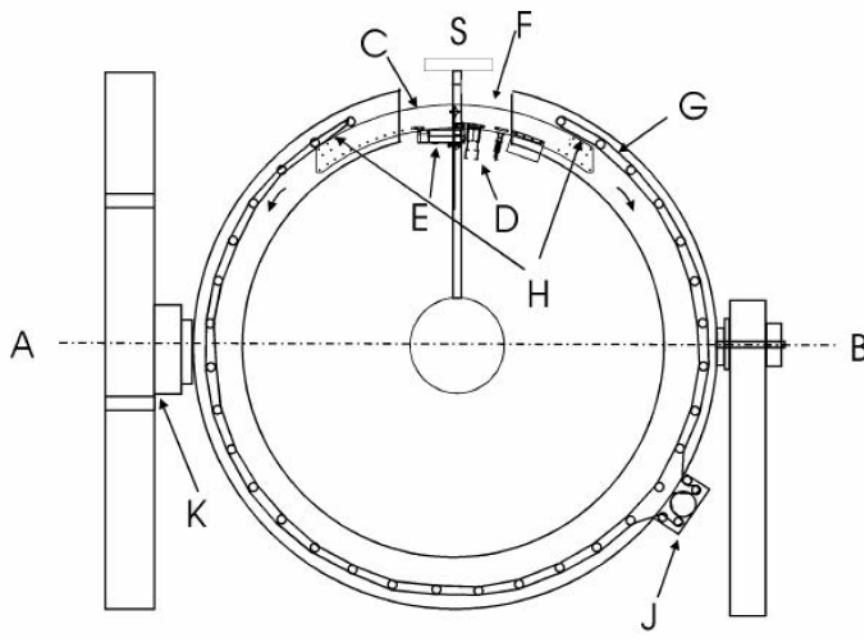


Abb. 34 Aufbau des Spezialgoniophotometers für Hohllichtleiter /73/

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

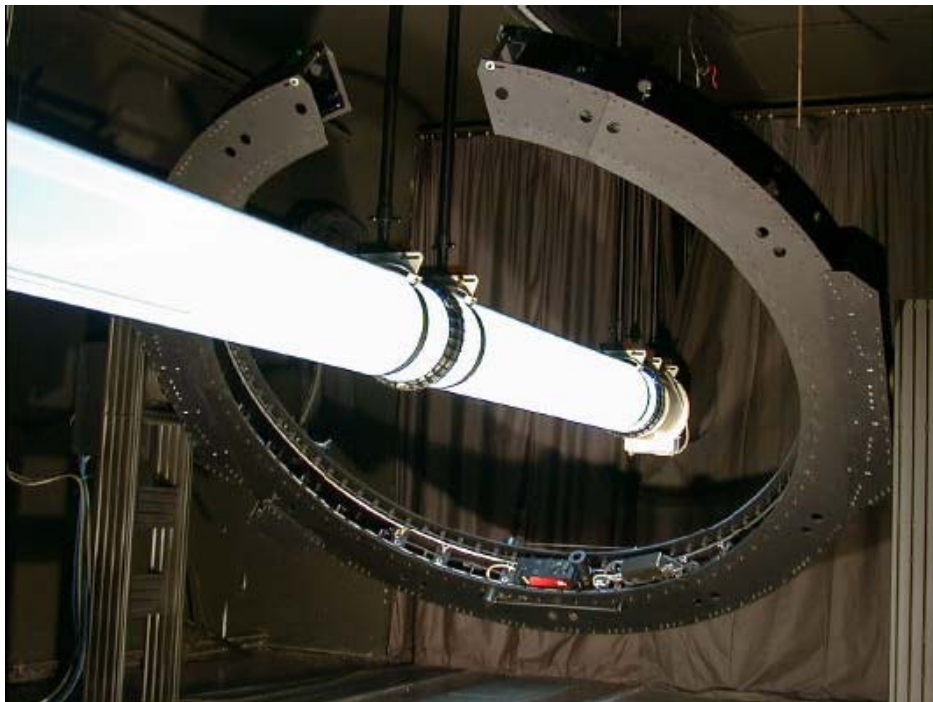


Abb. 35 Spezialgoniophotometer zur Hohllichtleitermessung (TU Berlin) /73/

Dieses Gerät arbeitet als Nahfeldphotometer. Die zugehörige CCD Kamera hat eine Auflösung von 768×567 Pixeln /14, 15, 16, 19, 47, 48, 51, 52, 68, 73, 74, 75, 76, 78, 110, 120, 131/.

Um die LVK des HLG zu ermitteln, wurde das Hohllichtleittersystem in sechs Segmente der Längen $l_s = 1$ m unterteilt (Abb. 36); für jedes Segment wurden die LVK und der Lichtstrom separat gemessen.

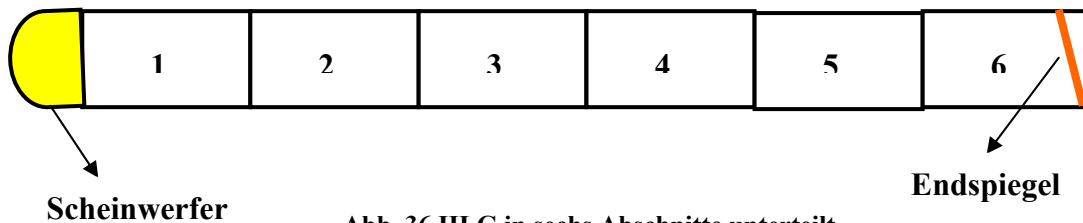


Abb. 36 HLG in sechs Abschnitte unterteilt

Die übrigen, an der Messung nicht beteiligten Teile des HLG werden auf beiden Seiten abgedeckt. Z.B. muss man die Abschnitte 1 und 2 sowie 4 bis 6 abdecken, wenn die LVK des Abschnittes 3 gemessen wird (Abb. 37).

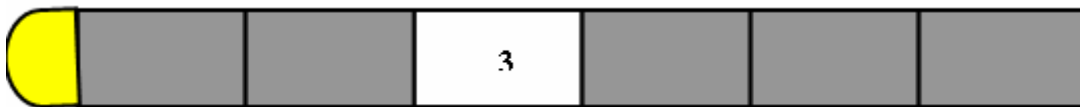


Abb. 37 Abgedeckte Abschnitte 1,2,4,5,6

Da der Extraktor eine sehr wichtige Rolle für die Lichtauskopplung spielt, wird der Vergleich der gemessenen und berechneten Beleuchtungsstärkeverteilungen für zwei verschiedene Extraktoren: a) Extraktorfilm bzw. b) Spiegelextraktor bei verschiedenen Höhen der Installation des HLG über der Nutzebene durchgeführt.

Die Lichteinspeisung erfolgt durch einen speziellen Scheinwerfer (Abb. 3) mit einer Osram Lampe HQI-T 400 W, dessen Lichtstrom am Drehspiegelgoniophotometer bei 230 V zu $\Phi_{SL} = 26600$ lm gemessen wurde.

4.2.1 HLG mit Extraktorfilm

Der diffus reflektierende Extraktor, der als Extraktorfilm im HLG verwendet wurde, hat einen diffusen Reflexionsgrad von 80 %; er wurde mit einer U-Kugel-Anordnung gemessen /37/.

Im Prinzip können auch ein Extraktorfilm (LEF) mit hohem Reflexionsgrad bis zu 96 % im HLG verwendet werden, der aber aufgeklebt werden müsste. Deshalb wurde ein Extraktor mit geringem Reflexionsgrad von 80 % benutzt, welcher einfach von HLG entfernt werden kann.

Die Abbildungen 38 und 39 zeigen den Lichtstrom und das Extraktorverhältnis der jeweiligen Segmente.

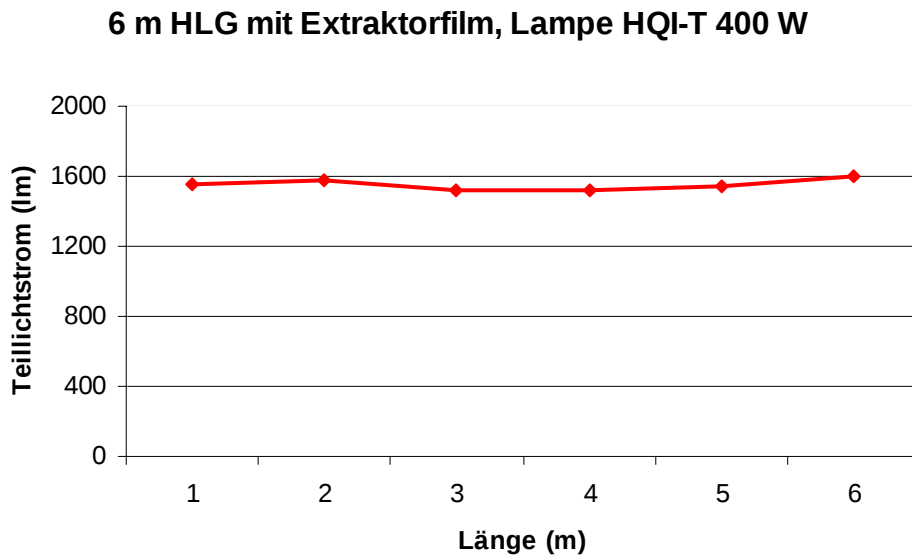


Abb. 38 Teillichtströme der einzelnen Abschnitte des HLG mit Extraktorfilm

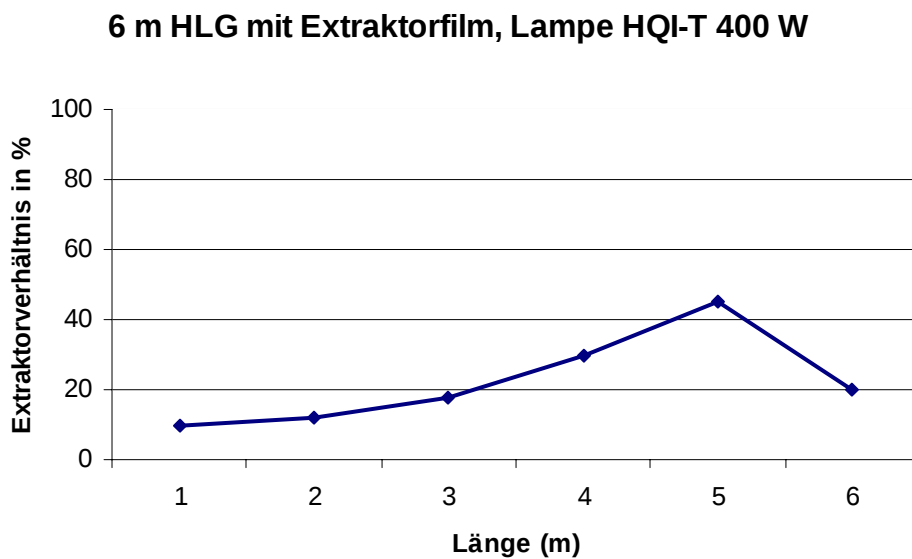


Abb. 39 Extraktorverhältnisse der einzelnen Abschnitte des HLG mit Extraktorfilm

In Tabelle 1 (Kapital 2) wurden die LVK der einzelnen Abschnitte in der C0 / C180- und der C90 / C270- Ebene graphisch dargestellt. Sie sind annähernd symmetrisch.

Der nach außen abgegebene Gesamtlichtstrom des Hohllichtleiters beträgt 9300 lm. Für den Betriebspwirkungsgrad des HLG mit diesem Extraktorfilm ergibt sich damit ein Wert von $\eta_{\text{HLG}} = 35 \%$.

4.2.2 HLG mit Spiegelextraktor

In diesem Fall wurden zusätzlich zum Endspiegel zwei ellipsenförmige Spiegel Typ 3 der Firma 3M (Abb. 40) in den Abschnitten 2 (Abstand von der Lichtquelle: 1,9 m) und 4 (Abstand von der Lichtquelle: 3,9 m) benutzt (Abb. 41). Der Endspiegel ist im Abschnitt 6.



Abb. 40 Spiegelextraktoren Type 3 der Firma 3M /133/

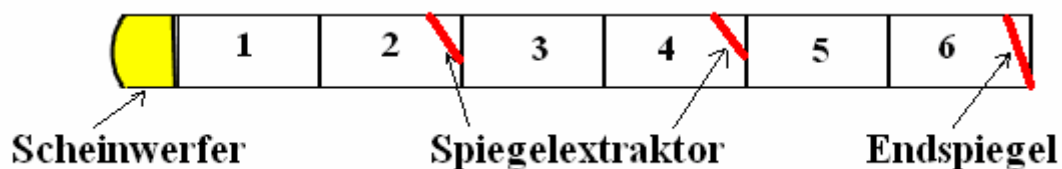


Abb. 41 HLG mit sechs Abschnitten und Spiegelextraktoren

Die Verteilung der Teillichtströme ist in Abb. 42 dargestellt.

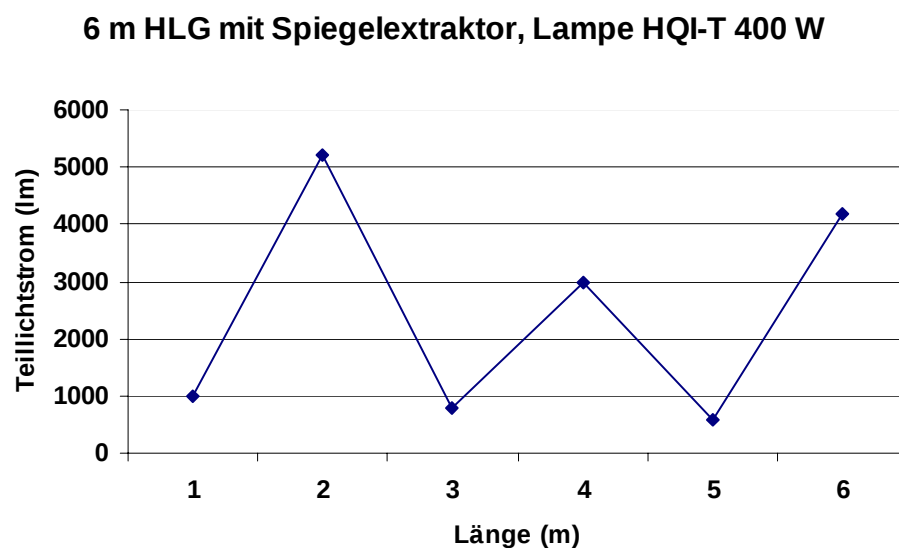


Abb. 42 Teillichtstrom der einzelnen Abschnitte des HLG mit Spiegelextraktor

Die LVK der einzelnen Abschnitte in der C0 / C180- und der C90 / C270- Ebene wurde in Tabelle 2 (Kapitel 2) graphisch gezeigt. Sie sind stärker unsymmetrisch als die des HLG mit Extraktorfilm.

Der gemessene Gesamtlichtstrom des Hohllichtleiters beträgt 14800 lm, somit ist der Betriebswirkungsgrad des HLG mit VMF und den Spiegelextraktoren $\eta_{\text{HLG}} = 56 \%$.

4.3 Versuchsraum

Bei dem ausgewählten Versuchsraum E224 der TU Berlin, handelt es sich um einen leeren, fensterlosen Raum mit 8,2 m Breite, 5,45 m Tiefe und 7,5 m Höhe. Die Messungen dienen ausschließlich der Überprüfung der von dem Beleuchtungsplanungsprogramm RELUX gelieferten Ergebnisse.

Weil Wände, Boden und Decke nicht schwarz sind, muss man sie bei der Berechnung die Direkt- und Indirektbeleuchtungsstärke einbeziehen. Die Lichtreflexionseigenschaften der Raumbegrenzungsflächen wurden mit Hilfe eines ρ_{Diff} -Messgerätes der Firma LMT gemessen (Abb. 43). Das Gerät besteht aus einem Messkopf und einem Anzeigegerät mit digitalem Display, welches den Wert des diffusen Reflexionsgrades der gemessenen Fläche mit einer Auflösung von 0,1 % ausgibt /122/.

Mit diesem Gerät wurden die Lichtreflexionsgrade von Boden, Decke, Wänden und Türen des Versuchsraums ermittelt. Die Mittelwerte der Reflexionsgrade der Raumbegrenzungsflächen sind in folgender Tabelle angegeben.

Tabelle 14 Lichtreflexionsgrade des Versuchsraums bei diffusem Lichteneinfall

Mittlerer Reflexionsgrad	
ρ_{Decke}	0,86
ρ_{Boden}	0,18
$\rho_{\text{Wände}}$	0,51
$\rho_{\text{Türen}}$	0,52



Abb. 43 ρ_{Diff} -Messgeräte im Testraum

4.4 Messungen der Beleuchtungsstärkeverteilungen

Der HLG wurde im Versuchsraum mit Hilfe eines Gerüsts zunächst in der Höhe $h = 3,35$ m und dann in der Höhe 4,35 m installiert (Abb. 44). Die Messungen wurden mit dem Extraktorfilme (symmetrische LVK) und mit dem Spiegelextraktor (unsymmetrische LVK) durchgeführt.



Abb. 44 HLG im Testraum

Um gemessene und berechnete Beleuchtungsstärkeverteilungen vergleichen zu können, müssen beide im gleichen Raster vorliegen. Da das RELUX- Programm nicht über die Möglichkeit einer Koordinatenangabe zur Erzeugung eines Messrasters verfügt, müssen die Messorte dem vom RELUX-Programm selbst erzeugten Raster angepasst werden. Für den Versuchsraum ergab sich folgende Anzahl von Rastermesspunkten:

Breite: 20 Punkte

Tiefe: 15 Punkte

Daraus ergibt sich eine Anzahl der Messpunkte von 300.

Die Beleuchtungsstärken an diesen Punkten wurden mit einem Luxmeter 106E der Firma PRC aufgenommen. Der Messkopf des Gerätes wurde an einem Stativ mit kardanischer Aufhängung in Höhe der Nutzebene $h = 0,70$ m befestigt.

4.4.1 Gemessene Beleuchtungsstärkeverteilungen des HLG mit Extraktorfilm

Die Abbildungen 45 (3D-Grafik) und 46 sowie die Tabelle 15 zeigen die gemessene Beleuchtungsstärkeverteilung im Versuchsraum, wenn im Innern des Hohllichtleiters der Extraktorfilm benutzt wurde, bei einer Aufhängehöhe des HLG von 3,35 m.

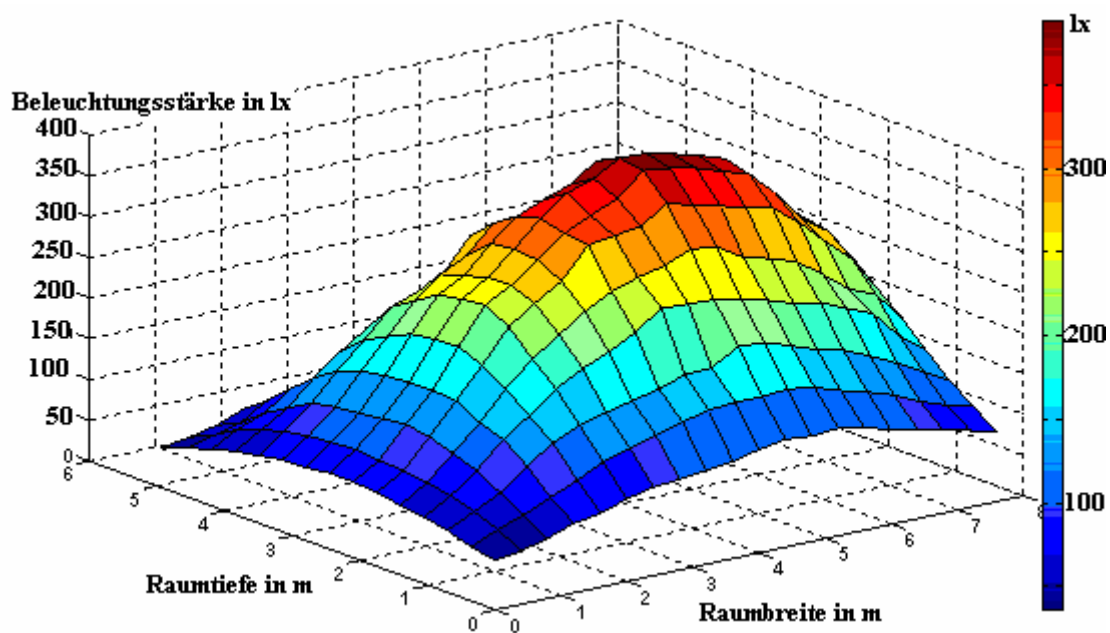


Abb. 45 Gemessene Beleuchtungsstärke im Versuchsraum für HLG mit Extraktorfilm ($h = 3,35$ m)

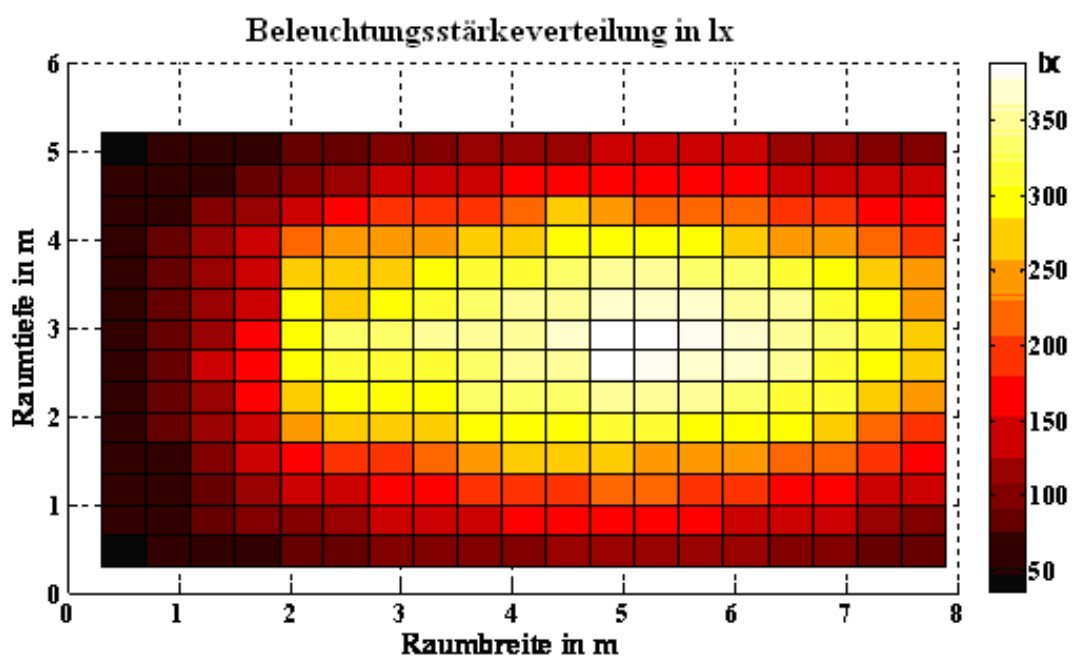


Abb. 46 Gemessene Beleuchtungsstärke im Versuchsraum für HLG mit Extraktorfilm ($h = 3,35$ m)

Tabelle 15 Gemessene Beleuchtungsstärkeverteilung für HLG mit Extraktorfilm (h = 3,35 m)

Position bzgl. Raumtiefe in m	Position bzgl. Raumbreite in m																				
		0,3	0,7	1,1	1,5	1,9	2,3	2,7	3,1	3,5	3,9	4,3	4,7	5,1	5,5	5,9	6,3	6,7	7,1	7,5	7,9
	0,3	47	51	60	71	77	87	94	97	101	105	113	118	115	118	112	102	96	87	80	71
	0,65	51	67	78	92	106	122	132	140	150	157	160	177	162	157	146	137	126	112	100	93
	1	58	70	84	110	131	146	165	172	180	190	192	211	208	198	186	178	164	148	131	113
	1,35	62	72	98	132	154	194	201	221	238	261	272	258	252	243	232	226	212	198	163	140
	1,7	64	75	111	142	249	279	274	281	290	298	306	319	311	304	296	285	263	218	204	168
	2,05	65	79	123	158	273	289	297	305	324	329	333	354	359	347	337	320	316	275	237	192
	2,4	66	84	127	152	293	311	318	322	338	343	356	384	380	373	362	351	321	292	261	218
	2,75	67	87	121	153	298	328	337	345	352	359	371	389	387	380	371	360	335	312	266	219
	3,1	66	83	118	150	285	284	299	320	335	340	352	374	372	366	356	345	321	296	247	206
	3,45	63	80	115	149	263	273	280	296	310	321	328	343	340	332	323	319	295	282	234	185
	3,8	60	78	110	144	227	246	237	243	264	271	298	297	301	288	268	252	234	212	198	166
	4,15	55	71	93	118	144	165	186	194	202	211	258	235	226	218	209	200	189	169	157	142
	4,5	49	67	72	90	104	118	132	141	149	163	172	178	176	170	160	151	142	133	125	114
4,85	42	54	58	72	79	87	99	106	110	117	123	128	130	136	136	124	119	105	98	81	
5,2	36	42	49	61	66	70	75	86	88	89	90	90	91	96	101	97	90	78	70	63	

Wie die Tabelle 15 zeigt, liegen die Höchstwerte von bis zu 389 lx erwartungsgemäß auf der Messlinie unter der Längsachse des HLG (Position in Raumtiefe: 2,75 m und Position in Raumbreite: 4,7 m). In der Nähe der Wände des Versuchsraums liegen die Werte nur noch in einem Bereich von 36 lx bis 219 lx.

Wenn die Aufhängenhöhe des HLG 4,35 m beträgt, liegen die Höchstwerte von bis zu 267 lx wiederum unter dem HLG und die minimale Werte von 61 lx bis 167 lx in der Nähe der Wände.

4.4.2 Gemessene Beleuchtungsstärkeverteilungen des HLG mit Spiegelextraktoren

Die Abbildungen 47 (3D-Grafik) und 48 sowie die Tabelle 16 zeigen die gemessene Beleuchtungsstärkeverteilung im Versuchsraum, wenn im Innern des Hohllichtleiters Spiegel als Extraktor (Position in Raumtiefe: 2,75 m und Positionen in Raumbreite 3,5 und bzw. 5,5 m) benutzt wurden und die Aufhängenhöhe des HLG von 3,35 m ist.

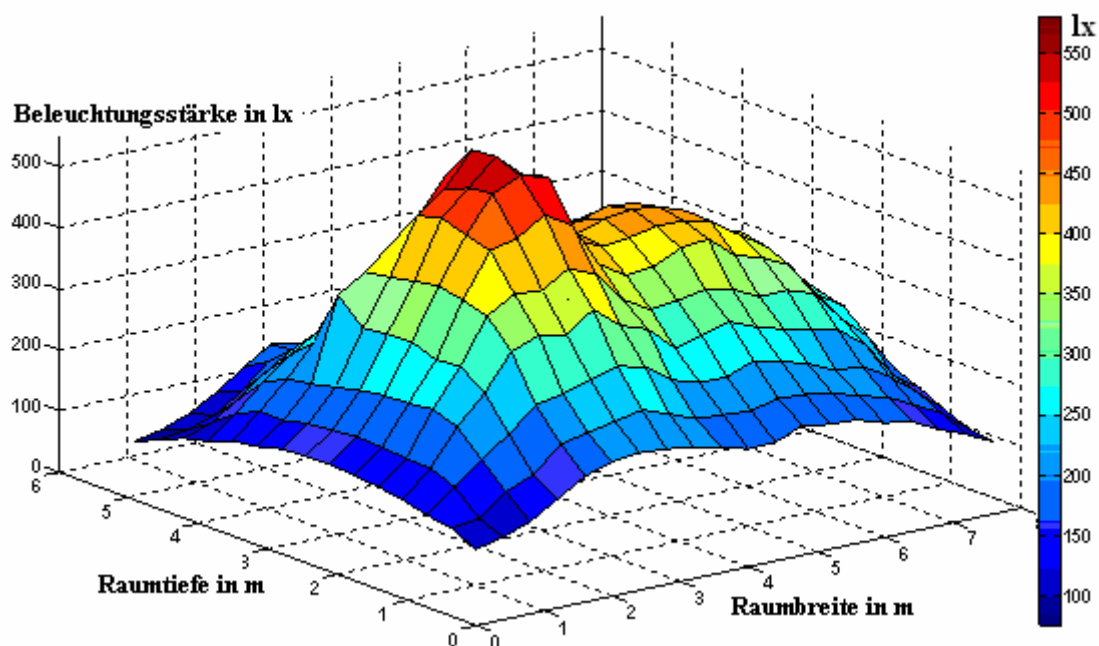


Abb. 47 Gemessene Beleuchtungsstärke im Versuchsraum für HLG mit Spielextraktoren ($h = 3,35$ m)

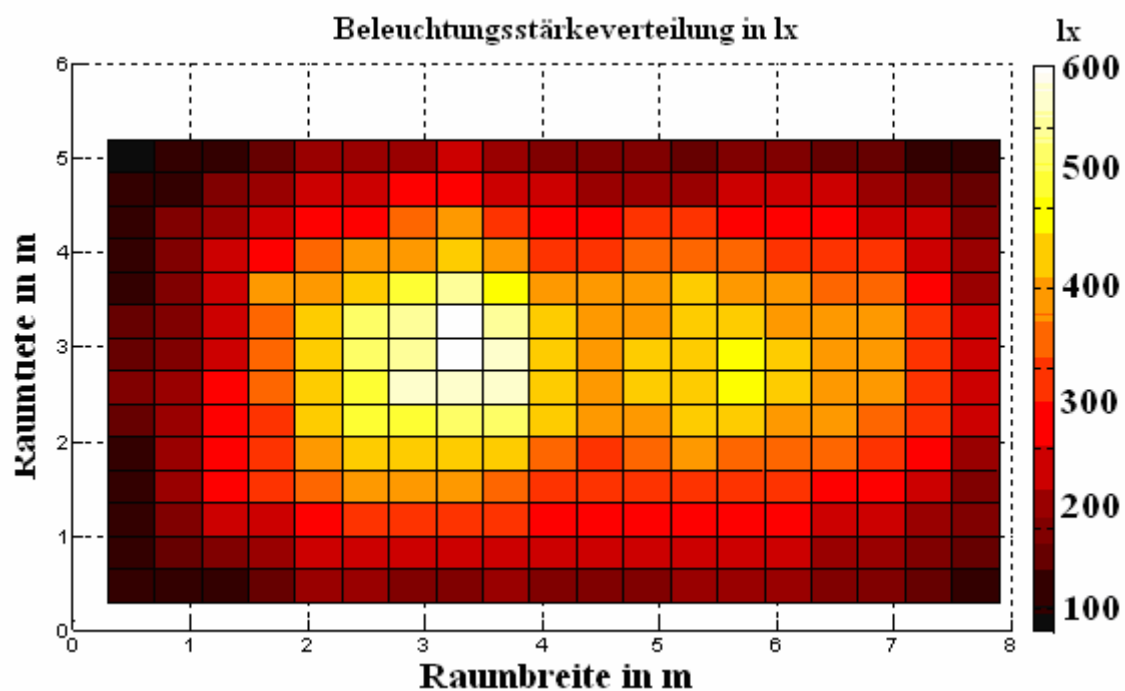


Abb. 48 Gemessene Beleuchtungsstärke im Versuchsraum für HLG mit Spielextraktoren ($h = 3,35$ m)

Die Beleuchtungsstärkeverteilung ist wie erwartet ungleichmäßig und inhomogen.

Tabelle 16 Gemessene Beleuchtungsstärkeverteilungen für HLG mit Spiegelextraktoren (h = 3,35 m)

	Position bzgl. Raumbreite in m																		
	0,3	0,7	1,1	1,5	1,9	2,3	2,7	3,1	3,5	3,9	4,3	4,7	5,1	5,5	5,9	6,3	6,7	7,1	7,5
Position bzgl. Raumtiefe in m	0,3	105	128	154	186	218	227	225	213	195	186	173	174	192	180	165	162	150	137
	0,65	126	154	182	216	245	268	268	272	252	218	215	212	222	219	212	197	186	163
	1	132	169	204	243	288	332	322	347	312	267	253	253	270	258	236	225	221	195
	1,35	142	185	218	278	341	383	390	432	375	336	294	305	331	300	281	278	256	243
	1,7	149	186	238	300	380	427	454	502	442	376	343	348	387	347	333	311	297	285
	2,05	153	189	243	318	402	450	465	557	512	412	377	386	454	415	379	336	325	345
	2,4	157	192	250	337	410	456	486	571	550	452	402	402	483	453	419	360	324	376
	2,75	155	188	257	347	410	478	523	579	543	465	424	418	493	476	422	381	366	392
	3,1	152	184	248	332	393	457	448	574	524	439	404	387	475	441	412	374	342	375
	3,45	142	175	237	312	387	434	422	542	476	389	374	373	456	412	378	338	327	342
	3,8	136	170	218	287	346	394	412	472	412	343	323	338	396	356	342	300	296	312
	4,15	121	156	198	249	305	348	348	378	343	304	286	300	322	300	282	265	258	276
	4,5	111	126	166	203	246	277	283	286	277	254	243	239	274	246	243	217	204	200
	4,85	94	108	132	165	196	215	227	234	225	202	203	199	215	202	191	180	172	162
	5,2	76	92	111	128	160	170	184	183	178	169	156	156	168	161	156	153	145	133

Nach Tabelle 16 liegen die Höchstwerte von bis zu 579 lx erwartungsgemäß unmittelbar unter dem ersten Spiegelextraktor des HLG (Position in Raumtiefe: 2,75 m und Position in Raumbreite: 3,1 m). In der Nähe der Wände des Versuchsraums liegen die Werte nur noch in einem Bereich von 76 lx bis 227 lx.

Mit der Aufhängehöhe des HLG von 4,35 liegen die Höchstwerte von bis zu 396 lx wiederum unter dem ersten Spiegelextraktor des HLG und in der Nähe der Wände die Werte nur noch in einem Bereich von 100 lx bis 202 lx.

4.5 Vergleich HLG mit Extraktorfilm und Spiegelextraktoren

In der Tabelle 17 sind Maximalwerte, Minimalwerte und Mittelwerte sowie Gleichmäßigkeit der gemessenen Beleuchtungsstärke für die verschiedenen Tests des Hohllichtleiters im Spezialversuchsraum dargestellt.

Tabelle 17 Gemessene Beleuchtungsstärke für HLG mit verschiedenen Extraktoren und Höhe

	Gemessene Beleuchtungsstärke in lx			Gleichmäßigkeit	
	Maximum	Minimum	Mittel	g ₁	g ₂
HLG mit Extraktorfilm (h = 3,35 m)	389	36	190	0,19	0,09
HLG mit Extraktorfilm (h = 4,35 m)	267	61	160	0,38	0,23
HLG mit Spiegelextraktor(h = 3,35 m)	579	76	273	0,28	0,13
HLG mit Spiegelextraktor(h = 4,35 m)	396	100	240	0,42	0,25

Die Gleichmäßigkeiten g_1 und g_2 der Beleuchtungsstärke wurden mit Hilfe der Gleichungen (15) und (16) errechnet /23, 36/.

$$g_1 = \frac{E_{\min}}{\bar{E}} \quad (15)$$

$$g_2 = \frac{E_{\min}}{E_{\max}} \quad (16)$$

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n E_i \quad (17)$$

Dabei ist

$E_{\min}$: minimale Beleuchtungsstärke an einem der Messpunkte

$E_{\max}$: maximale Beleuchtungsstärke an einem der Messpunkte

$\bar{E}$: mittlere Beleuchtungsstärke der Nutzebene

E_i : Beleuchtungsstärke am Messpunkt i

n : Anzahl der Messpunkte

Aus den Ergebnissen der Beleuchtungsstärke in Tabellen 16 und 17 werden folgende Erkenntnisse gewonnen:

- 1- Je größer die Höhe der Installation des HLG ist, desto größer ist die Gleichmäßigkeit.
- 2- Bei eventuellen Lichtplanungen muss auch die Blendung berücksichtigt werden, da die LVK des HLG mit Spiegelextraktoren stark unsymmetrisch ist, und auch einige Punkte der Messebene eine sehr hohe Beleuchtungsstärke aufweisen.
- 3- Trotz der symmetrischen LVK des HLG mit Extraktorfilm (ausgekoppelter Lichtstrom von 9300 lm) sind g_1 und g_2 kleiner als ein HLG mit Spiegelextraktoren (ausgekoppelter Lichtstrom von 14800 lm).

Generell sind die g -Werte relativ klein, weil der Versuchsraum mit einer Tiefe von 5,45 m nur mit einer durch den HLG Lampe (HQL-T 400 W) ausgeleuchtet wurde.

4.6 Berechnungen der Beleuchtungsstärkeverteilungen

Die ermittelten LVK des HLG wurden in das Beleuchtungsplanungsprogramm RELUX 2006 für einen Raum mit den Abmessungen des realen Versuchsraums eingebunden und die von dem Programm berechneten Ergebnisse in Hinblick auf ihre Übereinstimmung mit den Messergebnissen beurteilt.

Die relative Abweichung (f_i) der berechneten von den gemessenen Werten am Messpunkt i wurde durch die Gleichung 18 ermittelt.

$$f_i = \frac{E_{\text{berechnet},i} - E_{\text{gemessen},i}}{E_{\text{gemessen},i}} \times 100 \% \quad (18)$$

4.6.1 Relative Abweichung mit Extraktorfilm

Die relativen Abweichungen zwischen gemessenen und den berechneten Beleuchtungsstärkeverteilungen für den HLG mit Extraktorfilm sind in Tabellen 18 und 19 für die Installationshöhe 3,35 m bzw. 4,35 m zusammengestellt.

Tabelle 18 Relative Abweichung der berechneten von den gemessenen Werten in % mit Extraktorfilm (h = 3,35 m)

	Position bzgl. Raumbreite in m																				
	0,3	0,7	1,1	1,5	1,9	2,3	2,7	3,1	3,5	3,9	4,3	4,7	5,1	5,5	5,9	6,3	6,7	7,1	7,5	7,9	
Position bzgl. Raumtiefe in m	0,3	2	7	7	9	10	9	10	13	13	14	12	8	10	4	1	5	3	2	8	-4
	0,65	9	6	9	11	9	4	4	4	1	1	2	3	1	1	3	2	1	1	3	-1
	1	7	9	8	9	10	5	6	6	7	1	5	1	1	4	5	2	1	1	3	-3
	1,35	6	7	8	6	7	10	6	6	9	1	3	3	4	6	6	1	2	7	3	-5
	1,7	7	6	8	8	9	11	7	9	10	8	6	2	3	9	7	4	3	3	7	-3
	2,05	4	7	9	9	8	9	8	8	6	8	8	3	5	6	9	7	6	4	9	-4
	2,4	3	8	9	10	10	8	8	12	10	11	10	4	5	5	8	9	15	2	9	-1
	2,75	3	9	9	7	8	9	10	11	10	8	10	6	6	7	9	8	12	3	7	-1
	3,1	7	9	10	8	12	10	11	10	8	9	11	6	7	6	9	6	11	3	5	-7
	3,45	5	9	9	9	9	9	8	7	7	8	8	8	9	9	7	10	14	6	8	-2
	3,8	10	10	8	7	9	10	7	9	3	10	9	3	1	4	4	7	5	5	5	-2
	4,15	10	11	8	8	10	11	9	8	7	8	6	5	8	7	6	6	8	2	2	-3
	4,5	5	6	11	5	8	7	8	9	6	7	9	6	7	9	5	5	3	1	1	-2
	4,85	6	11	10	1	9	8	8	11	8	12	9	7	4	1	4	2	-2	1	4	-4
	5,2	6	7	8	2	5	9	7	6	9	14	14	9	10	7	1	1	1	4	-3	-6

Tabelle 19 Relative Abweichung der berechneten von den gemessenen Werten in % mit Extraktorfilm (h = 4,35 m)

	Position bzgl. Raumbreite in m																				
Position bzgl. Raumtiefe in m		0,3	0,7	1,1	1,5	1,9	2,3	2,7	3,1	3,5	3,9	4,3	4,7	5,1	5,5	5,9	6,3	6,7	7,1	7,5	7,9
	0,3	-4	-5	-2	1	-2	-3	-4	-5	-3	-7	4	-4	-6	-4	-4	2	-3	-3	-7	-7
	0,65	-3	3	5	2	7	6	6	6	8	6	6	4	5	6	8	6	7	7	-4	-5
	1	-3	3	6	2	8	5	9	6	6	10	7	9	10	8	10	10	7	7	-1	-2
	1,35	-1	7	5	3	1	6	9	5	9	6	7	10	9	10	10	6	8	3	-3	-2
	1,7	1	4	9	7	10	6	8	6	8	10	9	8	9	8	8	9	4	2	1	-1
	2,05	0	4	9	3	5	5	8	9	5	7	8	10	9	10	7	5	1	1	2	-7
	2,4	-1	4	8	3	5	6	6	9	7	8	11	8	8	9	8	3	3	3	2	-8
	2,75	-2	4	8	6	7	6	6	10	7	8	9	4	9	7	7	8	1	4	2	-2
	3,1	-2	5	8	4	6	5	10	10	8	8	11	8	10	7	8	3	2	5	3	-8
	3,45	-2	2	6	5	5	4	8	11	6	8	6	6	6	6	6	7	1	3	2	-8
	3,8	-2	4	4	6	7	6	7	10	6	7	9	8	8	7	8	7	1	1	1	-8
	4,15	1	4	4	6	6	6	7	9	6	8	9	7	8	7	8	9	6	2	2	-5
	4,5	-4	4	7	6	6	6	7	7	4	7	8	9	6	8	7	6	5	2	-1	-7
	4,85	-4	-4	5	8	4	5	7	7	6	8	9	5	6	5	6	6	6	6	-2	-6
5,2	-5	-7	-7	-3	-2	5	6	6	11	7	7	11	7	5	10	4	6	4	1	-8	

Wie die Tabellen 18 und 19 zeigen, ergeben sich systematische relative Abweichungen bis zu 15 % für eine Aufhängenhöhe von 3,35 m und bzw. 11 % in der Höhe von 4,35 m. Die mittlere relative Abweichung f_{mittel} in der Höhe von 3,35 m und 4,35 m betragen 6,8 % bzw. 5,9 %.

$$f_{\text{mittel}} = \frac{\sum_{i=1}^n |f_i|}{n} \quad (19)$$

Die Tabelle 20 zeigt die relative mittlere Abweichung $\bar{f}_{\text{mittel}}$ der Beleuchtungsstärke auf der Nutzebene.

$$\bar{f}_{\text{mittel}} = \frac{|\bar{E}_{\text{gemessen}} - \bar{E}_{\text{berechnet}}|}{\bar{E}_{\text{gemessen}}} \times 100 \% \quad (20)$$

$\bar{E}_{\text{gemessen}}$: mittlere gemessene Beleuchtungsstärke der Nutzebene

$\bar{E}_{\text{berechnet}}$: mittlere berechnete Beleuchtungsstärke der Nutzebene

Tabelle 20 Mittelwert der gemessenen und berechneten Beleuchtungsstärke des HLG mit Extraktorfilm auf der Nutzebene

	$\bar{E}_{\text{gemessen}}$ in lx	$\bar{E}_{\text{berechnet}}$ in lx	$\bar{f}_{\text{mittel}}$ in %
HLG mit Extraktorfilm (h = 3,35 m)	190	200	5,3
HLG mit Extraktorfilm (h = 4,35 m)	160	168	5,0

4.6.2 Relative Abweichung mit Spiegelextraktor

Abbildungen 49 und 50 sowie die Tabelle 21 zeigen die berechnete Beleuchtungsstärkeverteilung im Versuchsraum, wenn im Innern des Hohllichtleiters den Spiegel als Extraktor benutzt wurden.

Es gibt große Unterschiede zwischen gemessener und berechneter Beleuchtungsstärkeverteilung, u.a. weil die maximalen Werte nicht in demselben Punkt ermittelt wurden.

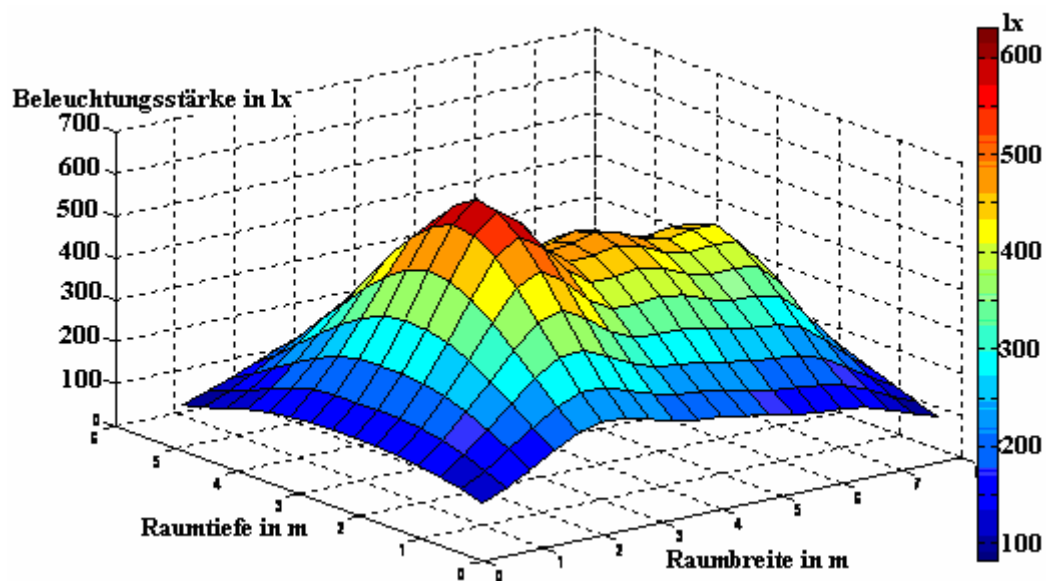


Abb. 49 Berechnete Beleuchtungsstärkeverteilung für HLG mit Spiegelextraktoren ($h = 3,35$ m)

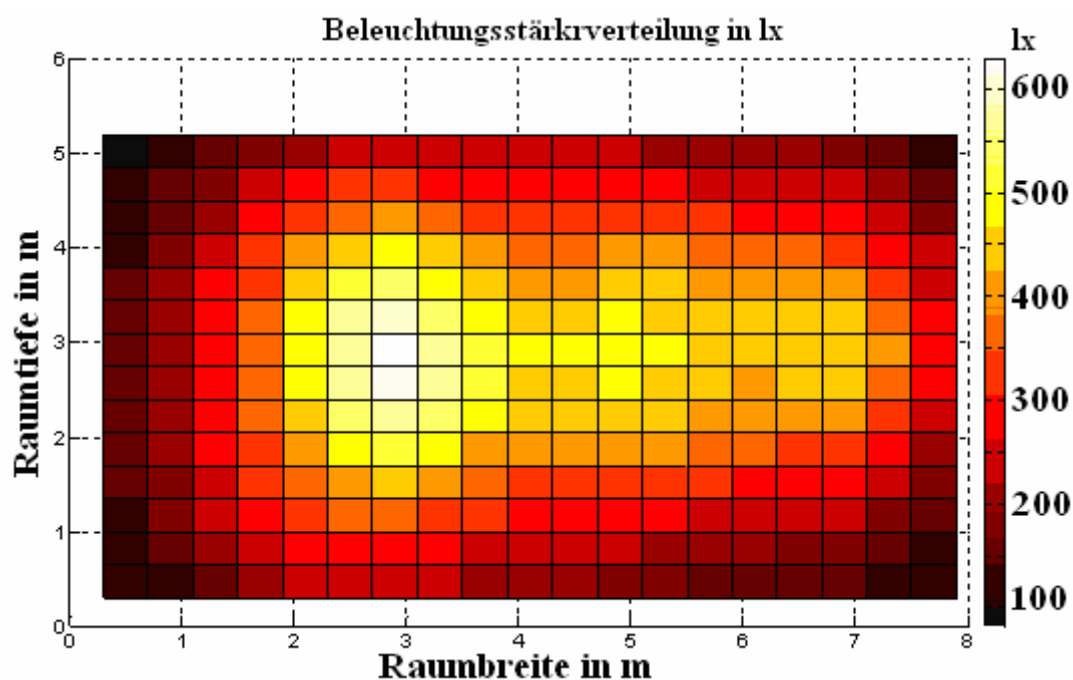


Abb. 50 Berechnete Beleuchtungsstärkeverteilung für HLG mit Spiegelextraktoren ($h = 3,35$ m)

Tabelle 21 Berechnete Beleuchtungsstärkeverteilungen für HLG mit Spiegelextraktoren (h = 3,35 m)

		Position bzgl. Raumbreite in m																			
Position bzgl. Raumtiefe in m		0,3	0,7	1,1	1,5	1,9	2,3	2,7	3,1	3,5	3,9	4,3	4,7	5,1	5,5	5,9	6,3	6,7	7,1	7,5	7,9
	0,3	112	136	168	201	230	243	242	226	208	200	196	185	175	164	155	152	143	125	104	84
	0,65	127	158	197	236	273	295	295	275	255	242	235	226	213	202	196	190	177	154	126	102
	1	137	177	224	274	323	359	364	338	309	289	281	275	264	253	248	241	223	190	152	121
	1,35	145	192	249	309	371	424	441	410	366	339	335	335	325	310	302	296	278	235	182	140
	1,7	151	202	267	340	418	487	516	478	423	389	388	394	384	363	349	347	334	283	214	159
	2,05	154	207	278	363	455	542	579	541	475	434	434	443	431	405	390	393	386	330	245	176
	2,4	156	209	283	375	478	573	620	579	506	464	467	478	464	436	424	430	426	365	269	190
	2,75	156	208	283	378	486	584	630	586	512	469	477	492	478	450	438	449	448	383	279	194
	3,1	154	208	281	371	470	558	596	553	484	447	458	474	462	436	426	435	431	370	272	190
	3,45	149	202	269	347	432	511	540	501	442	409	421	438	431	405	392	397	392	337	249	177
	3,8	142	187	245	312	386	452	474	438	391	367	376	389	383	362	348	348	343	295	221	159
	4,15	129	167	217	272	330	379	394	369	336	321	327	333	326	311	302	300	290	250	190	140
	4,5	113	144	184	229	276	310	317	299	280	273	274	276	270	259	254	250	237	203	159	123
	4,85	98	122	152	184	219	244	251	240	229	226	227	225	219	213	211	207	194	166	133	105
	5,2	83	103	124	147	170	187	196	191	183	183	182	179	178	173	171	170	159	136	108	87

Wie die Tabelle 21 zeigt, liegen die Höchstwerte von bis 630 lx vor dem ersten Spiegelextraktor des HLG (Position in Raumtiefe: 2,75 m und Position in Raumbreite: 2,7 m). Die Tabelle 22 stellt die Abweichung der gemessenen von den berechneten Werten dar.

Tabelle 22 Relative Abweichung der berechneten von den gemessenen Werten in % mit Spiegelextraktoren (h = 3,35 m)

		Position bzgl. Raumbreite in m																			
Position bzgl. Raumtiefe in m		0,3	0,7	1,1	1,5	1,9	2,3	2,7	3,1	3,5	3,9	4,3	4,7	5,1	5,5	5,9	6,3	6,7	7,1	7,5	7,9
	0,3	7	6	9	8	6	7	8	6	7	8	13	6	-9	-9	-6	-6	-5	-9	-13	-14
	0,65	1	3	8	9	11	10	10	1	1	11	9	7	-4	-8	-8	-4	-5	-6	-10	-3
	1	4	5	10	13	12	8	13	-3	-1	8	11	9	-2	-2	5	7	1	-3	-5	-1
	1,35	2	4	14	11	9	11	13	-5	-2	1	14	10	-2	3	8	7	9	-3	-6	-1
	1,7	1	9	12	13	10	14	14	-5	-4	4	13	13	-1	5	5	12	13	-1	-3	1
	2,05	1	10	14	14	13	20	25	-3	-7	5	15	15	-5	-2	3	17	19	-4	-8	-1
	2,4	-1	9	13	11	17	26	28	1	-8	3	16	19	-4	-4	1	19	32	-3	-6	-1
	2,75	1	11	10	9	19	22	21	1	-6	1	13	18	-3	-6	4	18	22	-2	-6	-2
	3,1	1	13	13	12	20	22	33	-4	-8	2	13	23	-3	-1	3	16	26	-1	-6	1
	3,45	5	15	14	11	12	18	28	-8	-7	5	13	17	-6	-2	4	18	20	-2	-7	-3
	3,8	4	10	12	9	12	15	15	-7	-5	7	16	15	-3	2	2	16	16	-5	-6	-3
	4,15	7	7	10	9	8	9	13	-2	-2	6	14	11	1	4	7	13	12	-9	-4	-1
	4,5	2	14	11	13	12	12	12	5	1	8	13	16	-2	5	5	15	16	2	-2	1
	4,85	4	13	15	12	12	14	11	3	2	12	12	13	2	5	11	15	13	3	1	2
	5,2	9	12	12	15	6	10	7	4	3	8	17	15	6	8	10	11	10	2	-1	-2

Das Maximum der relativen Abweichung beträgt 33 % und die mittlere relative Abweichung 8,7 %.

Für die Aufhängenhöhe von 4,35 beträgt das Maximum der relativen Abweichung 22 % und die mittlere relative Abweichung 7,4 %.

In Tabelle 23 ist die relative Abweichung der mittleren Beleuchtungsstärke auf der Nutzebene dargestellt.

Tabelle 23 Mittelwert der gemessenen und berechneten Beleuchtungsstärke des HLG mit Spiegelextraktoren auf der Nutzebene

	$\bar{E}_{\text{gemessen}}$ in lx	$\bar{E}_{\text{berechnet}}$ in lx	$\bar{f}_{\text{mittel}}$ in %
HLG mit Spiegelextraktor (h = 3,35 m)	273	290	6,2
HLG mit Spiegelextraktor (h = 4,35 m)	240	253	5,4

Wie die Tabelle 16 im Vergleich zur Tabelle 21 zeigt, liegen die Höchstwerte an verschiedenen Positionen. Der Lichtaustritt aus den untersuchten 6 Abschnitten des HLG bei Verwendung der Spiegelextraktoren (Abschnitte 2, 4 und 6) erfolgt auch unterhalb dieser einzelnen Abschnitte sehr ungleichmäßig.

4.7 Untersuchung der Software

Die Beleuchtungsstärke auf der Nutzebene besteht aus zwei Teilen: a) direkte Beleuchtungsstärke und b) indirekte Beleuchtungsstärke. Da für die untersuchten HLG die Direktbeleuchtungsstärke zu über 95 % an der Gesamtbeleuchtungsstärke beteiligt ist, wird der Algorithmus der Berechnung der Direktbeleuchtungsstärke im Detail analysiert.

Um die Berechnungsmethode des Planungsprogramms zur Ermittlung der direkten Beleuchtungsstärke zu untersuchen, wurde ein Raum mit gleichen Breite und Länge wie der Versuchsraum aber mit 25 m Höhe ausgewählt. Die Leuchte und der Messpunkt befinden sich in der Mitte des Raums. Für die Berechnungen wurde ein Abschnitt des HLG mit dem Spiegelextraktor (Abschnitt 2 Tabelle 2) zugrunde gelegt.

Die Berechnung der direkten Beleuchtungsstärke erfolgte auf der Grundlage des photometrischen Entfernungsgesetzes.

$$E = \frac{I(\gamma)}{r^2} \cdot \cos(\varepsilon_2) \cdot \Omega_0 \quad (21)$$

I: Lichtstärke in cd

h: Aufhängenhöhe der Leuchte in m

ε_2 : Lichteinfallswinkel

γ : Ausstrahlungswinkel

r: Abstand in m

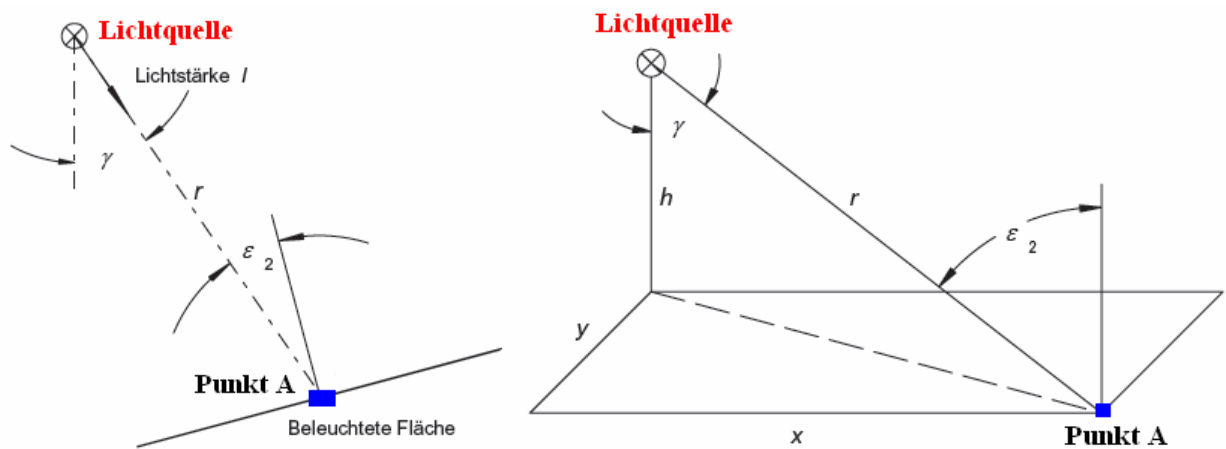


Abb. 51 Berechnung der direkten Beleuchtungsstärke

Aus der Beziehung 22 können die Gleichungen 23 und 24 abgeleitet werden (Abb. 51). Dabei ist E die direkte Beleuchtungsstärke auf einem Punkt der Nutzebene.

$$\cos(\gamma) = \cos(\varepsilon_2) = \frac{h}{r} = \frac{h}{(x^2 + y^2 + h^2)^{1/2}} \quad (22)$$

$$E = \frac{I(\gamma) \cdot h}{(x^2 + y^2 + h^2)^{3/2}} \quad (23)$$

$$E = \frac{I(\gamma) \cdot \cos^3(\varepsilon_2)}{h^2} \quad (24)$$

In Tabelle 24 wurden für eine eingestellte Leuchte berechnete Werte der direkten Beleuchtungsstärke nach der Gleichung 24 und aus dem RELUX-Programm in Abhängigkeit von der Aufhängehöhe der Leuchte für einen angenommenen Testpunkt gegenübergestellt.

Tabelle 24 Beleuchtungsstärke in den verschiedenen Höhen

Abstand zwischen Leuchte und Nutzebene in m	Berechnete Beleuchtungsstärke in lx mit Hilfe der Gleichung 24	Berechnete Beleuchtungsstärke in lx mit RELUX
25	3,8	3,8
20	6	6
17	8,2	8,2
14	12,1	12,2
12	16,4	16,6
10	23,8	23,9
8	37,2	37,4
7	48,6	48,9
6	66,2	66,6
5	95,7	96
4	149,6	150
3	266,6	267
2	594,1	595

Aus der Tabelle 24 ist zu erkennen, dass sich die Ergebnisse nur geringfügig unterscheiden. Daher ist zu beachten, dass die Lichtplanungsprogramme bei der Berechnung der direkten Beleuchtungsstärke die Leuchteunterteilung nicht berücksichtigt, und der Mittelpunkt der Leuchte ist Maßgebend für der Standort der Leuchte /57/.

Da sich der Spiegelextraktor nicht in der Mitte des HLG-Abschnitts befindet, tritt die maximale direkte Beleuchtungsstärke bei Messungen nicht im Mittelpunkt, sondern direkt unterhalb der Spiegelextraktoren auf.

Die gleichen Untersuchungen wurden wiederholt, indem die Leuchte bei der Berechnung nach Gleichung (24) in 5 gleiche Teile mit gleichen LVK unterteilt wurde.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 25 dargestellt. Hier ist zu sehen, dass die relative Abweichung insbesondere für kleine Aufhängehöhen bis zu 2 % betragen kann.

Tabelle 25 Beleuchtungsstärke in den verschiedenen Höhen

Abstand zwischen Leuchte und Nutzebene in m	Berechnete Beleuchtungsstärke in lx mit Hilfe der Gleichung 24 und der unterteilten Lichtquelle	Berechnete Beleuchtungsstärke in lx mit RELUX	Relative Abweichung in %
25	3,8	3,8	0,0
20	6	6	0,0
17	8,2	8,2	0,0
14	12,1	12,2	0,8
12	16,4	16,6	1,2
10	23,6	23,9	1,3
8	36,9	37,4	1,4
7	48,2	48,9	1,5
6	65,6	66,6	1,5
5	94,5	96	1,6
4	147,5	150	1,7
3	262,1	267	1,9
2	583,7	595	1,9

Je größer der Abstand ist, desto kleiner ist der Fehler der durch die Vorgabe einer punktförmigen Lichtquelle bewirkt wird.

Daraus ergibt sich, dass die berechnete direkte Beleuchtungsstärke auf einem Messpunkt ohne Berücksichtigung der Unterteilung der Leuchte immer größer als die unterteilte Leuchte ist.

4.8 Untersuchung der LVK der unterteilten Abschnitte des HLG

Die Ergebnisse des Planungsprogramms zeigen für HLG mit Extraktorfilm, ausgenommen im Bereich des Endspiegels, keine großen relativen Abweichungen von der gemessenen Beleuchtungsstärke.

Zusätzliche Messungen der LVK des in kleine Teile geteilten Abschnitts mit dem Spiegelextraktor zeigen eine ungleichmäßige Lichtstromverteilung, z. B. treten in einem 0,25 m Bereich vor dem Spiegelextraktor ca. 75 % und in 0,33 m Bereich 80 % des gesamten Lichtstroms aus. Dieses Phänomen hat einen großen Nachteil für Lichtplanungsprogramme, um die Beleuchtungsstärke einer langen Leuchte mit ungleichmäßiger LVK zu berechnen, weil die Lichtquelle als Punktlichtquelle in der Mitte der Länge der Leuchte angenommen wird.

Daher ist es notwendig, die Abschnitte mit dem Spiegelextraktor in kleinen Bereichen zu teilen und entsprechend die LVK-Messung durchzuführen.

Dazu wurden Messungen für die Teillänge von 0,5 m, 0,33m, 0,25 m, 0,2 m und 0,1 m durchgeführt. Teillängen kleiner als 0,2 m führen zu großen Fehlern. Die Teillänge von 0,2 m zeigte sich als optimal.

Aufgrund der Ergebnisse der Untersuchungen wurden die 1 m langen Abschnitte 2 mit Spiegelextraktor jeweils in 0,2 m lange Unterabschnitte (A, B, C, D und E) unterteilt (Abb. 52), um dies genauer in dem Beleuchtungsplanungsprogramm zu untersuchen.

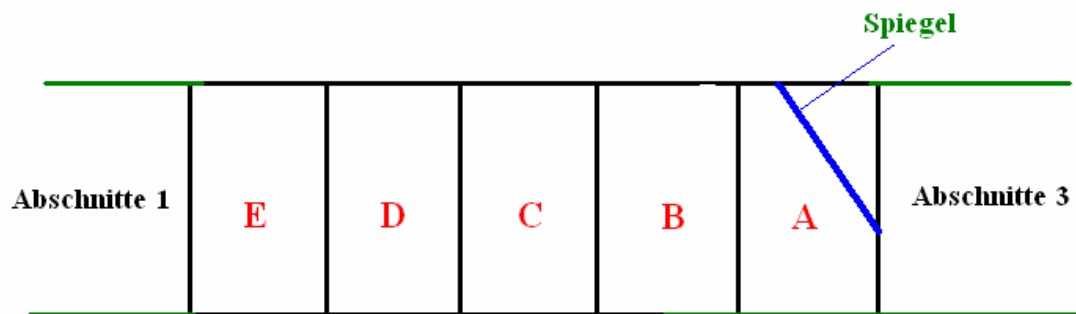


Abb. 52 Unterteilte Abschnitte 2

In Tabelle 2 (Kapitel 2) stellt die gemessene LVK des Abschnittes 2 für die volle Länge von 1 m mit dem Auskopplungslichtstrom von 5300 lm dar. Die Abb. 53 ist die gemessene LVK des Abschnittes 2, wenn er in fünf Segmente der Längen $l = 0,2$ m unterteilt wurde.

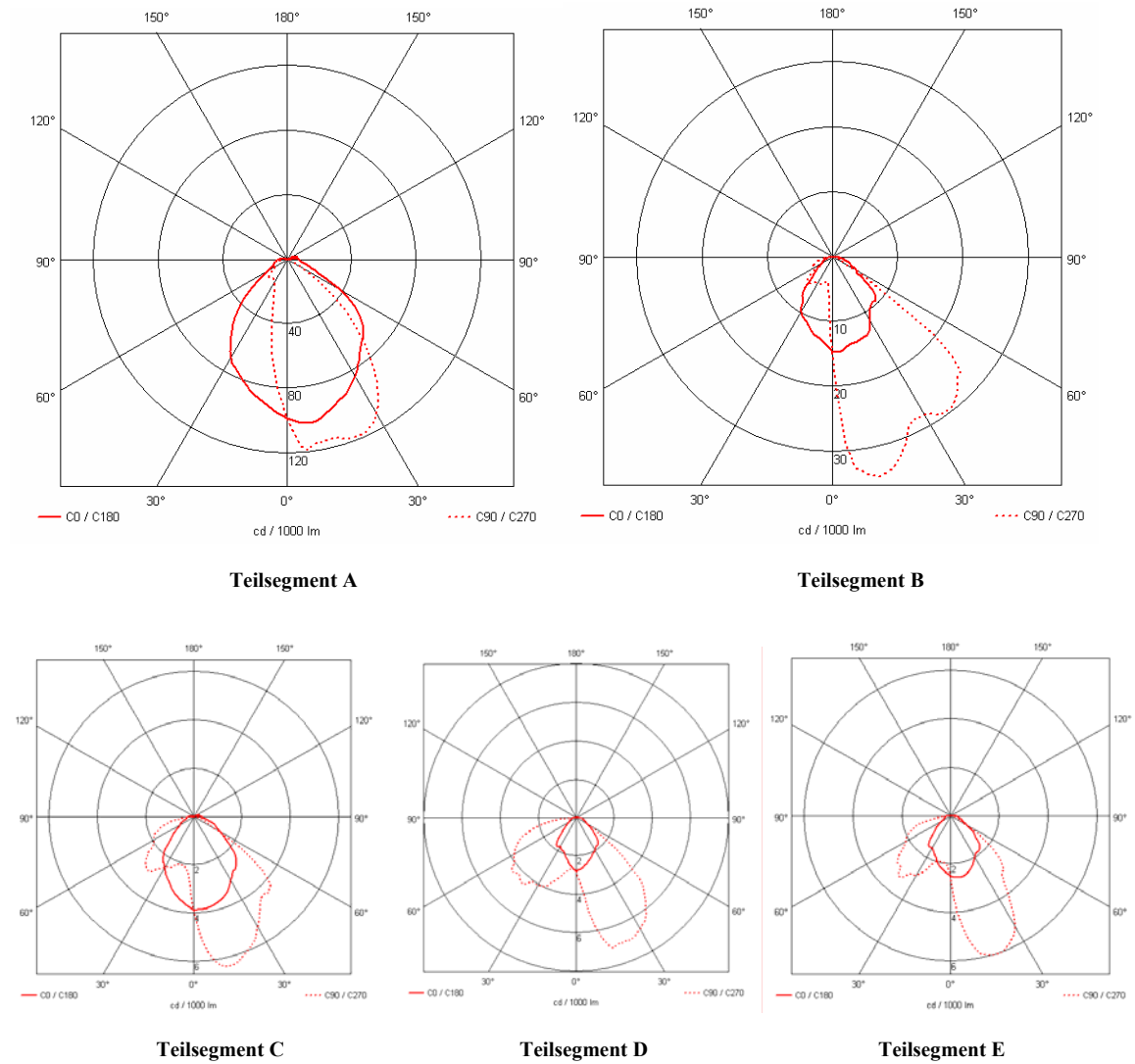


Abb. 53 Gemessene LVK des Abschnitts 2

Der Teilsegment A enthält den Spiegelextraktor mit dem Auskopplungslichtstrom von 3700 lm und er hat eine ähnliche LVK wie die LVK des gesamten Abschnitts 2. Die Abbildung 54 und die Tabelle 26 zeigen gemessene Auskopplungslichtströme der 5 Teile des Abschnittes 2 des HLG.

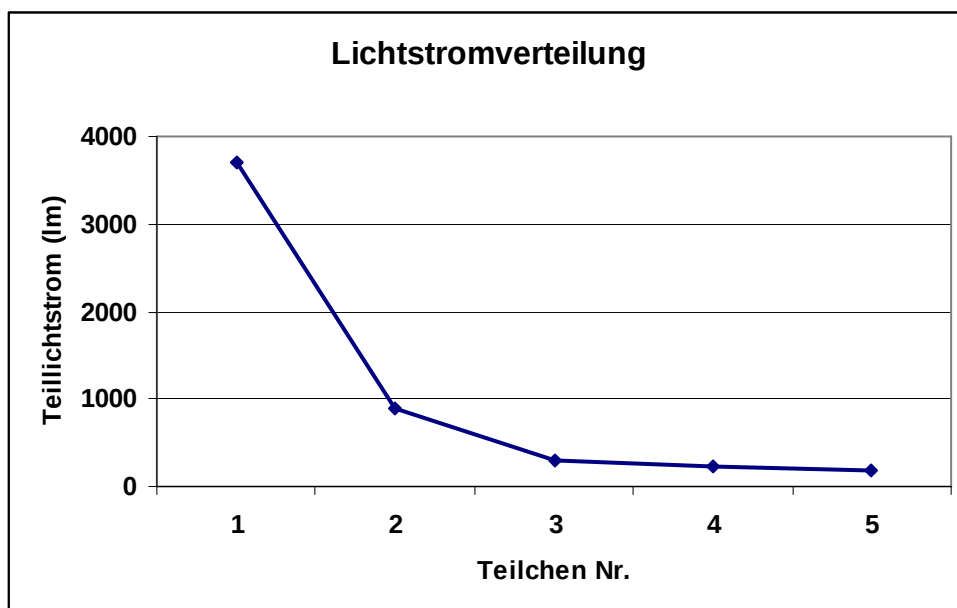


Abb. 54 Lichtströme der Teilchen des Abschnittes 2 des HLG

Tabelle 26 Lichtströme der 5 Teilchen des Abschnittes 2

	A	B	C	D	E
Lichtstrom in lm	3700	900	300	220	180
Lichtstrom in %	70	17	6	4	3

Ungleichmäßig ausgekoppelte Lichtströme können mittels einer CCD Kamera gezeigt werden. Die Abbildungen 55 stellt Leuchtdichteprofil eines HLG mit 3 m Länge dar.

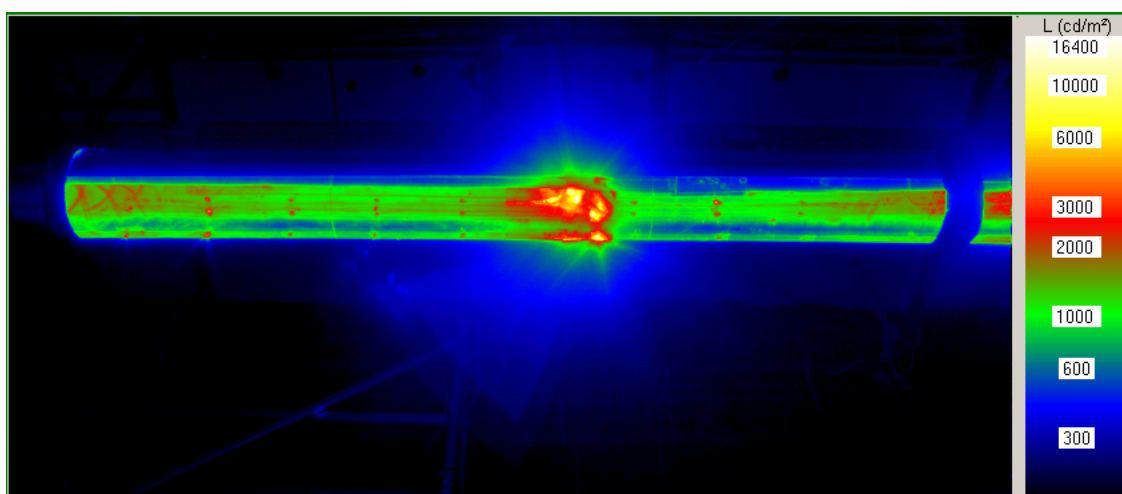


Abb. 55 Leuchtdichte des HLG mit Spiegelextraktoren

Wie die Abbildung 55 zeigt, liegt das Leuchtdichtemaximum im Bereich der Spiegelextraktoren, weil der reflektierte Lichtstrom hauptsächlich dort ausgekoppelt wird.

4.9 Untersuchung der unterteilten Abschnitte des HLG im Rechnerprogramm

Für die Abschnitte 2, 4 und 6 des untersuchten HLG mit Spiegelextraktoren wurden die LVK in 0,2 m langen Teilsegmenten gemessen. Um die Beleuchtungsstärke auf einem Punkt zu berechnen, wird die Beleuchtungsstärke jeder Teilleuchte superpositioniert. Schließlich wird durch die Summation der berechneten Anteile die Gesamtbeleuchtungsstärke ermittelt.

Die Abbildungen 56 und 57 stellen die berechnete Beleuchtungsstärkeverteilung im Versuchsraum mit neuen gemessenen LVK dar, wenn die Aufhängenhöhe des HLG 3,35 m beträgt. In diesem Zustand sehen gemessene und berechnete Beleuchtungsstärkeverteilung ähnlicher aus.

Die Tabelle 27 zeigt die Abweichung der berechneten von den gemessenen Werten für die Aufhängenhöhe von 3,35 m. Die maximale relative Abweichung beträgt 16 % und die mittlere relative Abweichung 6,4 %.

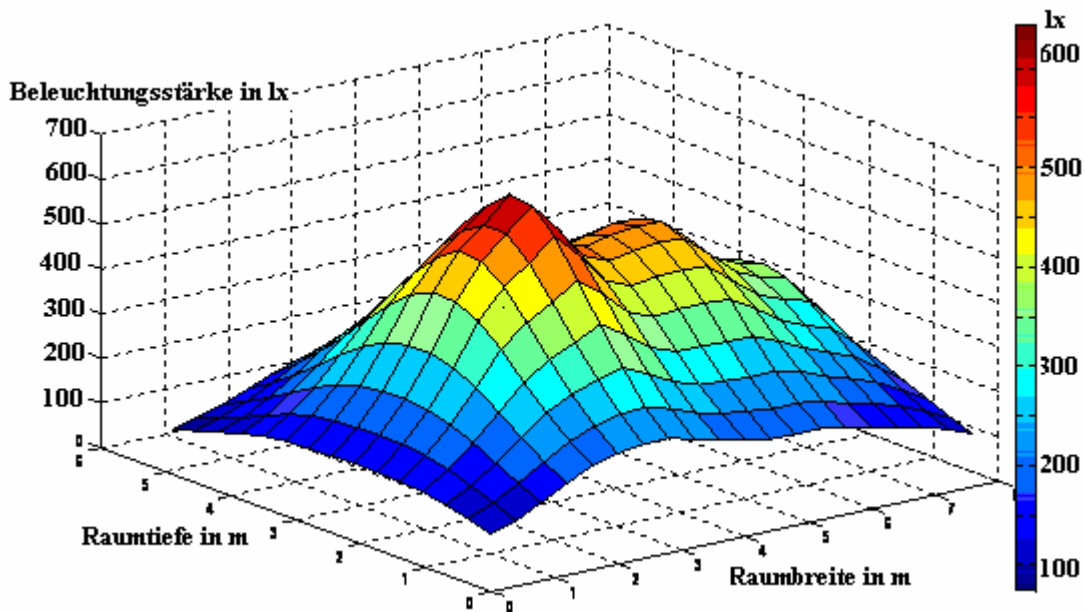


Abb. 56 Berechnete Beleuchtungsstärke für HLG mit Spiegelextraktoren ($h = 3,35$ m)

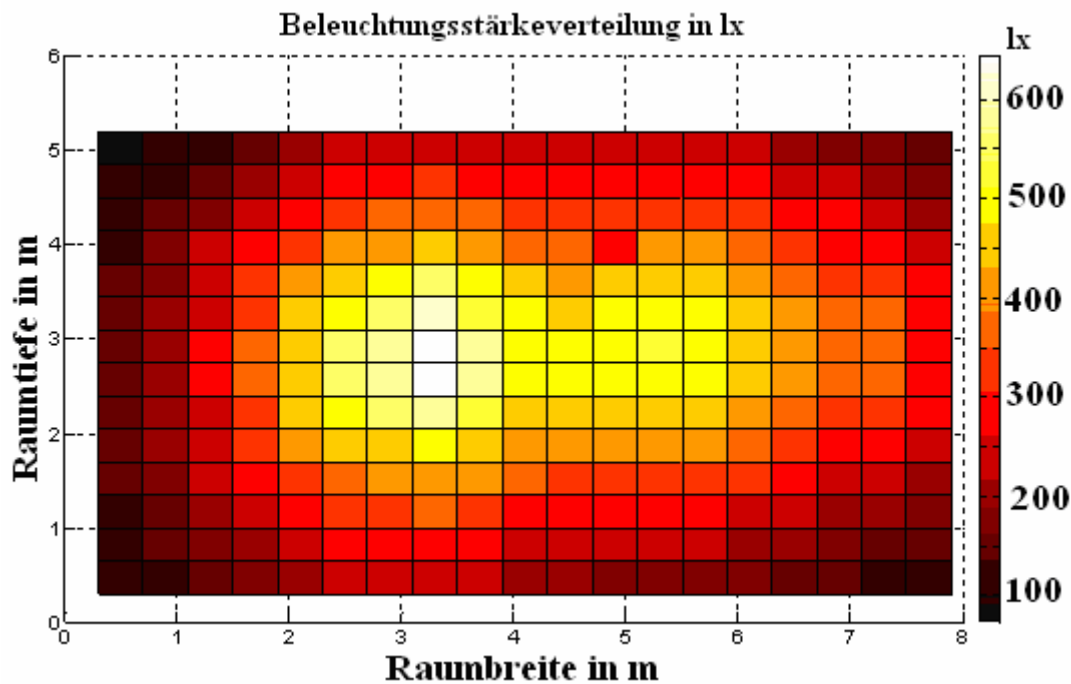


Abb. 57 Berechnete Beleuchtungsstärke für HLG mit Spiegelextraktoren (h = 3,35 m)

Tabelle 27 Relative Abweichung der berechneten von den gemessenen Werten in % mit Spiegelextraktoren (h = 3,35 m)

		Position bzgl. Raumbreite in m																			
Position bzgl. Raumtiefe in m		0,3	0,7	1,1	1,5	1,9	2,3	2,7	3,1	3,5	3,9	4,3	4,7	5,1	5,5	5,9	6,3	6,7	7,1	7,5	7,9
	0,3	-2	4	5	6	2	9	8	3	11	9	11	3	-7	-3	-9	-8	-9	-3	-4	-5
	0,65	-6	8	4	3	8	5	5	5	4	6	7	5	-2	-1	-2	-3	-4	-1	-1	7
	1	-1	-5	-3	3	5	7	7	8	9	3	8	8	-1	4	5	4	-2	1	4	10
	1,35	-1	-3	-7	-2	-3	3	7	5	5	5	3	9	4	5	7	0	-4	0	3	9
	1,7	-3	2	-4	0	1	5	6	9	6	9	8	8	6	4	1	-2	-5	7	5	12
	2,05	-3	4	4	5	8	6	7	8	4	7	10	9	11	8	5	-2	-2	4	4	11
	2,4	-6	4	7	9	9	6	9	13	5	9	11	7	8	14	6	1	2	9	9	9
	2,75	-7	5	5	9	13	10	10	11	7	8	7	10	16	8	10	7	3	11	9	8
	3,1	-5	5	6	7	11	5	7	5	2	11	16	15	10	11	11	6	3	10	8	12
	3,45	-1	7	4	4	2	6	8	4	6	9	13	14	12	9	8	7	4	10	6	13
	3,8	-2	-2	0	4	2	8	6	9	7	5	9	6	6	7	6	8	7	9	8	10
	4,15	0	-4	-5	2	10	2	8	9	9	8	7	6	7	7	9	6	7	8	10	11
	4,5	-5	2	2	3	9	2	3	10	6	9	5	8	9	5	8	10	7	9	4	13
	4,85	-4	8	7	3	4	1	5	7	8	9	7	9	8	8	11	8	5	6	8	14
	5,2	-3	3	5	2	-4	-9	6	8	5	8	9	11	11	10	11	9	8	6	6	7

Die maximale relative Abweichung der berechneten von den gemessenen Werten bei einer Aufhängenhöhe 4,35 m beträgt 9 % und die mittlere relative Abweichung 4,5 %.

4.10 Weitere Untersuchungen

Die HLG mit Spiegelextraktoren und unsymmetrischer LVK können in Lichtplanungsprogrammen mit einer ausreichenden Genauigkeit berücksichtigt werden, wenn die LVK des HLG im Bereich der Spiegelextraktoren in kleineren Segmenten gemessen werden. Da die Messung der LVK für die einzelnen Teile des HLG zeitaufwendig ist, wurde im Folgenden verschiedene Alternativen hinsichtlich der Messung der LVK analysiert und weitere Vorschläge erarbeitet.

4.10.1 Messung der LVK eines Segmentes mit Spiegelextraktor (Fall 1)

Die Länge der einzelnen HLG-Segmente (Durchmesser 0,3 m) beträgt 3 m. Daher wurde bei LVK-Messungen für die Länge der HLG-Abschnitte eine Länge von 1 m ausgewählt. In diesem Fall befinden sich die Spiegelextraktoren am Ende des jeweiligen Abschnitts. Weil der Spiegelextraktor eine große Rolle für die LVK des jeweiligen Abschnitts spielt, wurde eine neue Untersuchung durchgeführt.

Da Lichtplanungsprogramme in der Regel von Punktlichtquellen in der Mitte der Leuchte ausgehen, lässt sich die Idee entwickeln, dass sich der Spiegelextraktor während der LVK-Messung in der Mitte des jeweiligen Abschnitts befindet (Abb. 58).

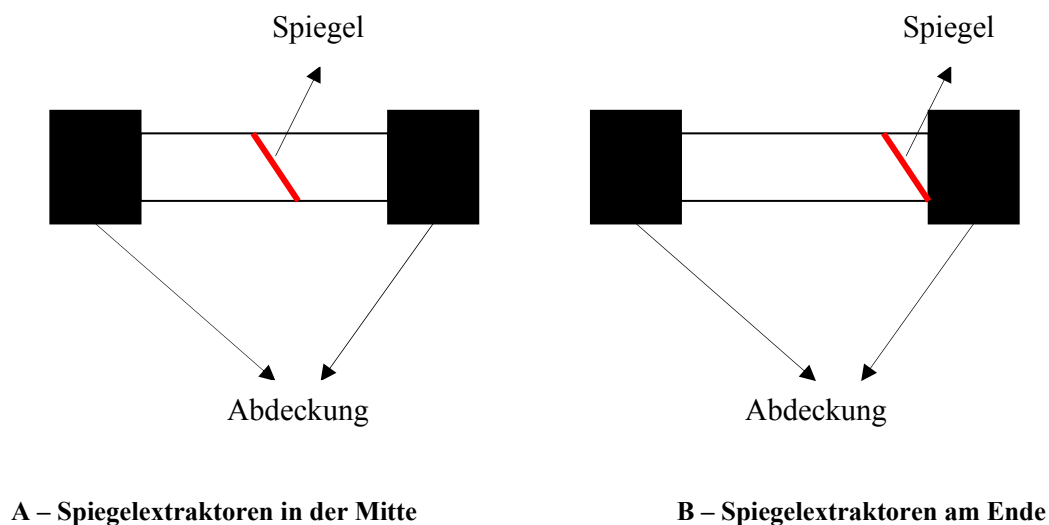


Abb. 58 Verschiedene Position des Spiegels in einem Abschnitt des HLG

Die Tabelle 28 zeigt die relative Abweichung der berechneten von der gemessenen Beleuchtungsstärkeverteilung im Versuchsraum durch die Verwendung der zwei gemessenen LVK des HLG.

Tabelle 28 Vergleich der relativen maximalen und der mittleren Abweichung der Beleuchtungsstärke

	Aufhängenhöhe des HLG in m	Maximale relative Abweichung in %	Mittlere relative Abweichung in %
Spiegel in der Mitte (Abb. 58 - A)	3,35	24	7,1
	4,35	17	6,2
Spiegel am Ende (Abb. 58 - B)	3,35	33	8,7
	4,35	22	7,4

Im Fall A ergeben sich geringe maximale und mittlere relative Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Beleuchtungsstärkeverteilungen. Jedoch ist Verbesserung der Genauigkeit für die kleine Aufhängenhöhe noch nicht ausreichend.

4.10.2 Messung der LVK eines Segmentes mit Spiegelextraktor (Fall 2)

Da ca. 75 % des gesamten Auskopplungslichtstroms eines Abschnitts mit Spiegelextraktor auf den Bereich von ca. 0,25 m vor dem Spiegel entfallen, soll die Messung der LVK des jeweiligen Abschnitts mit Spiegelextraktor in den 2 folgenden Teilen durchgeführt werden (Abb. 59).

Teil 1: Teilsegment mit der Länge von 0,25 m, mit dem Spiegelextraktor

Teil 2: Teilsegment mit der Länge von 0,75 m

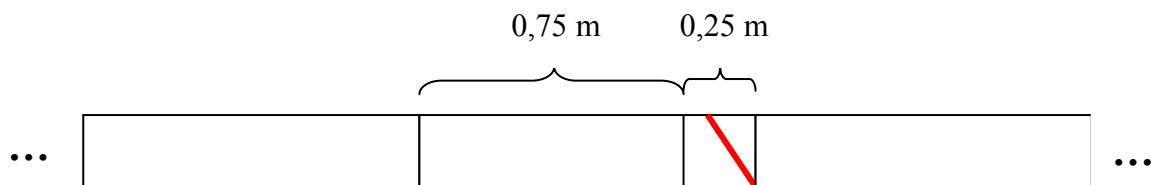


Abb. 59 Unterteilter Abschnitt des HLG

Wie die Tabelle 29 zeigt, nimmt die maximale relative Abweichung der Beleuchtungsstärke dann für die Aufhängenhöhe von 3,35 m von 33 % auf 20 % und für die Aufhängenhöhe von 4,35 m von 22 % auf 13 % und die mittlere relative Abweichung der Beleuchtungsstärke für die Aufhängenhöhe von 3,35 m von 8,7 % auf 6,8 % und für die Aufhängenhöhe von 4,35 m von 7,4 % auf 5,4 % ab.

Tabelle 29 Vergleich der maximalen und mittleren relativen Abweichung der Beleuchtungsstärke

	Aufhängenhöhe des HLG in m	Maximale relative Abweichung in %	Mittlere relative Abweichung in %
Normal	3,35	33	8,7
	4,35	22	7,4
Teilsegmente 0,25 m und 0,75 m	3,35	20	6,8
	4,35	13	5,4

4.11 Abschätzung der Messungenauigkeiten

Die Unterschiede sind durch folgende Faktoren zu erklären:

1- Genauigkeit der Lichtstärkemessung des Goniophotometers

Das Goniophotometer ermittelt die Lichtstärkeverteilung mit einer CCD Kamera nach dem Prinzip des Nahfeldphotometers. Da die CCD Kamera keinen eigenen $V(\lambda)$ angepassten Filter hat und nur Relativwerte der Leuchtdichte aufgenommen werden, besitzt das Gerät einen Photometerkopf, der nach DIN 5032 /33/ den Anforderungen der höchsten Klasse entspricht (mit einem f1-Kennenwert ($V(\lambda)$ -Anpassung des relativen spektralen Empfindlichkeit) von 1,41 % und einem f2-Kennenwert (Richtungsabhängigkeit) von 0,42 %) /73/.

Die Abweichung der Lichtstärkemesswerte betrug 1,9 cd/klm. Betrachtet man nur den unteren Halbraum, in den über 90 % des Lichtes ausgestrahlt werden, beträgt die durchschnittliche Abweichung 2,1 cd/klm, was einer durchschnittlichen relativen Abweichung von 3,6 % entspricht /73/.

2- Montage des HLG im Goniophotometer und Versuchsraum

Bei der Justage des Scheinwerfers und des HLG durch die Klammern im Goniophotometer und durch die Tragegerüste im Versuchsraum können geometrische Ungenauigkeiten in der Längenneigung ca. $\pm 1^\circ$ gegenüber der Waagerechten und eine Verdrehung des HLG gegenüber der Normalausrichtung von ca. $\pm 3^\circ$ entstehen /73/.

3- Spannungsschwankungen

Vom Hersteller wird ein zulässiger Versorgungsspannungsbereich von $230\text{ V} \pm 10\%$ vorgegeben. Durch eine geräteinterne Leistungsstabilisierung werden die Lichtstromschwankungen auf $\pm 3\%$ reduziert.

4- Beleuchtungsstärkemessgerätes

Für die Beleuchtungsstärkeverteilung wurde ein Messgerät der Genauigkeitsklasse B (DIN 5032, Teil 7 mit einem f1-Kennenwert von 6 % und einem f2-Kennenwert von 3 %) eingesetzt /33, 102/.

5- Genauigkeit des Messrasters

Die Genauigkeit des Messrasters hängt von zwei Faktoren ab. Der erste ist die Markierung des Messortes und der andere ist die Positionierung des Stativfußes. Die maximale Abweichung beträgt $\pm 0.02\text{ m}$.

Da die LVK des HLG im Bereich der Spiegelextraktoren sehr ungleichmäßig ist, können dadurch maximale Abweichungen der Lichtströme an den Messpunkten von bis zu 2 % auftreten.

6- Mittelwert des Lichtreflexionsgrades von Decke, Boden und Wänden

Zur Bestimmung des indirekten Anteiles der Beleuchtungsstärke auf der Nutzebene wurden die Mittelwerte der Lichtreflexionsgrade der Raumbegrenzungsflächen bei diffusem Lichteinfall zugrunde gelegt. Diese Mittelwerte können von den tatsächlichen Werten abweichen, da sich an der Decke einige Baugerüste befinden.

Die Lichtplanungsprogramme gehen von vollkommen diffus reflektierenden Raumbegrenzungsflächen aus. Offensichtlich kann diese Annahme zu Fehlern führen, weil die realen Raumbegrenzungsflächen z.T. gerichtet reflektieren.

7- Abdeckung des HLG während der Messung

Eine weitere Ungenauigkeit ist die Abdeckung des HLG. Da eine absolute präzise Abdeckung des HLG nicht möglich ist, kann z. B. eine Verschiebung von 0.02 m in der Nähe des Spiegelextraktors zu Unterschieden von mehr als 300 lm bezüglich des Auskuppplungslichtstroms führen.

4.12 Leuchtdichte des HLG

Die Leuchtdichte und die mittlere Leuchtdichte auf der Oberfläche des HLG sind sehr wichtig für die Beurteilung der Blendung.

In den Lichtplanungsprogrammen kann eine Leuchte nur mit ebenen Austrittsflächen eingesetzt werden /105/. Da der HLG jedoch zylinderförmig ist, wird eine Abweichung zwischen dem Lichtplanungsprogramm und den realen Verhältnissen auftreten.

Um die berechnete Leuchtdichte zu bewerten, wurde die gemessene mittlere Leuchtdichte mit den berechneten Werten verglichen.

4.12.1 Gemessene Leuchtdichte

Lichtplanungsprogramme benutzen die Gleichung 25, um die mittlere Leuchtdichte ($\bar{L}$) auf der Fläche (A_1) zu berechnen /57/.

$$\bar{L} = \frac{I}{A_1 \cdot \cos \varepsilon_1} \quad (25)$$

I: Lichtstärke in cd

ε_1 : Winkel zwischen Ausstrahlungsrichtung und Normal auf A_1 in Grad

Der untersuchte HLG hat eine Länge von 6m sowie drei Spiegelextraktoren in den Elementen 2, 4 und 6. (Abb. 41)

Alle Messungen wurden mit Hilfe einer CCD Leuchtdichte Kamera (LMK 96) der Firma Technoteam durchgeführt.

Da sich in den Elementen 2, 4 und 6 Spiegelextraktoren befinden, kommt es zu einem großen Unterschied zwischen der maximalen und minimalen Leuchtdichte. Das andere Problem dieser Elemente ist eine große Schwankung der maximalen Leuchtdichte. Diese Schwankungen werden durch das Flackern der Lichtquelle verursacht und auf Grund der niedrigen Integrationszeit des Messgerätes erfasst /120/.

Die Abbildungen 60 und 61 zeigen ein Leuchtdichtebild des zweiten Teils des HLG (mit einer Länge von 3 m). Auf der Abbildung 60 beträgt die maximale Leuchtdichte 566.000 cd / m², bei Abbildung 61 hingegen 275.000 cd / m².

Das einkanale Präzisionsleuchtdichtemessgerät der Firma LMT bestätigt eine maximale Leuchtdichte von fast 550.000 cd / m².

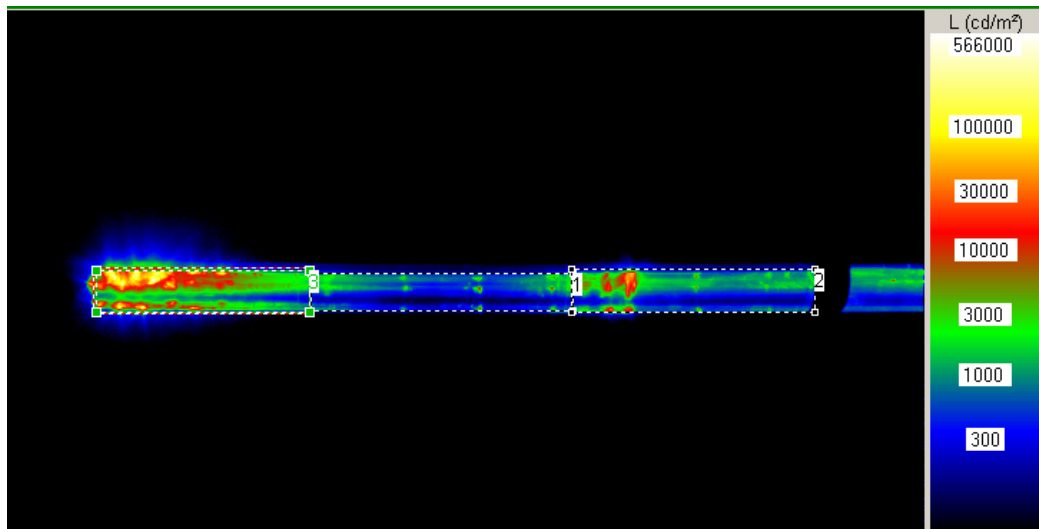


Abb. 60 Leuchtdichtefoto des 3m HLG

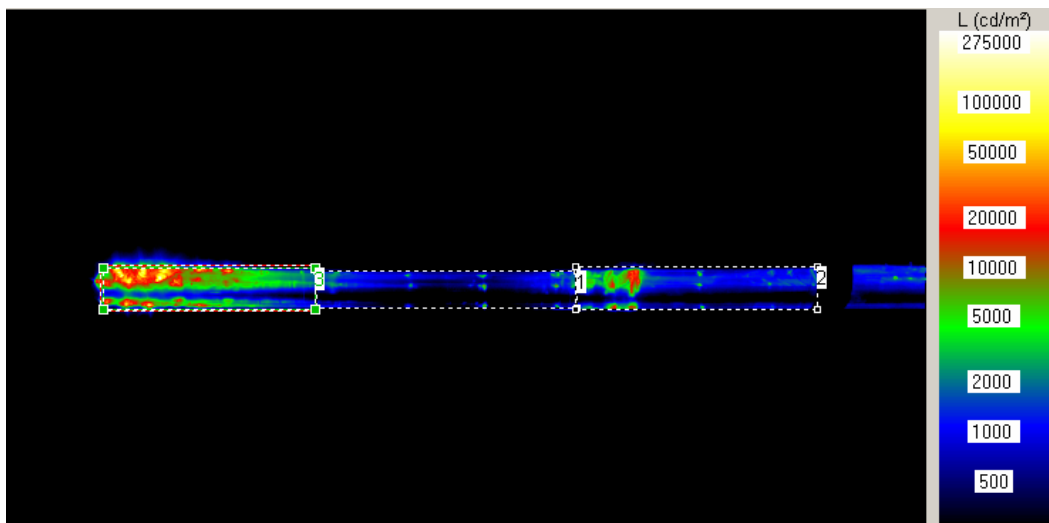


Abb. 61 Leuchtdichtefoto des 3m HLG

Um diese großen Schwankungen der maximalen Leuchtdichte zu beheben, muss ein Graufilter bei den Messungen mit der Leuchtdichte CCD Kamera für ein Segment mit Spiegelextraktor verwendet werden. Dadurch wird die Integrationszeit der CCD Kamera erhöht und das Flackern der Lichtquelle wird nicht mehr erfasst. Der ideale Transmissionsgrad der Filtervorrichtung muss dabei durch eine Variation verschiedener Graufilter ermittelt werden /120/.

Für die Bestimmung der Fläche A_1 in der Gleichung 25 braucht die Software die Länge und die Breite des jeweiligen Elements. Die Länge ist 1m, und als Breite kann der Durchmesser des HLG von 0,3 m (AB in Abb. 62) oder 0,21 m (CD in Abb. 62) entsprechend des Auskoppelungsfensters von 90° ausgewählt werden.

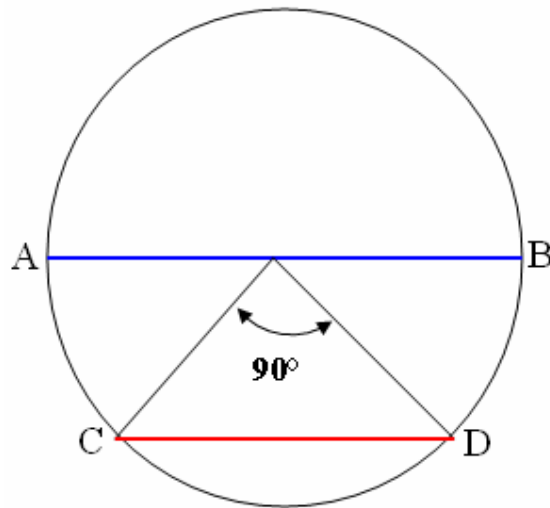


Abb. 62 Breite der Auskopplungsfläche des HLG

4.12.2 Vergleich der gemessenen und berechneten Leuchtdichte

In Tabelle 30 und 31 sind die gemessenen und berechneten mittleren Leuchtdichten des Elements 5 (ohne Spiegelextraktoren) für zwei Ausstrahlwinkel 65° , 85° dargestellt.

Die berechneten Werte wurden für zwei Situationen durchgeführt:

- Situation 1: Länge: 1 m , Breite 0,3 m (entsprechend des Durchmessers)
- Situation 2: Länge: 1 m , Breite 0,21 m (entsprechend des Auskopplungsfensters)

Tab. 30 Gemessene und berechnete mittlere Leuchtdichten in den verschiedenen C-Ebene mit dem Ausstrahlwinkel von 65° für das Element 5

	C0	C45	C90	C135	C180	C225	C270	C315
$\bar{L}_{mess}$	260	1600	540	1600	360	800	1900	730
$\bar{L}_{berech}$ (Situation 1)	199	1205	404	1215	274	592	1415	552
$\bar{L}_{berech}$ (Situation 2)	281	1704	571	1718	387	837	2002	781

Tab. 31 Gemessene und berechnete mittlere Leuchtdichten in den verschiedenen C-Ebene mit dem Ausstrahlwinkel von 85° für das Element 5

	C0	C45	C90	C135	C180	C225	C270	C315
$\bar{L}_{mess}$	650	1300	27	1400	760	620	150	570
$\bar{L}_{berech}$ (Situation 1)	497	974	20,5	1044	578	467	112	436
$\bar{L}_{berech}$ (Situation 2)	703	1377	29	1477	818	660	158	617

$\bar{L}_{mess}$: Gemessene mittlere Leuchtdichte cd/m^2

$\bar{L}_{berech}$: Berechnete mittlere Leuchtdichte cd/m^2

Die relative Abweichung (f_l) der berechneten von der gemessenen mittleren Leuchtdichte wurde durch die Gleichung 26 ermittelt.

$$f_l = \frac{\bar{L}_{berech} - \bar{L}_{mess}}{\bar{L}_{mess}} \quad (26)$$

Wie die Tabelle 30 und 31 zeigen, ergeben sich maximale relative Abweichungen bis zu 8 % für Situation 2 und -27 % für die Situation 1.

In Tabelle 32 und 33 sind gemessene und berechnete Leuchtdichte des Elements 6 (mit Spiegelextraktoren) für zwei Ausstrahlwinkeln 65° , 85° dargestellt.

Tab. 32 Gemessene und berechnete mittlere Leuchtdichten in den verschiedenen C-Ebene mit dem Ausstrahlwinkel von 65° für das Element 6

	C0	C45	C90	C135	C180	C225	C270	C315
$\bar{L}_{mess}$	2450	3700	720	4500	3700	600	1150	570
$\bar{L}_{berech}$ (Situation 1)	1859	2808	559	3419	2825	433	895	424
$\bar{L}_{berech}$ (Situation 2)	2629	3972	790	4836	3996	612	1266	600

Tab. 33 Gemessene und berechnete mittlere Leuchtdichten in den verschiedenen C-Ebene mit dem Ausstrahlwinkel von 85° für das Element 6

	C0	C45	C90	C135	C180	C225	C270	C315
$\bar{L}_{mess}$	6200	2600	68	2500	7600	650	112	650
$\bar{L}_{berech}$ (Situation 1)	4603	1987	51	1876	5770	507	81	497
$\bar{L}_{berech}$ (Situation 2)	6511	2811	72	2653	8161	717	115	703

Wie die Tabelle 32 und 33 zeigen, ergeben sich maximale relative Abweichungen bis zu 10 % für Situation 2 und -28 % für die Situation 1. Wegen der Anwendung des Graufilters ist die maximale relative Abweichung des Elementes 6 größer als das Element 5.

Wenn die Breite der Fläche in den Eulumdat-Daten als der Durchmesser bzw. entsprechend des Auskopplungsfensters des HLG in den Lichtplanungsprogramme eingegeben wird, befindet sich ein großer Fehler von bis zu -28 % bzw. 10 %.

So ist die gemessene mittlere Leuchtdichte kleiner oder größer als die berechneten Werte, weil die Oberfläche des HLG rundlich ist. In Abbildung 63 wird dieser Sachverhalt dargestellt. Z.B.: die gesehene Fläche A_2 , welche auch durch das Messgerät erfasst wird, ist größer als die Fläche A_3 , die mit der Breite entsprechend des Auskopplungsfensters in den Lichtplanungsprogrammen herangezogen wird. Die gesehene Fläche A_1 entspricht dem Durchmesser des HLG.

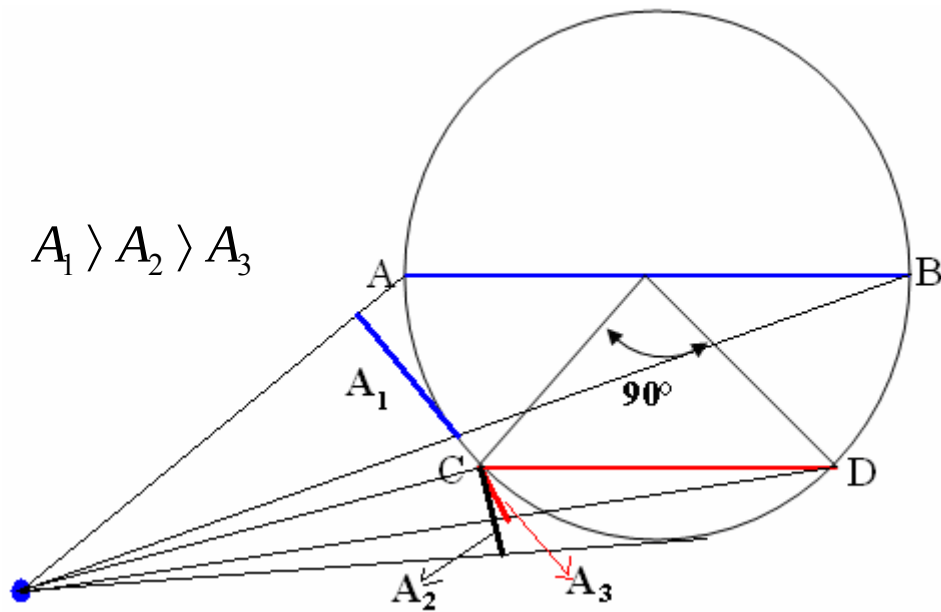


Abb. 63 Gesehene Fläche für die ebene Austrittsfläche (A_1 , A_3) und zylindrische Austrittsfläche (A_2)

4.13 Blendung

Da der HLG mit Spiegelextraktoren eine ungleichmäßige LVK hat, soll die psychologische Blendung zur Innenraumbeleuchtung berücksichtigt werden. Verschiedene Verfahren z.B. IES Glare Index-System /63/, VCP(Visual Comfort Probability)-Verfahren /27, 55, 56/, Leuchtdichtegrenzkurvenverfahren /104/ und UGR-Verfahren /21, 84/ zur Bewertung der psychologischen Blendung wurden gefunden.

Die Lichtplanungsprogramme können das UGR als ein Kriterium der psychologischen Direktblendung berechnen, da in Europa nur dieses Verfahren gültig ist /81/. Das UGR Verfahren basiert auf der Gleichung 27, die UGR-Formel genannt wird.

$$UGR = 8 \cdot \log \left[\frac{0,25}{L_b} \cdot \sum \frac{L_s^2 \cdot \Omega}{P^2} \right] \quad (27)$$

UGR : Blendungswert der Blendquelle (Unified Glare Rating)

L_s : Leuchtdichte der Blendquelle in cd/m^2

Ω : Raumwinkel, unter dem die Lichtquelle gesehen wird in sr

P : Positionsindex (Lage der Blendquelle im Gesichtsfeld)

L_b : Hintergrundleuchtdichte in cd/m^2

Die UGR-Formel beruht auf empirische Untersuchungen, welche durch ein Blendurteil des Beobachters ermittelt wurde.

Der Zahlenwert UGR liegt zwischen 10 und 30, wobei die Blendungsempfindung linear mit dem UGR Wert ansteigt /81/.

Mit Hilfe der Lichtplanungsprogramme kann das UGR für die verschiedenen Richtungen und Plätze sowie Bildwinkel als eine Kurve wie die Abb. 64 (Bildwinkel: 60°) und Abb. 65 (Bildwinkel: 30°) zeigen, dargestellt werden. Die Blickrichtung entspricht dem Blickwinkel 0°, somit kann ein Bereich von der Hauptrichtung (Blickwinkel > 0) zur Bewertung definiert werden.

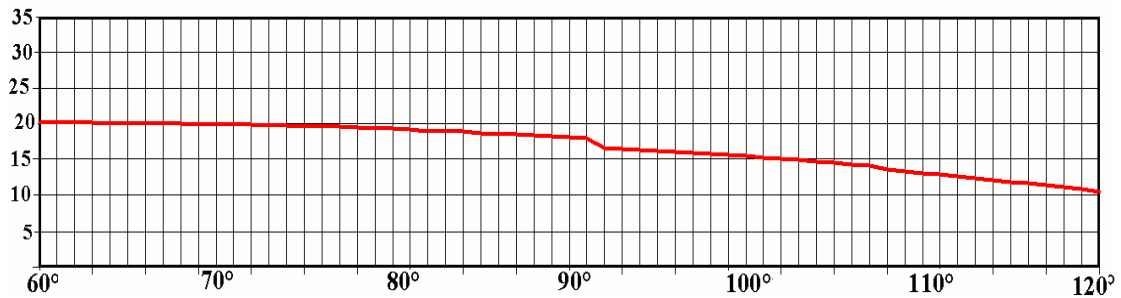


Abb. 64 Anzahlenwert des berechneten UGR für den Bildwinkel 60°

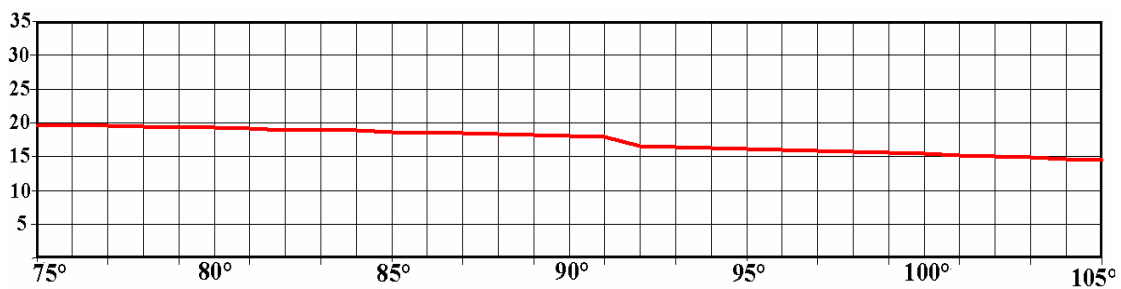


Abb. 65 Anzahlenwert des berechneten UGR für den Bildwinkel 30°

Die Abb. 66 zeigt den Grundriss des Spezialversuchsraums mit der Beleuchtungsanlage (Hohllichtleiter und Scheinwerfer).

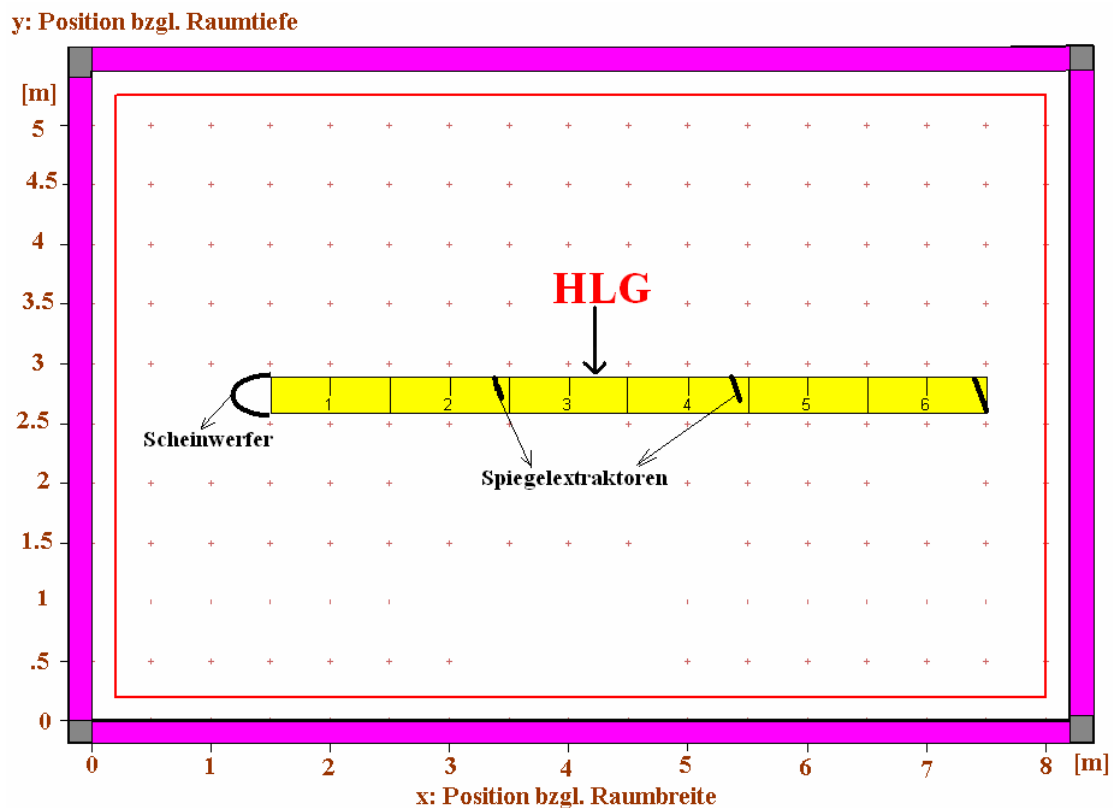


Abb. 66 Grundriss des Spezialversuchsraums mit der Beleuchtungsanlage

Der HLG hat die Länge von 6 m, den Durchmesser von 0,3 m, zwei Spiegelextraktoren und einen zusätzlichen Endspiegel.

In den Tabellen 34 und 35 sind die berechneten UGR für zwei Positionen $y = 2,7 \text{ m}$, $z = 1,2 \text{ m}$ (genau unter dem HLG) bzw. $y = 1 \text{ m}$ gegen verschiedene x-Positionen aufgeführt.

Tabelle 34 Berechnete UGR des HLG für $y = 2,7 \text{ m}$, $z = 1,2 \text{ m}$

Höhe des HLG in m	Extraktortyp	X: Position bzgl. Raumbreite des Beobachterauges in m														
		1	1,3	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8	3,1	3,4	3,7	4	4,3	4,6	4,9	5,2
3,35	Extraktorfilm	12	14	14	13	13	14	13	13	14	14	14	17	17	15	14
4,35	Extraktorfilm	12	13	13	13	13	13	13	14	14	14	13	12	11	10	
5,35	Extraktorfilm	12	13	13	13	14	13	13	12	12	10	10	10			
3,35	Spiegelextraktor	24	24	23	16	17	20	20	20	20	20	17	17	19	18	18
4,35	Spiegelextraktor	22	18	18	18	18	18	19	18	17	17	17	16	17	17	
5,35	Spiegelextraktor	17	16	17	17	17	17	15	15	15	15	15	15			

Tabelle 35 Berechnete UGR des HLG für $y = 1 \text{ m}$, $z = 1,2 \text{ m}$

Höhe des HLG in m	Extraktortyp	X: Position bzgl. Raumbreite des Beobachteraues in m														
		1	1,3	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8	3,1	3,4	3,7	4	4,3	4,6	4,9	5,2
3,35	Extraktorfilm	16	16	15	15	15	15	15	15	15	16	16	16	16	16	15
4,35	Extraktorfilm	15	15	15	14	14	14	14	14	15	14	14	14	14	13	12
5,35	Extraktorfilm	13	13	13	13	13	13	13	12	12	12	11	10	10	10	
3,35	Spiegelextraktor	25	25	24	23	23	21	22	22	22	22	22	20	21	22	23
4,35	Spiegelextraktor	23	23	22	19	19	20	20	20	19	18	19	19	19	19	18
5,35	Spiegelextraktor	21	18	18	18	18	18	18	17	17	17	17	17	17	16	

Wie im Abschnitt 4.8 beschrieben wurde, sollen die Elemente mit Spiegelextraktoren als der kleine Abschnitt statt 1 m Länge verwendet werden.

Die Tabellen 36 und 37 zeigen die berechneten UGR für die zwei Zustände $y = 2,7 \text{ m}$, $z = 1,2 \text{ m}$ (genau unter dem HLG) bzw. $y = 1 \text{ m}$, $z = 1,2 \text{ m}$ gegen verschiedenen x -Positionen, wenn der jeweiligen Abschnitt mit Spiegelextraktoren als die kleinen Abschnitten von 0,2 m eingesetzt wurden.

Tabelle 36 Berechnete UGR des unterteilten HLG für $y = 2,7 \text{ m}$, $z = 1,2 \text{ m}$

Höhe des HLG in m	Extraktortyp	X: Position bzgl. Raumbreite des Beobachteraues in m														
		1	1,3	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8	3,1	3,4	3,7	4	4,3	4,6	4,9	5,2
3,35	Spiegelextraktor	26	27	26	25	13	15	17	18	18	18	18	17	17	18	19
4,35	Spiegelextraktor	23	23	15	16	16	16	17	17	18	17	17	17	17	17	16

Tabelle 37 Berechnete UGR des unterteilten HLG für $y = 1 \text{ m}$, $z = 1,2 \text{ m}$

Höhe des HLG in m	Extraktortyp	X: Position bzgl. Raumbreite des Beobachteraues in m														
		1	1,3	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8	3,1	3,4	3,7	4	4,3	4,6	4,9	5,2
3,35	Spiegelextraktor	26	26	26	25	24	23	20	21	22	23	22	22	22	22	23
4,35	Spiegelextraktor	24	23	23	23	19	20	20	20	19	19	19	19	19	18	17

Ein Vergleich der Tabellen 34 und 36 sowie Tabellen 35 und 37 zeigt in einigen Punkten wesentliche Unterschiede. Z. B. sind die UGR in der Höhe 1,2 m, $x = 1,3 \text{ m}$ und $y = 2,7 \text{ m}$, (Höhe des HLG von 4,35 m) mit unterteilten Element 23 bzw. nicht unterteilten Element 18. Um die Genauigkeit des berechneten UGR aus den zwei verschiedenen Methoden zu bewerten, wurden Versuchspersonen befragt (Anhang-Fragebogen zur Blendungsuntersuchung). Um von Beobachtern die Blendung bzw. UGR zu beurteilen, wurde eine ähnliche 7-stufige Rating-Skala als Blendungsgrad (Tabelle 38) von Söllner definiert /20, 84, 103, 104/.

Tabelle 38 7-stufige Rating-Skala von Söllner

Stufe	Urteil des Beobachters	Zahlenwert des UGR
0	nicht vorhanden	$UGR < 13$
1	zwischen nicht vorhanden und merkbar	$13 \leq UGR < 16$
2	merkbar	$16 \leq UGR < 19$
3	zwischen merkbar und störend	$19 \leq UGR < 22$
4	störend	$22 \leq UGR < 25$
5	zwischen störend und unzumutbar	$25 \leq UGR < 28$
6	unzumutbar	$UGR \geq 28$

Wie die Abbildung 67 zeigt, wurden im Spezialversuchsraum zwei verschiedene Plätze mit unterschiedlichem UGR-Wert ausgewählt.

Testpunkt 1: $x = 3,7 \text{ m}$; $y = 2,7 \text{ m}$, $z = 1,2 \text{ m}$ (Kleines UGR)

Testpunkt 2: $x = 1,3 \text{ m}$; $y = 2,7 \text{ m}$, $z = 1,2 \text{ m}$ (Großes UGR)

y: Position bzgl. Raumtiefe

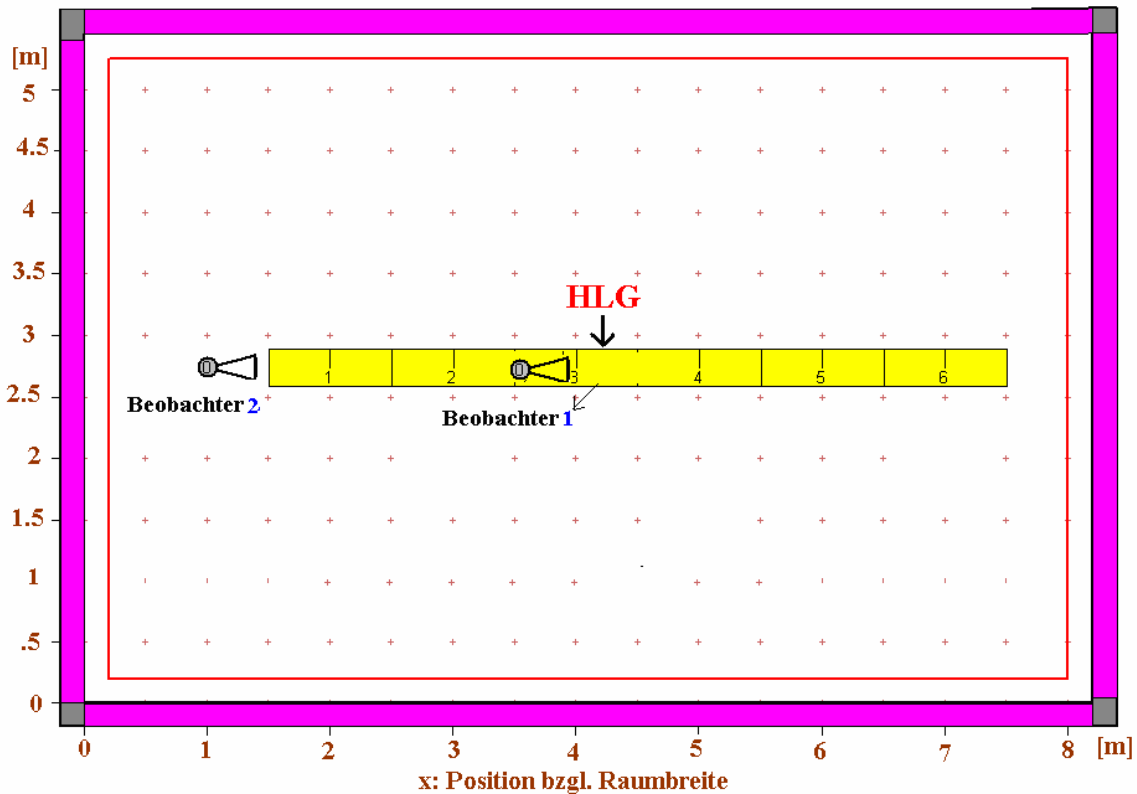


Abb. 67 Grundriss des Spezialversuchsraums mit den Beobachterplätze

Danach wurden 21 Versuchspersonen unterschiedlichen Alters aus dem FG Lichttechnik der Technischen Universität Berlin ausgewählt und im Spezialversuchsraum auf den verschiedenen Plätzen befragt.

In Tabelle 39 sind die Ergebnisse der Befragung aufgeführt.

Tabelle 39 Vergleich der beurteilten mit den berechneten UGR

Platz Nr.	Anzahl der gewählten Stufe						Stufe des beurteilten UGR	Stufe des berechneten UGR	
	0	1	2	3	4	5	Häufigste gewählte Stufe	Element- länge 1 m	Element- länge 0,2m
1	1	10	5	4	1		1	2	2
2		1	7	12	1		3	2	4

Die Berechnungen des UGR wurden mit den zwei folgenden eingegebenen Daten durchgeführt:

1. Gemessene LVK des nicht unterteilten Elements mit Spiegelextraktoren (Elementlänge von 1 m)
2. Gemessene LVK des unterteilten Elements mit Spiegelextraktoren (Elementlänge von 0,2 m)

Die Tabelle 39 zeigt:

1. Die unterteilten Elemente mit Spiegelextraktoren haben die bessere Genauigkeit
2. Die auf Basis der Beurteilungen ermittelten UGR-Werte sind kleiner als die berechneten UGR-Werte.

Daraus kann den Ergebnissen des Lichtplanungsprogramms für kritische Punkte im Aspekt der Blendung vertraut werden.

4.14 Zusammenfassung

Die Untersuchungen der Beleuchtungsstärkeverteilung ergaben Ergebnisse zu folgenden Punkten:

- 1- Formen der Beleuchtungsstärkeverteilungskurve
- 2- Abweichungen der berechneten von den gemessenen Beleuchtungsstärkeverteilungen

Wenn die LVK der einzelnen Abschnitte des HLG gleichmäßig und ähnlich groß sind, sehen die berechneten und gemessenen Formen der Beleuchtungsstärkeverteilungskurven ziemlich ähnlich aus. In diesem Fall ergeben sich maximale relative Abweichungen der Beleuchtungsstärke für die Aufhängenhöhe 3,35 m von 15 % bzw. für die Aufhängenhöhe 4,35 m von 11 %.

Wenn die LVK der einzelnen Abschnitte (mit 1 m Länge) des HLG ungleichmäßig und unterschiedlich groß sind, sehen die berechneten und gemessenen Formen der Beleuchtungsstärkeverteilungskurven unterschiedlich aus. Die Beleuchtungsstärkeverteilungen haben eine maximale relative Abweichung für die Aufhängenhöhe 3,35 m von 33 % bzw. für die Aufhängenhöhe 4,35 m von 22 % im Vergleich zu den berechneten Werten.

Wenn bei der Berechnung der Beleuchtungsstärke die gemessenen LVK in den Bereichen der Spiegelextraktoren Segmentraster von 0,2 m anstatt 1m verwendet werden, sehen die berechneten und gemessenen Formen der Beleuchtungsstärkeverteilungskurven ähnlicher aus. Gemessene Beleuchtungsstärkeverteilungen haben in diesem Fall eine maximale relative Abweichung von 16 % statt 33 % bzw. 9 % statt 22 % im Vergleich mit den berechneten Werten.

Die Aufhängenhöhe des HLG spielt ebenfalls eine große Rolle. Die Abweichungen der berechneten von den gemessenen Beleuchtungsstärkeverteilungen fallen für die große Höhe deutlich geringer aus, obwohl die LVK der einzelnen Abschnitte des HLG ungleichmäßig sind.

Da in den Lichtplanungsprogrammen die Leuchten für die Berechnung der Beleuchtungsstärke nicht unterteilt werden, sind berechnete Werte ca. 2 % größer als die Werte unter Berücksichtigung der unterteilten Leuchte.

Da die absoluten Werte der Beleuchtungsstärke in der Nähe der Wände im Vergleich zu den Werten in der Mitte des Raums relativ gering sind, sind die relativen Abweichungen in diesen Bereichen besonders hoch. Außerdem ist der Anteil der indirekten Beleuchtungsstärke in diesen Bereichen relativ hoch, die im Rechnerprogramm vermutlich aufgrund der Reflexionseigenschaften der Wände nicht genau berücksichtigt werden. Also können die hohen relativen Abweichungen in der Nähe der Wände auftreten, weil die Software von einer vollkommen diffusen Reflexion ausgeht.

Die Lichtstärkeverteilung liegt in diskreten Winkelschritten von 5° (oder $2,5^\circ$) vor, deswegen muss zur Berechnung zusätzlich eine Interpolation der Lichtstärkeverteilung erfolgen. Das bedeutet, dass ein großer Teil der LVK aus der Interpolation berechnet wird. Hierdurch kann auch eine Abweichung auftreten.

Hohllichtleitersysteme mit symmetrischen LVK können mit Lichtplanungsprogrammen ausreichend präzise auch für niedrige Höhe berechnet werden. Bei unsymmetrischen LVK sollte in den Bereichen der Spiegelextraktoren die LVK in Segmenten mit der Länge von 0,2 m gemessen werden, um eine ausreichende Genauigkeit zu erreichen.

Da die Messung der LVK für die einzelnen Teile des HLG zeitaufwendig ist, kann man den jeweiligen Abschnitt mit Spiegelextraktoren nur in zwei Teilsegmente 0,25 m bzw. 0,75 m ermitteln. Diese Methode kann eine ausreichende Genauigkeit erreichen.

Die Ergebnisse zeigen, dass man mit diesen Kenntnissen alle wichtigen lichttechnischen Merkmale für eine gute Beleuchtung mit HLG z.B. Gleichmäßigkeit und Blendung berücksichtigen kann.

Zusammenfassend ist über die Leuchtdichte zu sagen, dass für die Breite in den Eulumat-Daten nicht der Durchmesser des HLG eingegeben werden muss, sondern die Breite des Auskopplungsfensters mit einem Korrekturfaktor von 1,05. Damit kann die optimale Genauigkeit der berechneten Leuchtdichte mit einer maximalen Abweichung von bis zu 5 % garantiert werden.

Der berechneten Blendung durch die Lichtplanungsprogramme kann vertraut werden, wenn die gemessene LVK und die Abmessung des HLG im Eulumat-Format wie zuvor beschrieben Korrekt eingeegeben wurden.

5 Tageslichtleitsysteme mit Heliostaten

Die Tageslichtnutzung zu Beleuchtungszwecken gewinnt aufgrund der Energieeinsparung in Gebäuden immer mehr an Bedeutung. Außerdem hat das Tageslicht wegen seines kontinuierlichen Spektrums sehr gute Farb- und Farbwiedergabeeigenschaften, positive Effekte auf Aufenthaltsqualität und Wohlbefinden sowie auf die Steigerung der Arbeitseffektivität /18, 28, 35/.

Durch Tageslichtnutzung in Gebäuden kann der elektrische Energiebedarf für künstliche Beleuchtung erheblich reduziert werden.

Um fensterlose Gebäudeteile bzw. große Gebäudetiefen mit Tageslicht zu versorgen, werden Tageslichtleitsysteme mit Heliostaten verwendet. Solche Tageslichtbeleuchtungssysteme, die das Sonnenlicht bündeln und in einen Hohllichtleiter einkoppeln, in größere Gebäudetiefe weiterleiten und dort wieder auskoppeln, bestehen aus:

- einer Einheit zur Bündelung des direkten Sonnenlichtes (Heliostat)
- einer Einkopplung des gebündelten Sonnenlichtes
- einem Lichtleitsystem

Die Einheit zur Bündelung des direkten Sonnenlichtes wird „Heliostat“ genannt. Der Heliostat bündelt das auf seine Oberfläche einfallende quasiparallele Sonnenlicht über ein optisches System in die Einkopplung. Heliostat setzt sich aus den griechischen Worten helios - „die Sonne“ und histanani - „zum Stehen bringen“ zusammen /93/.

Man unterscheidet starre und bewegliche Heliostaten, wobei die unbeweglichen Systeme einen kleineren Wirkungsgrad aufweisen. Bei beweglichen Heliostaten ergeben sich einachsige und zweiachsige Sonnennachführungen. Die zweiachsigen Heliostaten haben dagegen aufgrund der genauen Sonnennachführung bessere Wirkungsgrade.

Die Einkopplung, die als Bindeglied zwischen dem Heliostat und dem starren Lichtleitsystem dient, soll unabhängig von den Sonnenpositionen verlustarm sein.

Die Einkopplung kann unbeweglich oder beweglich sein. Eine unbewegliche Einkopplung besteht aus einem konkaven Spiegel, der mit Hilfe der Reflexion das gebündelte Sonnenlicht in das Lichtleitsystem einkoppelt. Ein bewegliches Einkopplungssystem besteht aus Lichtleitern, wie z.B. Lichtwellenleiter, die das gebündelte Sonnenlicht in das starre Leitsystem einkoppeln.

In den letzten Jahren sind mehrere Tageslichtleitsysteme mit Heliostat aufgebaut worden /41, 42, 45, 62, 66, 67, 69, 77, 85, 86, 93, 94, 95, 96/. Hier sind zwei Anlagen zu erwähnen, die im Rahmen von Forschungsprojekten an der TU Berlin entwickelt wurden.

5.1 Tageslichtleitsystem am FG Lichttechnik der TU Berlin

Abbildung 68 zeigt die alte Heliostatenanlage mit ebenen Spiegeln am FG Lichttechnik der Technischen Universität Berlin, die im Jahr 1998 aufgebaut wurde. Dabei wird ein ebener Spiegel (Primärspiegel) auf einem Solar-Tracker installiert, der das Sonnenlicht durch zweiachsige Bewegung auf eine gegenüber stehende starre Umlenkspiegelebene reflektiert. Um den Gesamtwirkungsgrad des Heliostatensystems zu verbessern, wurde die Umlenkspiegelebene im Jahr 1999 weiter entwickelt /93/. Diese besteht aus 100 einzelnen gewölbt ausgerichteten Planspiegeln mit den Maßen $0,2 \times 0,2 \text{ m}^2$ und hat die Aufgabe wie ein konkaver Spiegel das Sonnenlicht in den HLG gebündelt einzukoppeln (Abb. 69).



Abb. 68 Die Heliostatenanlage des FG Lichttechnik der TU Berlin /93/



Abb. 69 Verbesserte Umlenkspiegelebene /93/

Der Wirkungsgrad des Heliostatensystems η_{Helio} wurde definiert als:

$$\eta_{\text{Helio}} = \Phi_{\text{aus}} / \Phi_{\text{ein}} \quad (28)$$

Φ_{ein} : Auf den ebenen Heliostatenspiegel einfallender Lichtstrom durch direktes Sonnenlicht

Φ_{aus} : In den HLG vom Heliostat eingekoppelter Lichtstrom

Die Abbildung 70 stellt das Funktionsprinzip dieses Heliostatensystems dar.

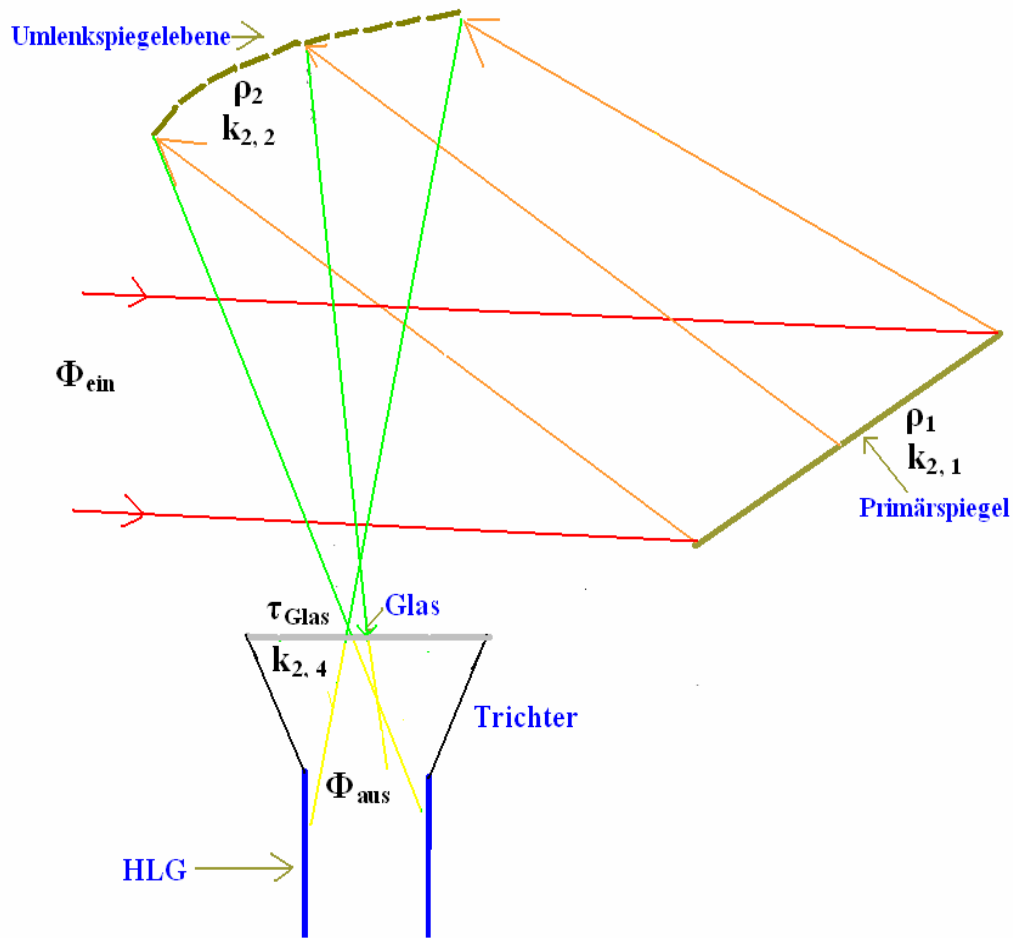


Abb. 70 Das Funktionsprinzip des Heliostatsystems an TU Berlin

Der Wirkungsgrad des Heliostatsystems ergibt sich zu:

$$\eta_{\text{Helio}} = \rho_1 \times \rho_2 \times \tau_{\text{Glas}} \times k_{2,1} \times k_{2,2} \times k_{2,3} = 48 \% \quad (29)$$

Tabelle 40 Größen zur Berechnung des Wirkungsgrades

Größe		Angesetzter Wert
ρ_1	Lichtreflexionsgrad des ersten Spiegels	0,85
ρ_2	Lichtreflexionsgrad des zweiten Spiegels	0,85
τ_{Glas}	Lichttransmissionsgrad des Glases	0,92
$k_{2,1}$	Verschmutzungsfaktor, erster Spiegel	0,90
$k_{2,2}$	Verschmutzungsfaktor, zweiter Spiegel	0,90
$k_{2,3}$	Verschmutzungsfaktor, Glas	0,90

Es ist aber anzumerken, dass diese Betrachtung einige Details nicht berücksichtigt. Für die Berechnung des Wirkungsgrads sollen zunächst zwei Vorgänge (Verluste aufgrund der projizierten Fläche des Primärspiegels und Verluste aufgrund der Konstruktion der zweiten Umlenkspiegelebene) verdeutlicht werden:

Die Mittelpunkte des Primärspiegels und der Umlenkspiegelebene sowie des HLGs befinden sich in gleicher Höhe. Der Winkel zwischen der Umlenkspiegelebene und der HLG auf der horizontalen Ebene beträgt konstant $15,0^\circ$. Der Winkel zwischen dem Primärspiegel und der Umlenkspiegelebene ändert sich in Abhängigkeit von der Sonnenposition (Abb. 71)

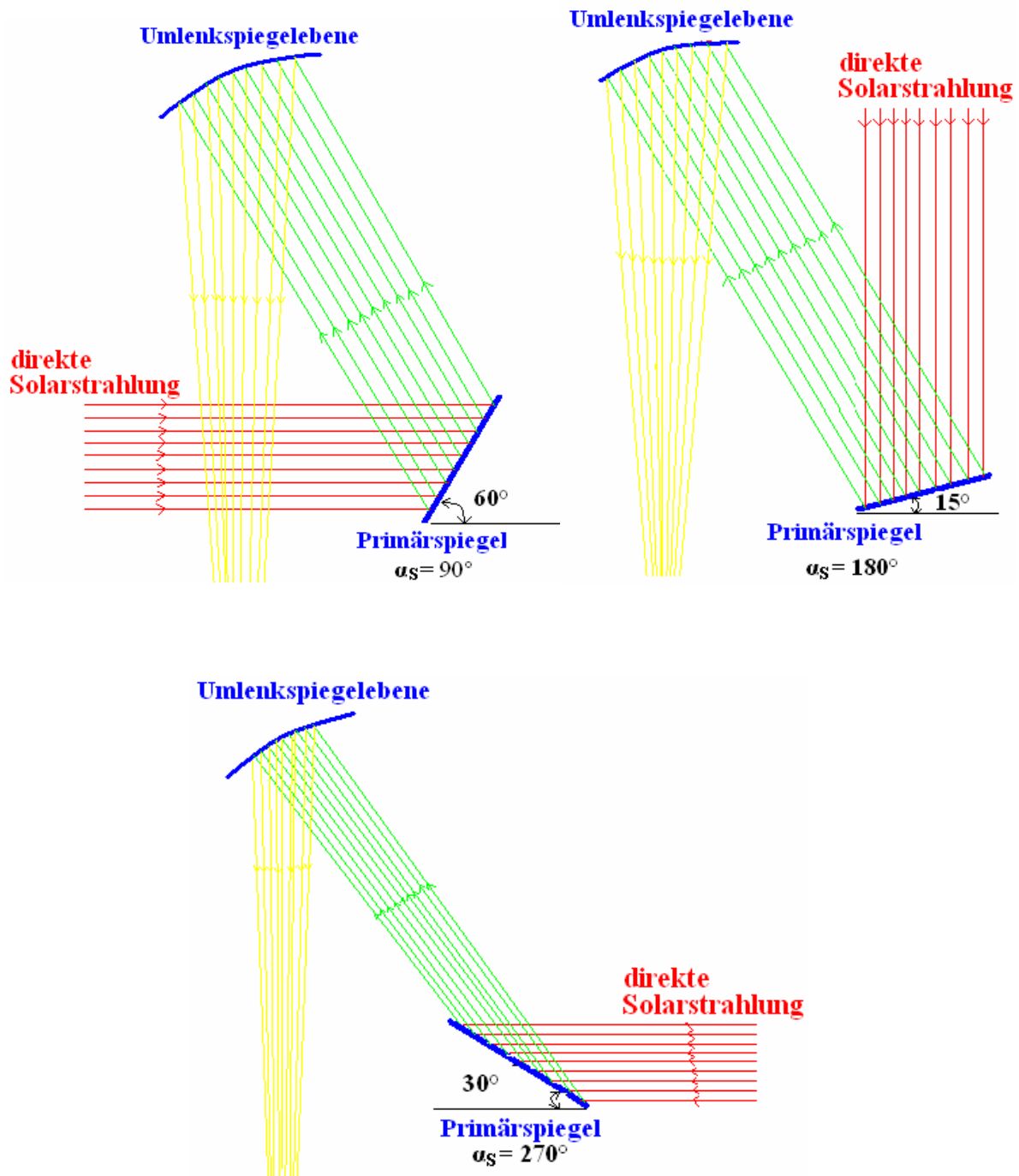


Abb. 71 Drehung des Primärspiegels in Abhängigkeit von der Sonnenposition

Nach DIN 5034 beträgt der Sonnenazimutwinkel (α_s , gemessen vom Norden 0° , über Osten 90° , Süden 180° und Westen 270°) bzw. der Sonnenhöhenwinkel (γ_s) in Berlin zwischen 6:00 bis 18:00 Uhr von 90° bis 270° bzw. von 0 bis 63° .

Da die einfallende Strahlung auf den Primärspiegel mit dem gleichen Winkel wie der Einfallswinkel reflektiert wird, soll der Neigungswinkel des Primärspiegels bezüglich der Sonnenhöhe $\gamma_s/2$ betragen. Azimutwinkel zwischen Sonne und dem Primärspiegel ist wie folgt zu berechnen:

$$\delta\alpha_s = \begin{cases} 45 - \frac{\alpha_s}{6} ; \text{ für } 90^\circ \leq \alpha_s \leq 180^\circ \\ \frac{\alpha_s}{2} - 75 ; \text{ für } 180^\circ \leq \alpha_s \leq 270^\circ \end{cases} \quad (30)$$

Damit ergeben sich folgende Winkeldifferenzen zwischen der Sonne und dem Planspiegel:

- Azimutwinkeldifferenz $\delta\alpha_s$ von 15° bis 60°
- Höhenwinkeldifferenz $\delta\gamma_s$ von 0° bis $31,5^\circ$.

Die projizierte Fläche des Primärspiegels ist also mit folgendem Faktor zu berechnen:

$$\cos(\alpha) = \cos(\delta\alpha_s) \times \cos(\delta\gamma_s) \quad (31)$$

Der Verlust durch die Spalte zwischen den einzelnen Spiegelementen in der Umlenkspiegelebene beträgt 7 %. Deswegen muss einen Verlustfaktor (k_{Ps}) von 0,93 in der Berechnung der Wirkungsgrade berücksichtigt werden.

Unter Berücksichtigung dieser Betrachtung ergibt sich ein Gesamtnutzungsgrad des Sonnenlichtes bezogen auf die Primärspiegelfläche von:

$$\eta_{\text{Gesamt}} = \rho_1 \times \rho_2 \times \tau_{\text{Glas}} \times k_{2,1} \times k_{2,2} \times k_{2,3} \times k_{Ps} \times \cos(\alpha) = 23 - 37 \% \quad (32)$$

5.2 Heliostatensystem “ARTHELIO”

Im Jahre 2000 wurde im Rahmen des Forschungsprojektes ARTHELIO ein Heliostatensystem mit angeschlossener HLG an der Berliner Leuchtenfirma Semperlux AG aufgebaut /69, 87, 88, 89, 93/. Dieses System versorgt ein Treppenhaus von ca. 13 m Tiefe mit Tageslicht in Kombination mit einer dimmbaren Schwefellampe, die über ein Bussystem von einem Computer gesteuert wird.

Dabei wurde ein ebener Spiegel von 6 m^2 auf einen Solar-Tracker installiert und der Sonne zweiachsig so nachgeführt, so dass das direkte Sonnenlicht auf eine Linsenanordnung umgelenkt wird. Mit Hilfe einer optischen Anordnung, die aus vier Fresnel-Linsen und zwei parabolischen Spiegeln besteht, wird dann das direkte Sonnenlicht in den HLG gebündelt eingekoppelt (Abb. 72). In der gesamten optischen Bahn befinden sich zwei Glasscheiben.

Der Gesamtnutzungsgrad dieses Heliostatensystems ergibt sich nach Tabelle 41:

$$\eta_{\text{Gesamt}} = \rho_1 \times \tau_{\text{Glas}} \times \tau_{\text{Linse}} \times \rho_2 \times \tau_{\text{Glas}} \times k_{2,1} \times k_{2,4} \times k_{2,4} \times \cos(\alpha) = 19 - 31 \% \quad (33)$$

Tabelle 41 Größen zur Berechnung des Wirkungsgrades

Größe		Angesetzter Wert
ρ_1	Lichtreflexionsgrad des ersten Spiegels	0,85
τ_{Glas}	Lichttransmissionsgrad des Glases	0,92
τ_{Linse}	Lichttransmissionsgrad der Linse	0,85
ρ_2	Lichtreflexionsgrad des zweiten Spiegels	0,85
$k_{2,1}$	Verschmutzungsfaktor, erster Spiegel	0,90
$k_{2,2}$	Verschmutzungsfaktor, zweiter Spiegel	1
$k_{2,3}$	Verschmutzungsfaktor, Linse	1,00
$k_{2,4}$	Verschmutzungsfaktor, Glas	0,90

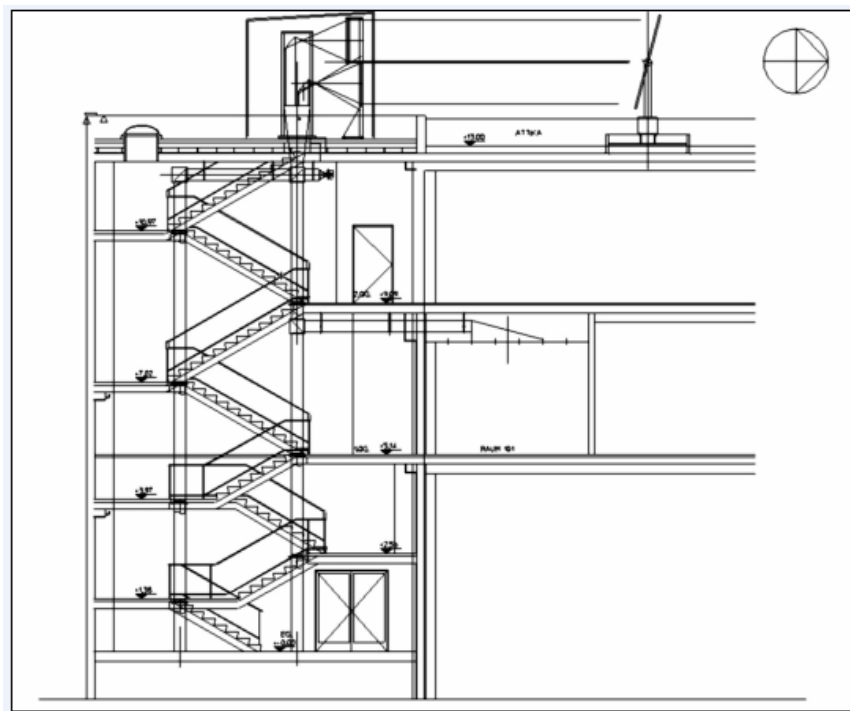


Abb. 72 Skizze der Demonstrationsanlage /93/

5.3 Mechanische Einkopplungen

Die durchgeführte Untersuchung ergab, dass der Einsatz eines starren Heliostatenspiegels zur Bündelung und Einkopplung des direkten Sonnenlichtes in die Hohllichtleiter zu einem geringen Wirkungsgrad führt. Dies ist im Wesentlichen bedingt durch die projizierte Fläche des Primärspiegels und zusätzliche optische Systeme wie die zweite Umlenkspiegelebene im Strahlengang.

Die Einkopplung, die als Bindeglied zwischen der Empfangsfläche für das direkte Sonnenlicht und dem starren HLG dient, erfolgt in der Regel durch einen flexiblen Lichtleiter und soll folgende fünf Voraussetzungen erfüllen:

- Der Lichttransport soll mit geringem Verlust erfolgen.
- Die Einkopplung soll sich mit dem Solar-Tracker, der der Sonne nachgeführt wird, bewegen.
- Sie soll staub- und wasserdicht sein.
- Sie soll UV-stabil und wetterfest sein.
- Die Struktur der Einkopplung muss insbesondere gegen starken Wind stabil sein.

Ein solcher flexibler Lichtleiter kann in folgenden möglichen Varianten verwirklicht werden:

- Lichtwellenleiter,
- Flüssigkeitslichtleiter,
- Hohllichtleiter.

5.3.1 Lichtwellenleiter

Optische Lichtwellenleiter werden in der Regel sowohl als Einkopplung des gebündelten Sonnenlichtes und auch als Lichtleitsysteme eingesetzt. Das Licht wird in einem röhrenförmigen Gebilde aus Mineralglas- oder organischem Glas (Kunststoff) durch Totalreflexion geleitet. Um diese Totalreflexion zu erreichen, müssen die einfallenden Lichtstrahlen innerhalb eines Grenzwinkels auf die Mantelfläche treffen. Der Grenzwinkel hängt von dem Material der Mantelfläche ab (Abb. 73) /79, 80/.

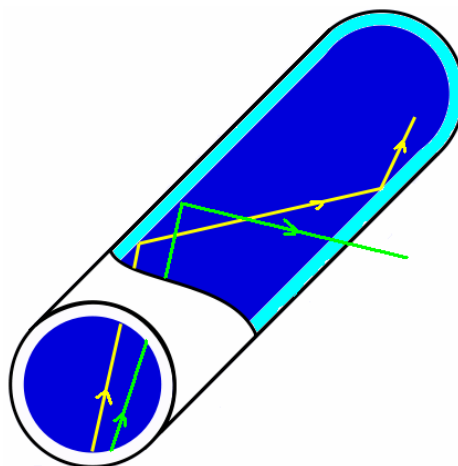


Abb. 73 Totalreflexion im Wellenlichtleiter

Zur Einkopplung wird das einfallende Licht in der Regel durch ein biegsames Glasfaserbündel, bestehend aus relativ dünnen Fasern, mit einem Kerndurchmesser von z.B.

50 μm , geleitet. Die Abb. 74 stellt eine solche Anwendung des Faserbündels als Lichtleiter zur Einkopplung des direkten Sonnenlichts dar /70/.



Abb.74 Lichtwellenleiter als Einkopplung /70/

Glasfaser können Strahlen im Spektralbereich von 400 nm bis 2000 nm durchlassen. Der eigentliche Verlust wird durch die Dämpfung der Strahlen in der Glasfaser, insbesondere im sichtbaren Spektralbereich, verursacht /46, 80/.

Die Nachteile der Glasfaser als Lichteinkopplung in das Tageslichtleitsystem sind /80/:

- Hohe Preise.
- Verluste durch nicht Erfüllung des Grenzwinkels zur Totalreflexion und Verschmutzung.
- Mögliche Beschädigung des Lichtwellenleiters (Mantelfläche) durch die sehr hohe Temperatur insbesondere im Brennpunkt der Fresnel-Linse.
- Empfindlichkeit gegenüber mechanischer Belastung.
- Bei starker Krümmung können die Fasern brechen.

5.3.2 Flüssigkeitslichtleiter

Prinzipiell können auch Flüssigkeitslichtleiter als Einkopplung eingesetzt werden. Ein Flüssigkeitslichtleiter arbeitet nach dem Prinzip der Totalreflexion wie ein Lichtwellenleiter. Das Licht wird innerhalb eines lichtleitenden flüssigen Mediums durch Totalreflexion an der Grenzschicht weitergeleitet. Die Flüssigkeitslichtleiter werden bisher hauptsächlich in der

Medizintechnik im Bereich der minimal-invasiven Chirurgie oder der Endoskopie im UV-, VIS- und NIR-Spektralbereich verwendet. Der Flüssigkeitslichtleiter besteht aus einem flexiblen Schlauch. Der Schlauch wird mit einer klaren Flüssigkeit, die bei Raumtemperatur gelförmig ist, gefüllt (Abb. 75). Der Flüssigkeitslichtleiter ist an seinen beiden Enden durch ein Quarzfenster verschlossen. Die Brechzahl des Schlauchmaterials muss deutlich kleiner als die Brechzahl der Flüssigkeit sein.

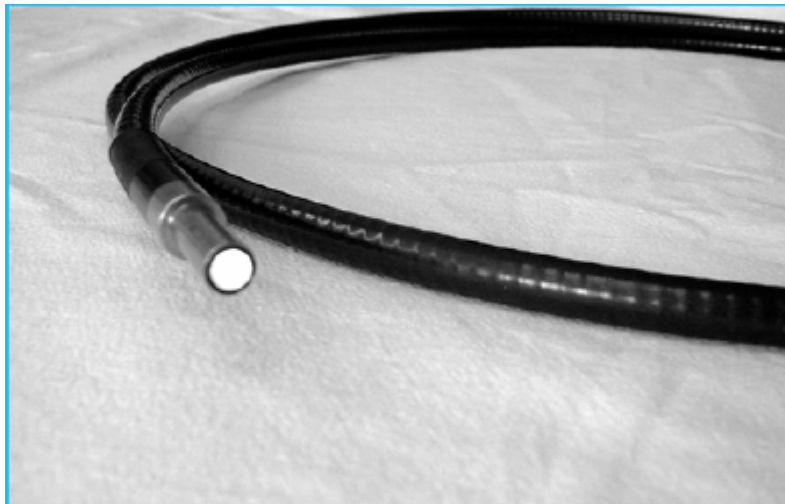


Abb. 75 Flüssigkeitslichtleiter /50/

Der Transmissionsgrad des Flüssigkeitslichtleiters allein kann im sichtbaren Spektralbereich bis zu 82 % betragen, wenn eintretende Lichtstrahlen die Grenzwinkelbedingungen der Totalreflexionen erfüllen /50/. Die Nachteile dieser Systeme sind:

- Sehr hohe Preise und Gewichte.
- Verluste durch nicht Erfüllung des Grenzwinkels zur Totalreflexion und Verschmutzung.
- Nur kleine verfügbare Durchmesser (ca. 100 mm).
- Sehr hohen Temperaturen im Brennpunkt der Fresnel-Linse können den Schlauch und den Flüssigkeitsleiter schmelzen.

5.3.3 Hohllichtleiter

Der Hohllichtleiter, dessen Innenseite mit einem hoch reflektierenden Material versehen wird, ist eine weitere Möglichkeit für eine flexible Kopplungseinheit. Ein flexibler Lichtleiter besteht aus mehreren Segmenten, die wiederum zueinander beweglich sind.

Als hoch reflektierendes Material kann z.B. die Visibel Mirror Film (VMF) mit einem spektralen Reflektionsgrad im gesamten sichtbaren Bereich von über 98 % verwendet werden. Aufgrund des sehr hohen Reflexionsgrades der Folie entsteht trotz mehrfacher Reflexion innerhalb des Hohllichtleiters ein geringer Verlust /2/.

Die Form der einzelnen Segmente der Einkopplung spielt für den Wirkungsgrad eine wichtige Rolle. Die durchgeführten Simulationen und entsprechenden Messungen ergaben, dass die Einkopplung folgende Eigenschaften erfüllen muss:

- In die Einkopplung einfallendes Licht muss weitergeleitet also nicht zurückreflektiert werden.
- Das Licht darf nicht durch die Spalten zwischen einzelnen Segmenten austreten.

Infolgedessen sollen einzelne Segmente sowohl eine zylindrische Form haben als auch ineinander gesteckt werden. Wie die Abbildung 76 zeigt, soll der Durchmesser des nachfolgenden Segments kontinuierlich größer werden.

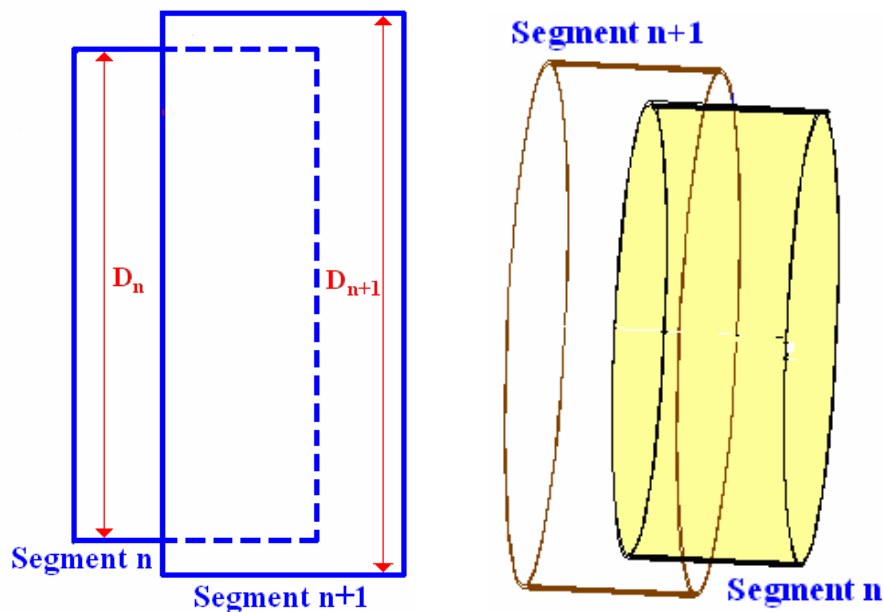


Abb. 76 Zwei benachbarte Segmente

Damit alle Sonnenpositionen erfasst werden, sollen die Segmente zueinander so angeschlossen werden, dass sie sich sowohl in horizontaler Ebene entsprechend dem Sonnenazimut nach rechts und nach links als auch in vertikaler Ebene nach oben und unten entsprechend der Sonnenhöhe bewegen können.

Die Abbildung 77 zeigt ein Modell einer einachsigen mechanischen Ankopplung aus ABS-Kunststoff (Acryl-Butadien-Styrol-Copolymer), das im Jahre 2002 im Rahmen einer Diplomarbeit entworfen wurde /62/.



Abb. 77 Modell eines Lichteinkopplungselementes

Da diese Ankopplung nur in einer Achse um 90° der Sonne nachgeführt werden konnte, wurde ein weiteres Modell einer zweiachsigen Einkopplung aufgebaut, das die Sonnenazimut- und Sonnenhöhenwinkel um 90° einstellen ließ /91/.

5.4 Realisierung einer mechanischen Einkopplung

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Heliostatenanlage mit mechanischer Einkopplung an einen Hohllichtleiter für direkten Lichteinfall entworfen und realisiert, wie die Abbildung 78 zeigt.

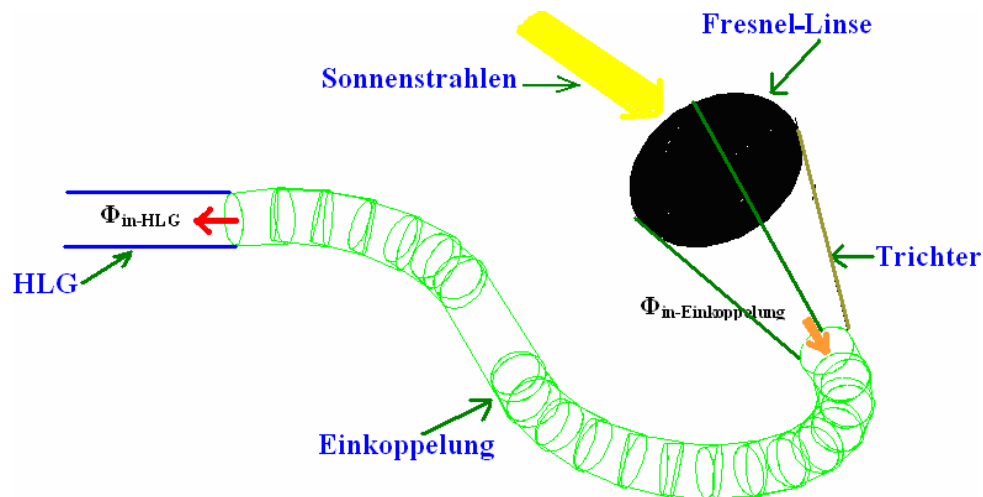


Abb. 78 Prinzipskizze eines Tageslichtsystems mit einer Fresnel-Linse und mechanischer Einkoppelung

Das direkte Sonnenlicht wird durch eine Fresnel-Linse mit der Fläche von ca. $0,64 \text{ m}^2$, die durch einen Solar-Tracker der Sonne nachgeführt wird, in den HLG durch eine mechanische Kopplung gebündelt.

Wie die Abbildung 78 zeigt, besteht dieses System aus:

- einem Solar-Tracker,
- einer kreisförmigen Fresnel-Linse aus PMMA,
- einem Trichter,
- einer Einkoppelung.

Der Solar-Tracker verfolgt die Sonne in zwei Achsen mit einer maximalen Azimutdifferenz α von 180° und Höhenwinkeln γ von 0 bis 68° / 43° .

Die kreisförmige Fresnel-Linse aus PMMA weist einen gemessenen Lichttransmissionsgrad von $0,92$ auf. Der Durchmesser der Fresnel-Linse beträgt $0,90 \text{ m}$ und die Brennweite $1,1 \text{ m}$. Wie die Abb. 79-A und 79-B zeigen, bündelt eine Fresnel-Linse bei senkrechtem Lichteinfall die gesamte Strahlung im Brennpunkt auf der optischen Achse; bei nicht senkrechtem Lichteinfall werden dagegen die Strahlen teilweise gestreut gebündelt. Daher soll die Empfangsfläche der Fresnel-Linse der Sonne nachgeführt werden.

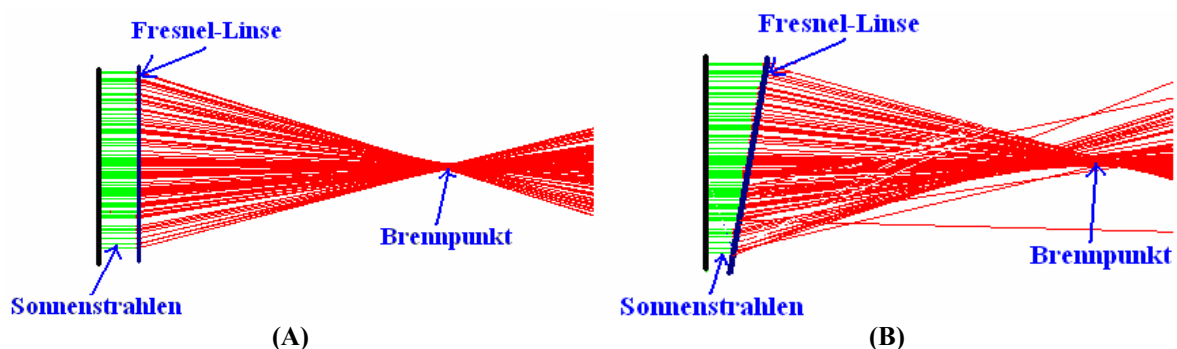


Abb. 79 Brennpunkt der Fresnel-Linse für senkrechten Lichteinfall (A) und für nicht senkrechten Lichteinfall (B)

Der Trichter besteht aus Aluminium mit einer Länge von 1,15 m und einer Eingangsfläche von $0,92 \times 0,92 \text{ m}^2$ sowie einer Ausgangsfläche von $0,2 \times 0,2 \text{ m}^2$. Die Fresnel-Linse befindet sich auf der Eingangsfläche des Trichters. Vor der Fresnel-Linse steht eine Glasscheibe. Um die Gefahren von gebündelten Sonnenstrahlen auf der Trichterinnenseite durch eine eventuelle Abweichung der Fresnel-Linse bei der Nachführung zu vermeiden, wird die Innenseite des Trichters mit VMF versehen.

Die einzelnen zylinderförmigen Elemente der Einkopplung bestehen aus Aluminium mit einer Stärke von 1 mm. Die Innenseite der Elemente ist ebenfalls mit VMF versehen. Die Einkopplung besteht aus zwei Gruppen von 9 bzw. 3 Elementen. Die 9 Elemente der ersten Gruppe haben jeweils eine Länge von 0,1 m und bewegen sich entsprechend dem jeweiligen Sonnenazimut- (von 90° bis 270°) und Sonnenhöhwinkel (von 0° bis 65°) sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Ebene (Abb. 80).

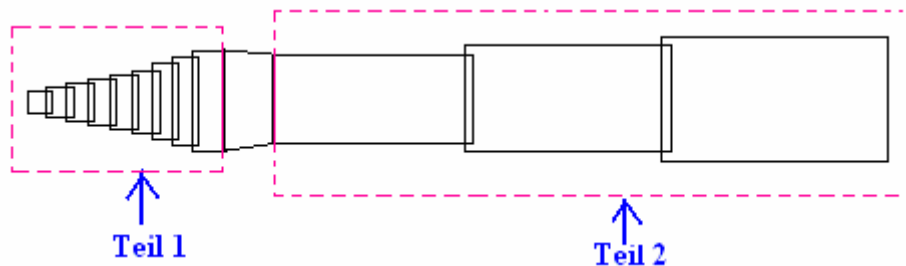


Abb. 80 Mechanische Einkopplung

Die Durchmesser der einzelnen Segmente ergeben sich wie folgt:

$$\tan \theta = \frac{\Delta r}{B} \quad (34)$$

Δr : Unterschied zwischen den Radien zweier benachbarter Segmente

B : Kleinste Überlappung zweier benachbarter Segmente (20 mm)

θ : Maximaler Winkel θ der Auslenkung zwischen zwei benachbarten Segmenten

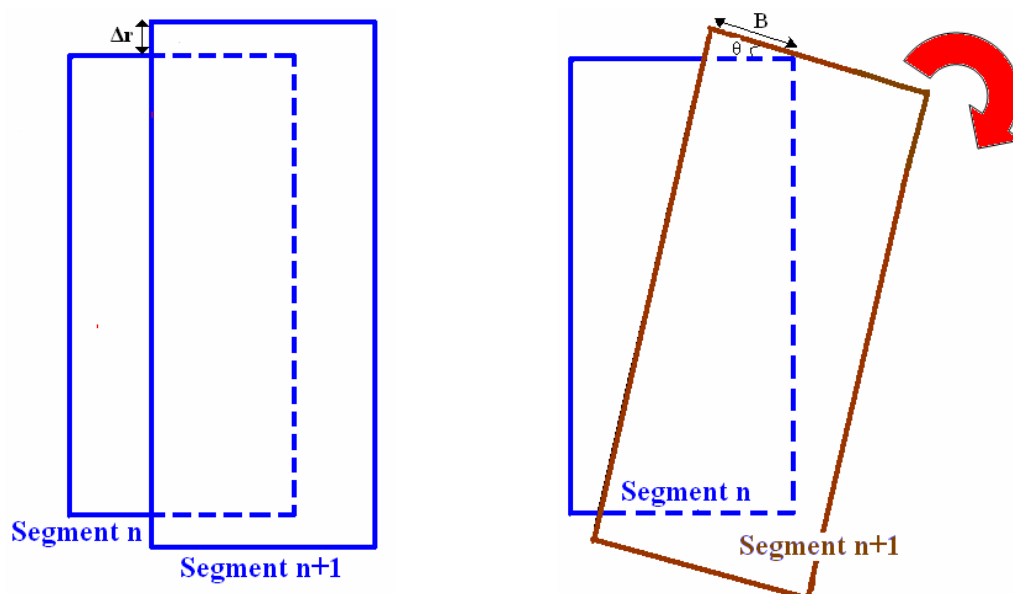


Abb. 81 Die relative Dimensionierung von zwei benachbarten Segmenten

Durch die Simulation unter Berücksichtigung der Aufbaugeometrie des gesamten Systems und des Durchmessers des HLG von 0,3 m ergab sich ein Minstdurchmesser für das erste Segment der Einkopplung von 0,1 m und eine Auslenkung zwischen zwei benachbarten Segmenten von 20°. Daraus kann Δr wie folgt berechnet werden:

$$\tan 20^\circ = \frac{\Delta r}{B} = 0,36 \quad (35)$$

$$\Rightarrow \Delta r = 7,2 \text{ mm}$$

Aus Abbildung 81 kann der Durchmesser (2r) der verschiedenen Segmente ermittelt werden:

$$D_{n+1} = D_n + 2 \times \Delta r + 2 \times d \approx D_n + 16 \quad (36)$$

D_n : Durchmesser des Segments n in mm

D_{n+1} : Durchmesser des Segments n + 1 in mm

d : Wandstärke der Aluminiumwand (1 mm)

Die ermittelten äußeren Durchmesser der einzelnen Segmente sind in der Tabelle 42 angegeben.

Tabelle 42 Durchmesser des einzelnen Segmente des ersten Teiles der Einkopplung

Kopplungssegment	Durchmesser (mm)
1	110
2	126
3	142
4	158
5	174
6	190
7	206
8	222
9	238

Der zweite Teil der Einkopplung besteht aus 3 zylindrischen Segmenten mit einer Länge von 0,6 m. Diese 3 Elemente in der zweiten Gruppe schieben sich ineinander und regeln dadurch die gesamt Länge der Einkopplung von 0,65 m bis 1,55 m. Die Durchmesser dieser 3 Segmente betragen 0,29 m, 0,275 m und 0,26 m. Die beiden Teile der Einkopplung werden mit einem festen zylindrischen Segment der Länge von 0,2 m und des Durchmessers von 0,25 m miteinander verbunden (Abb.80).

Die Abb. 82 zeigt das komplette schematische Tageslichtsystem mit der mechanischen Einkopplung.

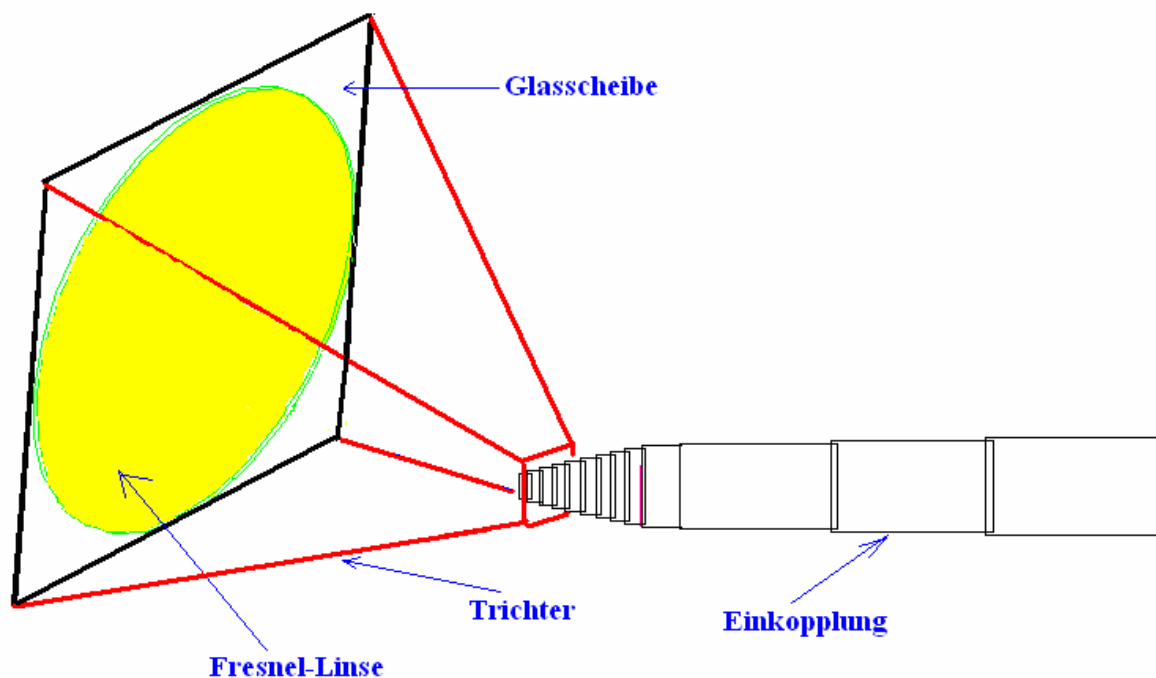


Abb. 82 Tageslichtsystem mit einer Fresnel-Linse und mechanischer Einkopplung

5.5 Wirkungsgrad der mechanischen Einkopplung

Eine direkte Bestimmung des Wirkungsgrades der Einkopplung über Lichtströme ist mit einem großen Aufwand verbunden, da der Lichtstrom am Ausgang der Einkopplung nicht ohne weiteres direkt gemessen werden kann.

Zur Bestimmung des Wirkungsgrades wurden zwei Verfahren angewandt:

- 1- Bestimmung durch Simulation
- 2- Bestimmung über Leuchtdichtemessungen

Für die Simulation wurde die TracePro-Software verwendet. In der Tabelle 43 sind die simulierten Ergebnisse für den Wirkungsgrad der Einkopplung für verschiedene Sonnenpositionen dargestellt. Diese Werte beziehen sich auf die senkrechte Anbringung des ersten Segments der Einkopplung in den Trichter. Da die hohen Sonnenhöhenwinkel bei großen Azimutwinkeln ausgeschlossen sind, schließen sich die entsprechenden niedrigen Werte des Wirkungsgrades kleiner als 55 % auch aus. Die Werte im ausgeschlossenen Bereich sind in der Tabelle 43 grau dargestellt.

Tabelle 43 Berechnete Wirkungsgrade der mechanischen Einkopplung

Sonnenazimutwinkel in Grad	Wirkungsgrad in %				
	Sonnenhöhenwinkel in Grad				
	0	15	30	45	60
0	94	90	84	80	70
15	90	86	82	75	62
30	87	83	76	68	56
45	83	80	72	61	50
60	86	82	68	55	46
75	84	80	65	50	42
90	82	76	60	46	40

In den Abbildungen 83 und 84 ist der Sonnenstand in Berlin jeweils für den 21. des Monats als Funktion der Tageszeit (Wahre Ortszeit WOZ) dargestellt.

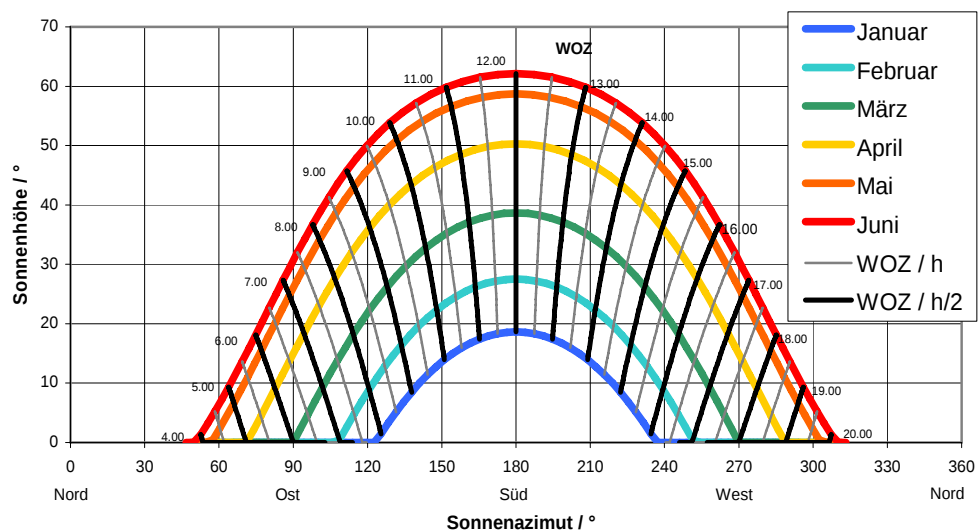


Abb. 83 Sonnenstände am 21. des Monats (Januar bis Juni)

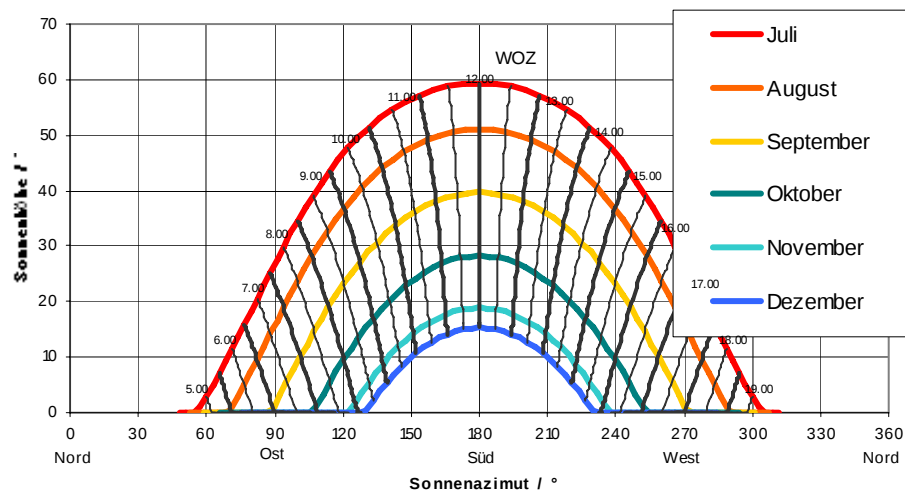


Abb. 84 Sonnenstände am 21. des Monats (Juli bis Dezember)

In den Sommermonaten kommen große Sonnenhöhen bis 63° vor. In diesem Fall wird die mechanische Einkopplung entsprechend diesen Winkeln stark gebogen, wobei der Wirkungsgrad der Einkopplung reduziert wird (bis zum 55 % in der Tabelle 43). Um die Reduzierung des Wirkungsgrades der Einkopplung zu vermeiden, wurde nach den Simulationsergebnissen das erste Segment der Einkopplung mit einem Winkel gegen die Normale des Trichters von 20° eingestellt (Abb. 85). Die entsprechenden Werte sind in der Tabelle 44 angegeben. Daraus ist zu erkennen, dass sich die Werte in diesem Bereich um bis zu 16 % verbessert haben.

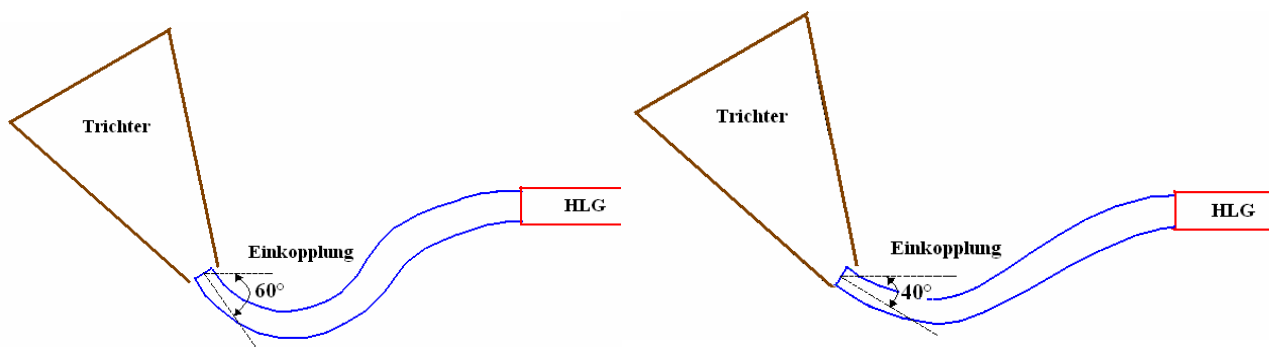


Abb. 85 Positionierung des ersten Segments der Einkopplung mit dem Trichter

Tabelle 44 Berechnete Wirkungsgrade der mechanischen Einkopplung

	Wirkungsgrad in %				
Sonnenazimutwinkel in Grad	Sonnenhöhenwinkel in Grad				
	0	15	30	45	60
0	91	87	85	83	80
15	87	84	83	80	78
30	85	81	80	77	72
45	81	79	78	70	70
60	84	80	79	70	68
75	82	78	75	63	63
90	80	74	73	60	58

Der gesamte Wirkungsgrad des Systems Fresnel-Linse und Einkopplung wird wie folgt ermittelt:

$$\eta_{\text{Gesamt}} = \tau_{\text{Glas}} \times k_{2,4} \times \tau_{\text{Linse}} \times \eta_{\text{Einkoppelung}} = 53 - 70 \% \quad (37)$$

Für den Leuchtenbetriebswirkungsgrad des HLG wird ein Wert von 80 % angesetzt, so ergibt sich ein Wirkungsgrad des kompletten Systems zwischen 42 % und 56 %.

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung des Wirkungsgrades der Einkopplung ist die Bestimmung über Leuchtdichtemessungen mit einer CCD Kamera.

Die richtungsunabhängige Leuchtdichte L einer vollkommen diffus transmittierenden Fläche mit einem Lichttransmissionsgrad τ kann aus der Beleuchtungsstärke E auf der Fläche A wie folgt ermittelt werden /59/:

$$L = \frac{\tau}{\pi \cdot \Omega_0} \cdot E \quad (38)$$

Der auffallende Lichtstrom Φ_{ein} kann beschrieben werden:

$$\Phi_{\text{ein}} = A \cdot E \quad (39)$$

Der durchgelassene Lichtstrom Φ_{aus} ergibt sich in:

$$\Phi_{\text{aus}} = A \cdot M = A \cdot \pi \cdot \Omega_0 \cdot L \quad (40)$$

M : Spezifische Lichtausstrahlung

Wenn die Beleuchtungsstärke auf der Fläche nicht gleichmäßig ist, kann der auffallende und der durchgelassene Lichtstrom wie folgt berechnet werden (Abb. 86):

$$\Phi_{\text{ein}} = \int_{(A)} E_i \cdot dA_i \quad (41)$$

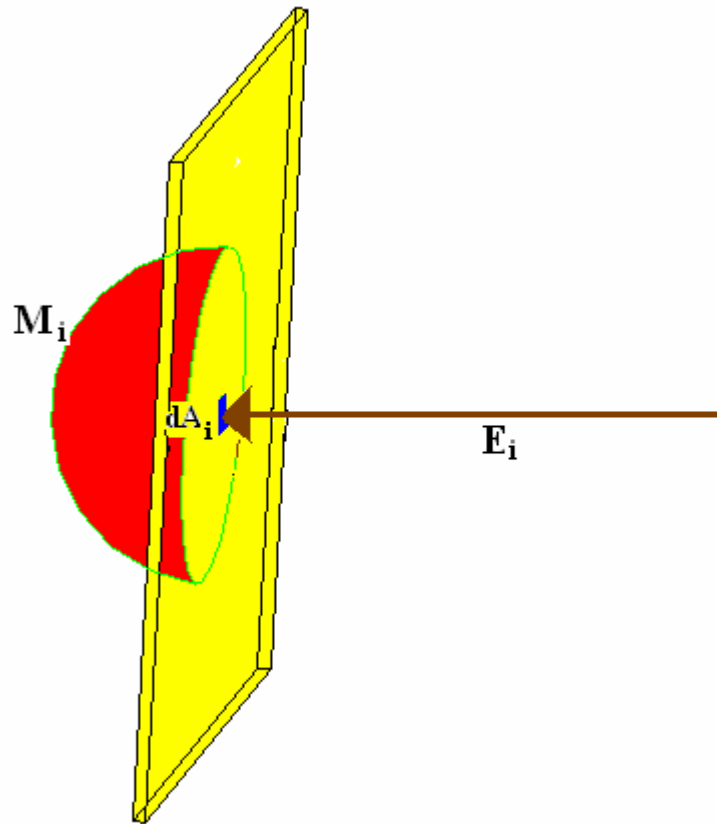


Abb. 86 Spezifische Lichtausstrahlung einer kleinen Fläche

$$M_i = \pi \cdot \Omega_0 \cdot L_i \quad (42)$$

$$\Phi_{\text{aus}} = \int_{(A)} M_i \cdot dA_i = \int_{(A)} \pi \cdot \Omega_0 \cdot L_i \cdot dA_i = \pi \Omega_0 \int_{(A)} L_i \cdot dA_i \quad (43)$$

$$\bar{L} = \frac{1}{A} \int_{(A)} L_i \cdot dA_i \quad (44)$$

$$\Phi_{\text{aus}} = \pi \cdot \Omega_0 \cdot A \cdot \bar{L} \quad (45)$$

Dazu wird zunächst die mittlere Leuchtdichte auf einer stark steuernd transmittierenden Platte, die sich unmittelbar vor einem Scheinwerfer befindet, gemessen. Der Lichtstrom des Scheinwerfers wurde ebenfalls gemessen. Für diese Messungen wurde eine gut streuende weiße Plexiglasscheibe (Streuscheibe) der Dicke von 3 mm verwendet. Der gemessene Lichttransmissionsgrad (τ_{Plexi}) beträgt 53 % und der Lichtreflexionsgrad (ρ_{Plexi}) 45 %.

Die gemessene mittlere Leuchtdichte ist dann proportional zu dem Lichtstrom des Scheinwerfers für den Fall ohne mehrfache Reflexion. Die dabei entstehende mehrfache Reflexion soll dann durch einen Korrekturfaktor eliminiert werden.

Bei der Bestimmung der Lichtströme über die mittlere Leuchtdichte des Scheinwerfers wurde die mehrfache Reflexion wie folgt erfasst und daraus ein Korrekturfaktor (K_{Plexi}) abgeleitet. Die Abb. 87 stellt den Beitrag der Strahlen nach der ersten Reflexion durch die Streuscheibe dar.

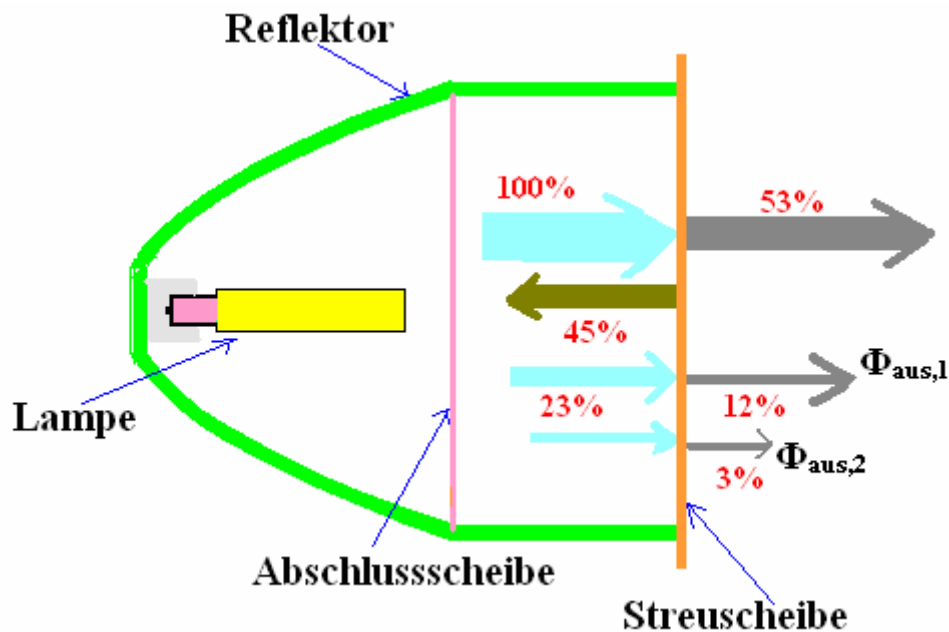


Abb. 87 Ausbreitung der Scheinwerferstrahlen durch eine Streuscheibe

$$\Phi_{\text{aus},i} = (\rho_{\text{Plexi}} \times \rho_{\text{Ref}})^i \times \tau_{\text{Plexi}} \quad (46)$$

Hierbei sind:

$\Phi_{\text{aus},i}$: Zusätzliche austretender Lichtstrom nach der i-ten Reflexion in der Streuscheibe in %

ρ_{Ref} : Reflexionsgrad des Reflektors mit der Lampe und der Abschlusscheibe, welcher nach Abschluss des Simulationsprogramms zu 0,52 ermittelt wurde.

Nach der Gleichung 46 ergibt sich $\Phi_{\text{aus},1} = 12 \%$ und $\Phi_{\text{aus},2} = 3 \%$ sowie ein Korrekturfaktor von 0,78 ($= \frac{53}{53+12+3}$).

$\Phi_{\text{aus},3}$ wird aufgrund des geringen Betrages von 0,09 % vernachlässigt.

Die gemessene mittlere Leuchtdichte der Plexiglasplatte vor dem Scheinwerfer beträgt 80000 cd/m^2 ; der korrigierte Wert ist dann 63000 cd/m^2 . Dies entspricht einem gemessenen Lichtstrom des Scheinwerfers von 26600 lm.

Als nächstes wird die mittlere Leuchtdichte hinter der Einkopplung gemessen. Der Durchmesser des Scheinwerfers und der Austrittsfläche der Einkopplung sind gleich und betragen 0,29 m. Damit entspricht das Verhältnis der mittleren Leuchtdichten dem Verhältnis der Lichtströme.

Der in die Einkopplung eintretende Lichtstrom Φ_{Ein} lässt sich wie folgt berechnen:

$$\Phi_{\text{Ein}} = E_{\text{Es}} \times K_{\text{S}} \times A_{\text{Linse}} \times \tau_{\text{Linse}} \times k_{2,4} \times \tau_{\text{Glas}} \quad (47)$$

E_{Es} : Direkte Bestrahlungsstärke der Sonne in W/m^2

K_{S} : Photometrisches Strahlungsäquivalent der Sonne in lm/W /35/

A_{Linse} : Gesamtfläche der Fresnel-Linse in m^2 (0,64 m^2)

Die Messungen wurden in 17 sonnigen Tagen im Juli und August 2008 durchgeführt. Die Werte der direkten Bestrahlungsstärke der Sonne wurden gleichzeitig mit Hilfe eines Pyrheliometers auf dem Tageslichtmessplatz des FG Lichttechnik der Technischen Universität Berlin registriert /54/. Z. B. ergibt sich am 19.08.08 um 12:45 (MESZ) Uhr ($\alpha_{\text{s}} = 170^\circ$ und $\gamma_{\text{s}} = 50^\circ$) der eintretende Lichtstrom:

$E_{\text{Es}} : 850 \text{ W/m}^2$

$K_{\text{S}} : 100 \text{ lm/W}$

$\Phi_{\text{Ein}} = 44500 \text{ lm}$

Die mittlere Leuchtdichte am Eingang der Einkopplung wurde zu 110000 cd/m^2 gemessen. Dieser Wert entspricht einem Lichtstrom der Einkopplung von 46800 lm. Die relative Abweichung zwischen dem berechneten (44500 lm) und dem gemessenen (46800) eintretenden Lichtstrom ergibt sich zu 5 %. Der Unterschied ist auf den diffusen Lichtstrom durch das Himmelslicht zurückzuführen.

In der folgenden Tabelle sind die gemessenen Leuchtdichten der Einkopplung für verschiedene Sonnenpositionen dargestellt.

Tabelle 45 Gemessene Leuchtdichte der mechanischen Einkopplung

Sonnenazimutwinkel in Grad	Gemessene Leuchtdichte in cd/m^2			
	Sonnenhöhenwinkel in Grad			
	0	20	30	45
0		93500	91500	87500
45		81500	79500	74000
90		77000	73000	

Aus den Werten der mittleren Leuchtdichte in der Tabelle 45 können die Wirkungsgrade ermittelt werden (Tabelle 46).

Tabelle 46 Gemessene Wirkungsgrade der Einkopplung (durch Vergleich)

Sonnenazimutwinkel in Grad	Wirkungsgrad in %			
	Sonnenhöhenwinkel in Grad			
	0	20	30	45
0		85	83	80
45		74	72	67
90		70	66	

Die nach beiden Verfahren ermittelten Wirkungsgrade stimmen ausreichend genau überein. Wegen der Schmutzpartikel und der Schrauben in der Einkopplung ist der gemessene Wirkungsgrad kleiner als berechnete Werte.

5.6 Gemessener Wirkungsgrad des Tageslichtsystems mit HLG

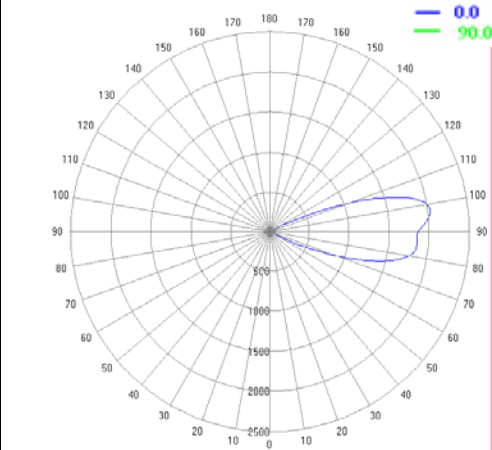
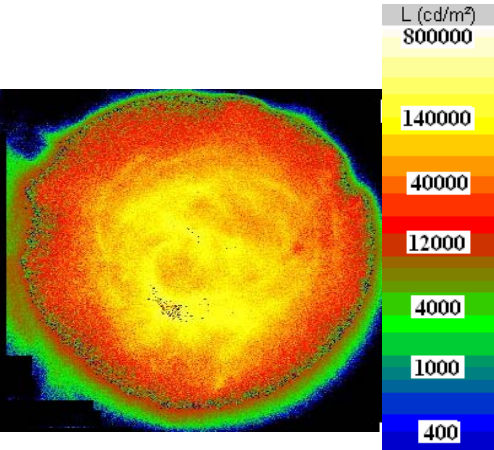
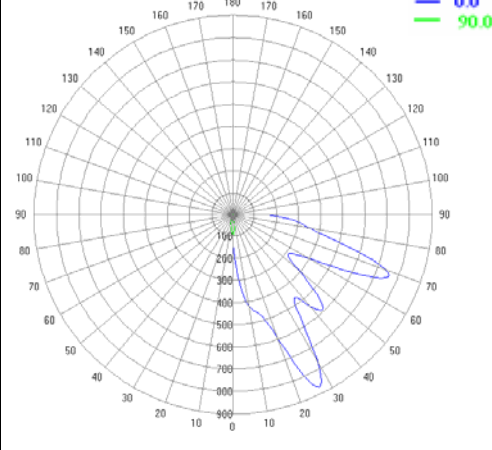
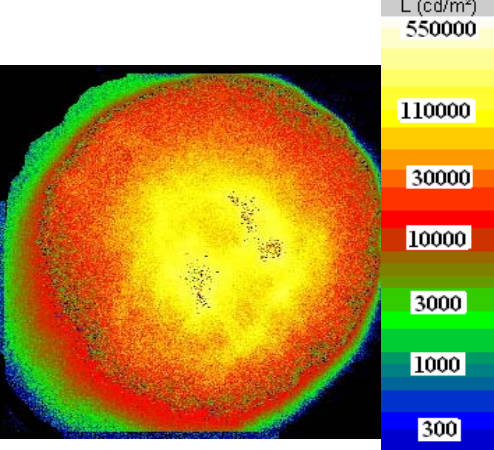
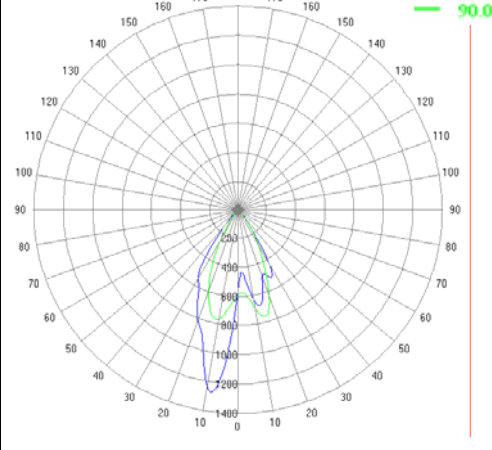
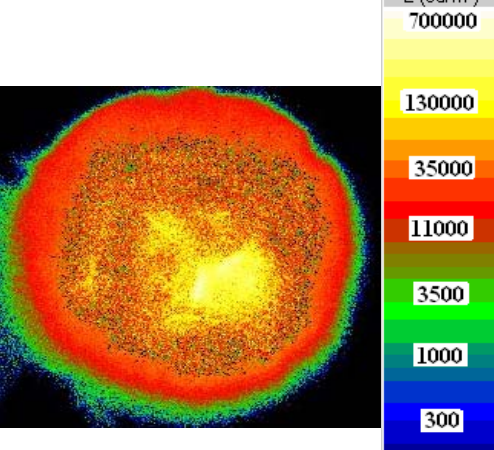
Bei der Bestimmung des Wirkungsgrades des gesamten Systems mit HLG wird hier zunächst auf den in den HLG eingekoppelten Lichtstrom bezügliche der Akzeptanzwinkelbedingung der Prismenfolie eingegangen.

Alle Strahlen, die aus der mechanischen Kopplung innerhalb eines Kegels mit einem Öffnungswinkel $< 27,6^\circ$ in den starren Hohllichtleiter eingekoppelt werden, werden von der prismatischen Folie reflektiert und weitergeleitet, sonst werden sie durch die Folie durchgelassen und treten aus dem HLG aus.

Um den durch die mechanische Einkopplung in den HLG eingekoppelten Lichtstrom zu analysieren, wurde die LVK des aus der Einkopplung ausgekoppelten Lichtstroms durch das Simulationsprogramm „TracePro“ ermittelt. Außerdem wurde die Leuchtdichtevertelung durch eine CCD Kamera aufgenommen.

In Tabelle 47 sind die berechneten Lichtstärkeverteilungen und die entsprechenden gemessenen Leuchtdichtevertelungen der Einkopplung für verschiedene Winkel bei einer einachsigen Drehung der Einkopplung dargestellt.

Tabelle 47 Berechnete LVK und gemessene Leuchtdichte der Einkopplung für verschiedene Auslenkungen

Auslenkung in Grad	Berechnete LVK	Gemessene Leuchtdichte
0	 cd / klm	 L (cd/m²) 800000 140000 40000 12000 4000 1000 400
45	 cd / klm	 L (cd/m²) 550000 110000 30000 10000 3000 1000 300
90	 cd / klm	 L (cd/m²) 700000 130000 35000 11000 3500 1000 300

Die aufgenommenen Leuchtdichteverteilungen bestätigen die Lichtstärkeverteilung der Einkopplung. Aus der Lichtstärkeverteilung ist zu erkennen, dass die eingekoppelte LVK nicht immer die Akzeptanzwinkelbedingung erfüllt, wie für den Winkel 45° eindeutig zu sehen ist. Die Abb. 88 zeigt die Strahlen des simulierten Tageslichtsystems mit einer Auslenkung der Einkopplung von 90° .

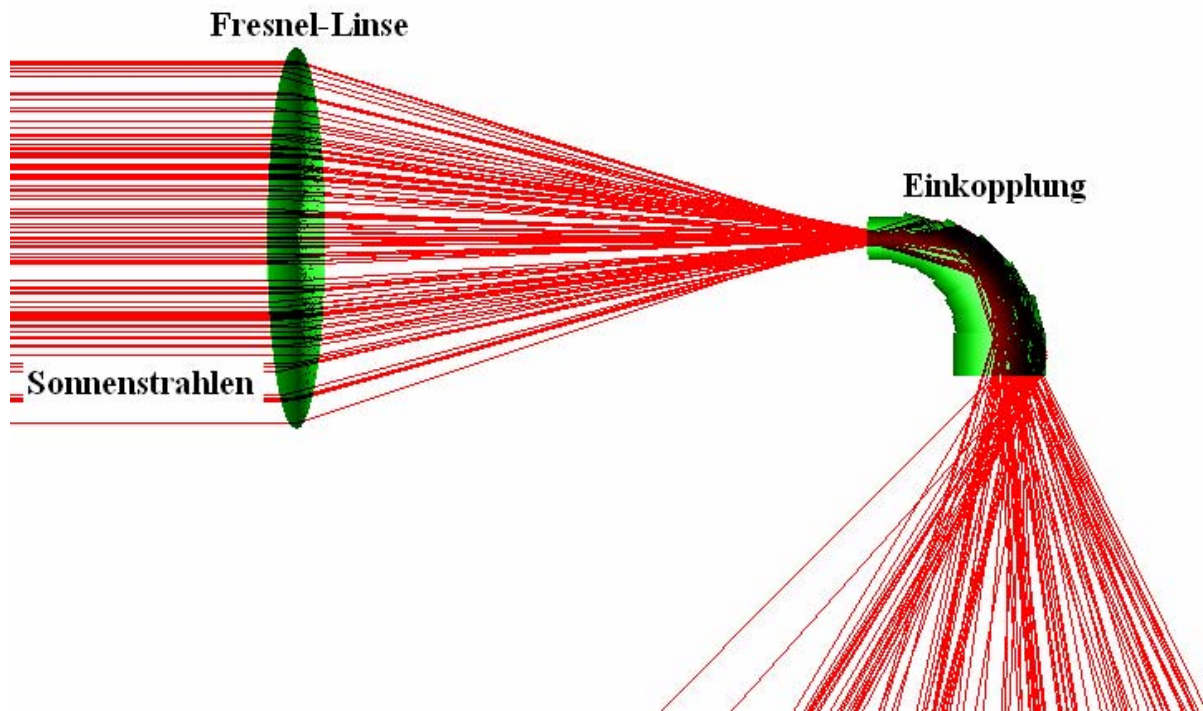


Abb. 88 Simuliertes Tageslichtsystem mit einer Auslenkung der Einkopplung von 90°

Es ist zu bemerken, dass HLGs mit prismatischen Folien für die Tageslichtnutzung nicht optimal sind. Daher ist zu empfehlen, in diesem Fall die HLGs außerhalb der Austrittsfläche mit VMF zu versehen.

Eine direkte Bestimmung des Lichtstroms von HLG für Tageslichtnutzung im Labor ist nicht möglich, da der durch die Einkopplung in den HLG eintretende Lichtstrom des Sonnenlichtes nicht realisiert werden kann.

Um den sonnenstandabhängigen Wirkungsgrad von HLG für die Tageslichtnutzung ermitteln zu können, wurde ein Vergleichsverfahren angewandt.

Dazu wurden die Beleuchtungsstärkeverteilungen in einem Raster auf der Nutzebene des Versuchsaums sowohl beim Ansatz eines Scheinwerfers mit bekanntem Lichtstrom als auch für verschiedene Situationen der Tageslichtnutzung gemessen und daraus der Nutzlichtstrom ermittelt.

Der HLG hat eine Länge von 6 m und einen Durchmesser von 0,3 m. Er ist mit einer VMF und streuendem Extraktorfilm versehen. Die Abmessungen des Versuchsaums sind:

Raumtiefe: 6,4 m

Raumbreite: 2,3 m

Raumhöhe: 2,9 m

Untersuchter HLG mit eingekoppeltem Tageslicht und das verwendete Messraster sind in den Abb. 89 und 90 angegeben.



Abb. 89 Untersuchter HLG durch Tageslichtsystem

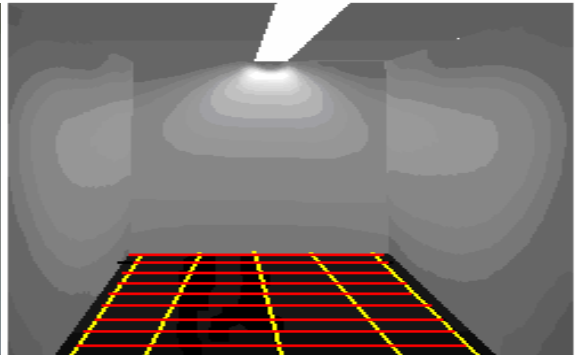


Abb. 90 Grundriss des Flurs

Zunächst wurde der HLG durch einen Scheinwerfer gespeist und die Beleuchtungsstärkeverteilung auf der Nutzebene gemessen.

Die Abb. 91 zeigt die Beleuchtungsstärkeverteilung auf der Nutzebene, wenn der HLG durch einen Scheinwerfer mit einem Gesamtlichtstrom von 26600 lm gespeist wird.

Aus der Abb. 91 ist zu erkennen, dass die Beleuchtungsstärkeverteilung ungleichmäßig ist, weil der Extraktor im Hohllichtleiter für einen 9 m HLG mit diesem Scheinwerfer entworfen wurde und für 6 m Hohllichtleiter nicht optimal ist. Für diese Situation ergibt sich ein Gesamtlichtstrom auf der Nutzebene von 5100 lm.

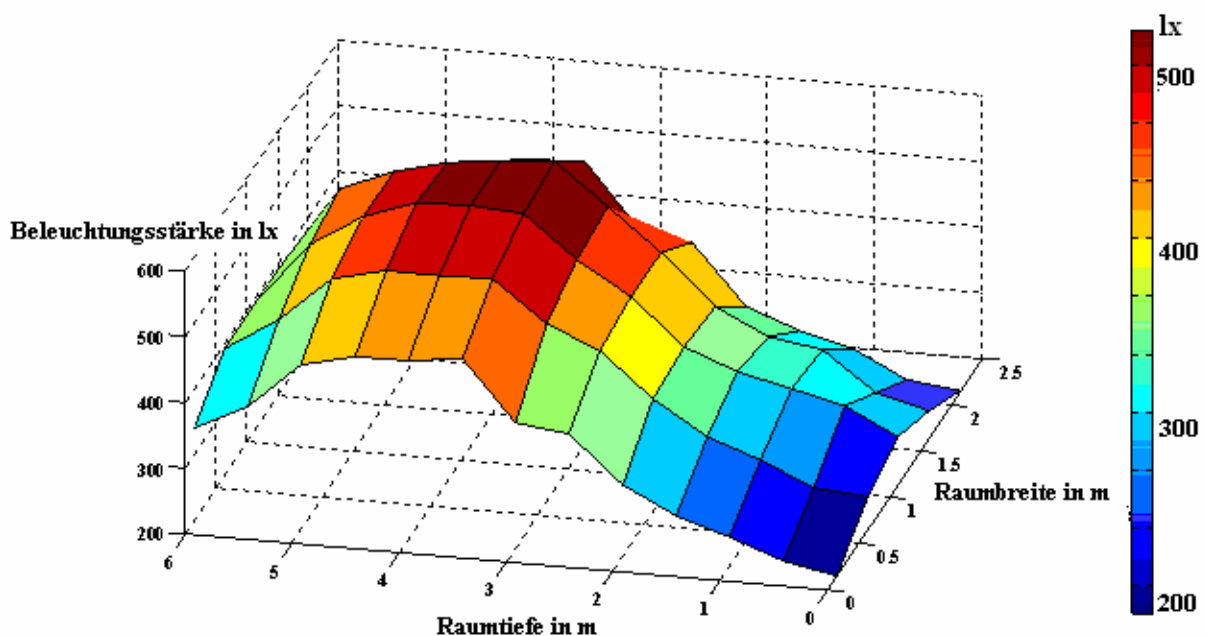


Abb. 91 Beleuchtungsstärkeverteilung des HLG mit Kunstlicht

Als nächstes wird die Beleuchtungsstärkeverteilung auf der Nutzebene ermittelt, wenn der HLG durch Sonnenstrahlen über die Einkopplung gespeist wird. Die Messungen wurden am 13. und 14. August sowie 17., 24. und 25. September 2008 durchgeführt. Die Abb. 92 zeigt

die gemessene Beleuchtungsstärkeverteilung auf der Nutzebene am 14.08.2008 um 13:20 (MESZ) Uhr ($\alpha_s = 183^\circ$ und $\gamma_s = 52^\circ$)

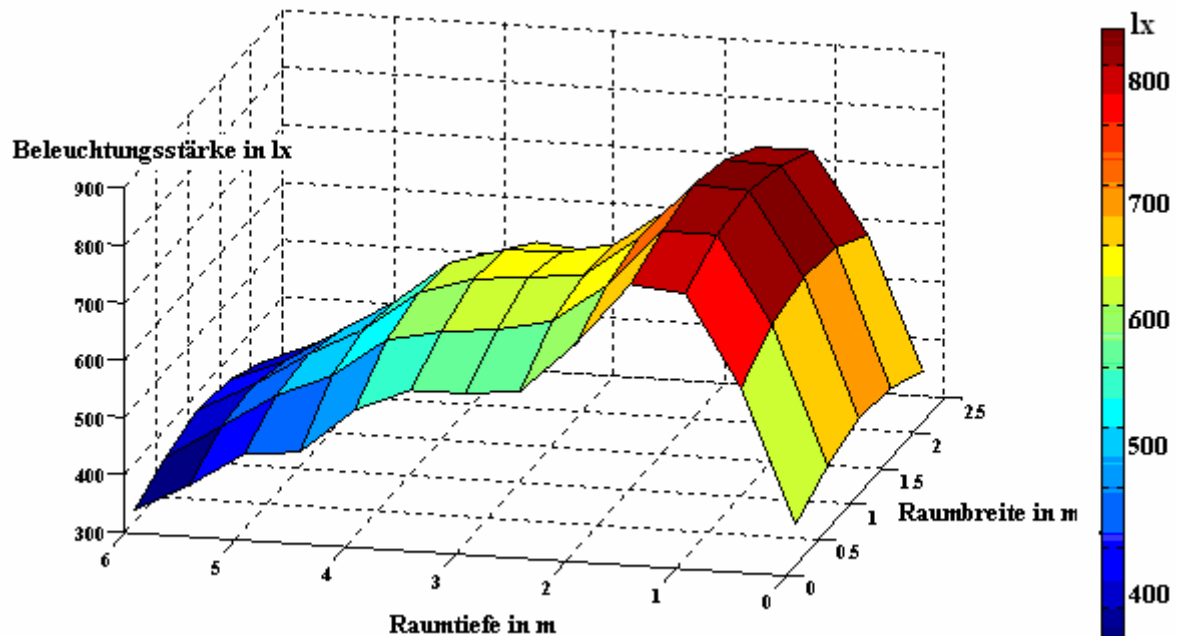


Abb. 92 Beleuchtungsstärkeverteilung des HLG mit Tageslicht

Trotz des mit VMF versehenen HLGs ist Beleuchtungsstärkeverteilungen auf der Nutzebene in der ersten Hälfte des HLG größer als in der zweiten, weil die Extraktoren von HLG für Scheinwerfer mit schmaler LVK entworfen wurde. Weshalb eine Extraktormodifizierung erforderlich ist.

In Tabelle 48 sind die Lichtströme auf der Nutebene für verschiedene Sonnenpositionen dargestellt.

Tabelle 48 Gesamter Lichtstrom auf der Nutzebene

Nr.	Azimutwinkel in Grad	Höhwinkel in Grad	Gesamter Lichtstrom auf der Nutzebene in lm
1	183	52	7400
2	192	51	7000
3	210	46	6600
4	230	40	6300
5	240	37	6000
6	260	35	5800

Wie die Tabelle 48 zeigt, ist der Lichtstrom auf der Nutzebene mit Tageslicht größer als bei der Verwendung des Scheinwerfers.

Die Beleuchtungsstärkeverteilung auf der Nutzebene ist für die Testanlage ungleichmäßig. Durch geeignete Anordnung der ersten Segmente und der Extraktoren in HLG kann diese Ungleichmäßigkeit begrenzt werden.

5.7 Wartung des Tageslichtsystems

Da das Heliostatensystem außen installiert wurde, und gegen Staub und Wasser sehr empfindlich ist, muss es staub- und wasserdicht sein, damit der Wirkungsgrad im Verlauf der Zeit nicht beeinträchtigt wird. Aus diesem Grund wurde die Einkopplung durch einen staub- und wasserdichten Schutzmantel aus Kunststoff bedeckt (Abb. 93). Die Anlage ist wie der bisher mehrmonatige Betrieb zeigte gegen starke Windlasten beständig.



Abb. 93 Schutz des Tageslichtsystems gegen Verschmutzung und Wasser

5.8 Empfangsfläche der Fresnel-Linse

Für die Empfangsfläche ist eine ebene Fresnel-Linse notwendig. Eine große Fläche kann durch Zusammensetzung von kleineren im Markt erhältlichen Fresnel-Linsen ($0,6 \times 0,5 \text{ m}^2$ /53/) nebeneinander erreicht werden (Abb. 94).

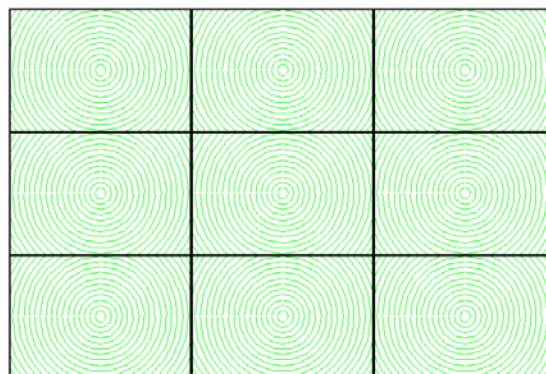


Abb. 94 Array der Fresnel-Linse

Die Simulation zeigt, dass zur Vergrößerung der Empfangsfläche eine Zusammensetzung von mehreren Linsen nicht sinnvoll ist, weil sich für diesen Fall nebeneinander liegende Brennpunkte ergeben (Abb. 95).

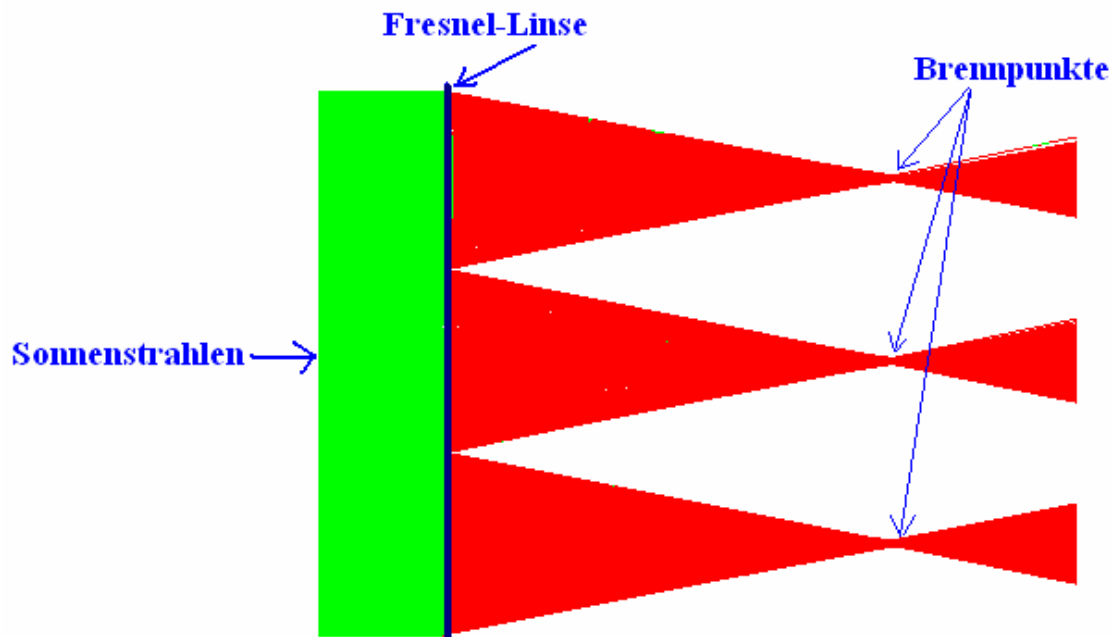


Abb. 95 Brennpunkte einer Array der Fresnel-Linse

Simulationsergebnisse zeigen aber, dass nicht alle Brennpunkte der parabolischen Form der Fresnel-Linse (Abb. 96) an einem Punkt zusammengebracht werden können (Abb. 97), weil sich der Brennpunkt bei nicht senkrechtem Lichteinfall nicht auf der Normale der Linsenfläche, sondern auf einer Achse parallel zur Lichteinfall befindet.

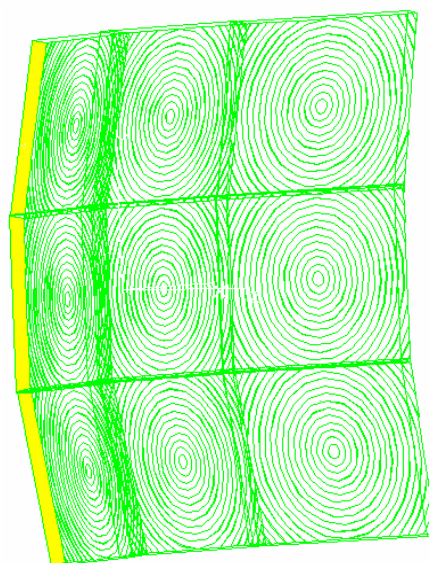


Abb. 96 Eine parabolische Arraylinse

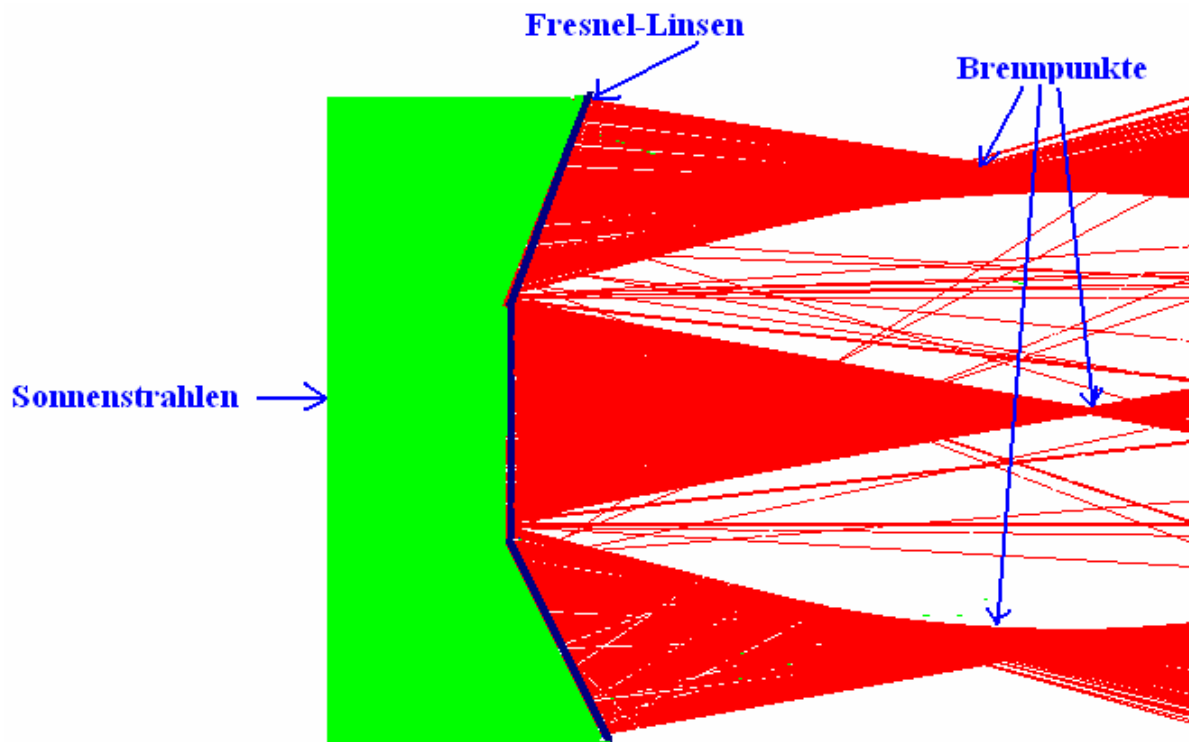


Abb. 97 Brennpunkte einer parabolischen Arraylinse

Daraus folgt, dass für die Empfangsfläche eine einzelne großflächige Fresnel-Linse verwendet werden muss.

5.9 Zusammenfassung und Ausblick

Der Gesamtenergiebedarf von Gebäuden wird nach der Energieeinsparverordnung (EnEV) auf der Grundlage des relativen jährlichen Primärenergiebedarfs berechnet. Dabei werden andere Energiearten wie z. B. elektrische Energie mit Primärenergiefaktoren in die Primärenergie umgerechnet. Die für die künstliche Beleuchtung notwendige elektrische Energie hat einen Primärenergiefaktor von ca. drei. Die Tageslichtbeleuchtung hat dagegen als erneuerbar Energieträger einen Primärenergiefaktor von null. Dies macht die Nutzung des Tageslichtes in Gebäuden sinnvoll. Da das Tageslicht zur Beleuchtung nicht immer zur Verfügung steht, müssen die Gebäude auch mit künstlicher Beleuchtung versorgt werden. Durch die Tageslichtbeleuchtung werden die Kosten für den elektrischen Energiebedarf reduziert. Diesen Einsparungen stehen höhere Kosten für die Planung der Anlage, die Installationen des Tageslichtsystems, die Beleuchtungssteuerung oder -regelung und die Lampenvorschaltgeräte gegenüber.

Die reinen Wirtschaftlichkeitsberechnungen ergeben einen eindeutigen Vorteil von Kunstlichtsystemen gegenüber kombinierten Tages- Kunstlichtsystemen /44, 93/, weil nicht alle psychologischen Vorteile des Sonnenlichts (wie: Erlöse durch die Erhöhung der Arbeitseffektivität, Verbesserung von Ergonomie und Akzeptanz, Umweltfreundlichkeit) quantifizierbar bzw. messbar in die Wirtschaftlichkeitsberechnung eingebracht werden können.

WHITEHEAD wies ausdrücklich darauf hin, dass der psychologische Vorteil von Sonnenlicht der wichtigste ökonomische Aspekt ist, den man allerdings in wirtschaftlichen Berechnungen nichts quantifizierbar aufweisen kann /93, 132/.

Seit den 1970er- Jahren wird der Begriff des Umweltschutzes vor allem über Umweltverschmutzung und Global Erwärmung verwendet. Der Umweltschutz, der die Gesamtheit aller Maßnahmen zum Schutz der Umwelt mit dem Ziel der Erhaltung der Lebensgrundlagen der Menschen und Ihrer Gesundheit bezeichnet, ist eine große Sorge für heutige Menschen.

Das Kohlendioxid, das bei der Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Brennstoffen (z. B. alle fossilen Energieträger im Kraftwerksprozess) erzeugt wird, entweicht in die Atmosphäre und trägt zur globalen Erwärmung bei.

Bei einem herkömmlichen Kohlekraftwerk entstehen aus 0,32 kg Steinkohle ca. 0,88 kg Kohlendioxid und 1 kWh elektrischer Strom bei einem Wirkungsgrad von 38 % /25, 26/.

Wenn der Strom aus dem Braunkohle oder dem Erdgas erzeugen würde, treten ca. 1,153 kg bzw. 0,428 kg CO₂ für 1 kWh auf /25, 26/.

Die maximale elektrische Leistung des Sollar-Trackers beträgt 20 W, und der eingekoppelte Lichtstrom in den HLG beträgt 30000 bis 40000 lm. Der mittlere Lichtstrom von 35000 lm kann mit dem Lichtstrom eines Scheinwerfers mit einer HQI-T 600 W Lampe angenommen werden. Unter Berücksichtigung der Verluste des elektronischen Vorschaltgerätes von 10 % der Lampenleistung beträgt die Systemleistung des Scheinwerfers 660 W.

Mit der Annahme von 10 % Verlusten im Leitungsnetz (zwischen EVV und Verbraucher) beträgt der gesamte Energieverbrauch für die oben genannte Beleuchtungsanlage von $660 \times 1,1 = 726$ W. Dafür werden pro Stunden 0,31 kg CO₂ aus einem Erdgaskraftwerk bzw. 0,84 kg CO₂ aus einem Braunkohlkraftwerk freigesetzt, das durch die Tageslichtnutzung vermeiden werden kann.

Für die Beurteilung von Tageslichtsystemen sollten nicht nur die eingesparten Stromkosten berücksichtigt werden, sondern auch die psychologischen Effekte des Tageslichtes, die bekanntlich eine positive Wirkung auf das Befinden der Menschen haben.

6 Zusammenfassung

Hohllichtleiter gespeist durch künstliche Lichtquellen oder Sonnenlicht können als Beleuchtungsanlagen mit Längen bis zu 40 m verwendet werden. Deswegen sind sie eine interessante Alternative für verschiedene Beleuchtungszwecke wie z.B. zur Tunnelbeleuchtung, Innenraumbeleuchtung (Montagenhallen, Schwimmhallen, Mehrzweckhalle, u.a.). Außerdem kann man auch größere Raumtiefen durch Hohllichtleitersysteme mit Tageslicht versorgen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden durch umfangreiche Messungen und Berechnungen zwei große Nachteile des HLG: a) kleiner Wirkungsgrad bzw. b) ungleichmäßig ausgekoppelter Lichtstrom, die den Einsatz eines HLG im Innenraum beschränken, gelöst.

Ein guter Ersatz der Prismenfolie zur Weiterleitung ist der Visible Mirror Film (VMF) mit einem durchschnittlichen Reflexionsgrad von 98 % für alle einfallenden Winkel der Strahlen. Mit Hilfe des VMF kann der Wirkungsgrad von HLG auf 80 % verbessert werden.

Hier wurde auch eine neue Lösung präsentiert, die auf dem separaten Einsatz eines diffus reflektierenden Extraktors für jedes Segment eines HLG, ähnlich dem Einsatz von Spiegelextraktoren, basiert. Dadurch kann mit einem Endspiegel eine nahezu gleichmäßige Beleuchtungsstärkeverteilung auf der beleuchtenden Nutzebene realisiert werden. Für eine absolut gleichmäßige Beleuchtungsstärkeverteilung kann ein flacher Endspiegel statt des Endspiegels der Firma 3M ohne einen wesentlichen zusätzlichen Verlust verwendet werden.

Kapitel 4 beschreibt, wie die Abweichung der berechneten von den gemessenen Lichtplanungsparametern reduziert werden kann.

Wenn bei der Berechnung der Beleuchtungsstärke die gemessenen LVK in den Bereichen der Spiegelextraktoren mit einem Segment von 0,2 m anstatt 1 m verwendet werden, ist eine maximale relative Abweichung kleiner als 16 % und eine mittlere relative Abweichung kleiner als 7 % garantiert.

Die maximale relative Abweichung der Leuchtdichte kann auf ca. 5 % beschränkt werden, wenn die Breite des HLG mit dem entsprechenden Auskopplungsfenster mit einem Korrekturfaktor von 1,05 in den Eulumat-Daten eingegeben wird. Bei Berücksichtigung der Bedingungen zur gemessenen LVK und berechneten Leuchtdichte kann die berechnete UGR die Blendung mit hoher Genauigkeit beurteilt werden.

Das hier vorgestellte Tageslichtsystem mit beweglicher mechanischer Kopplung kann einen Wirkungsgrad von bis zu 72 % erreichen. Wenn für den Leuchtenbetriebswirkungsgrad des HLG ein Wert von 80 % angesetzt wird, ergibt sich ein Wirkungsgrad des kompletten Systems von bis zu 58 %.

Dieses entwickelte Tageslichtsystem eignet sich für den Einsatz zur Lichtversorgung fensterloser Gebäudeteile oder Areale mit Fensterabständen von bis zu 40 m mit Tageslicht, da bei Räumen mit Seitenfenster die Beleuchtungsstärke durch Tageslicht von der Fensterwand in die Raumtiefe näherungsweise exponential abnimmt. Dabei kam ein Tageslichtsystem zum Einsatz, dessen Vorteile vor allem Kosteneinsparungen, positive Effekte auf die Aufenthaltsqualität und gesteigener visueller Komfort sowie Umweltfreundlichkeit sind.

7 Literaturverzeichnis

- /1/ 3M; Scotch Optical Lighting Film Typen 2300 und 2301 Technische Grundlagen
- /2/ 3M; Visible Mirror Film; 3M Product Description
- /3/ Aizenberg, J. B., Albert, D., Korjagin, O. G., Kravey, G. B., Radde, U.; Architektonisch-funktionelles Beleuchtungssystem bestehend aus einem Spaltlichtleiter für Fußgängerbrücken über die Moskauer Ringautobahn; Licht 98, Tagungsband
- /4/ 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
- /5/ Aizenberg, J. B., Aleshina, N. A., Pjatigorskij, V. M.; Slit Lightguides at the Serpukhovskaya Moscow Subway Station; Svetotekhnika, No. 1, pp. 11-12, 1986
- /6/ Aizenberg, J. B., Buchman, G. B., Pjatigorskij, V. M., Korobko, A. A.; Beleuchtungsanlagen mit Schlitzlichtleitern; Licht 7-8/ 1992
- /7/ Aizenberg, J. B., Bukhman, G. B., Korobko, A. A.; Effective Applications and Classification of Luminaires With Hollow Lightguides; Light & Engineering Vol. 4, No., 1996
- /8/ Aizenberg, J. B., Bukhman, G. B., Korobko, A. A., Pyatigorskij, V. M.; New Stage in the Development of Hollow Light Pipes; Light & Engineering Vol. 3, No 2, 1995
- /9/ 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, pp. 412-425, 1975
- /10/ Aizenberg, J. B., Bukhman, G. B., Pyatigorskij, V. M., Korobko, A. A.; Nontraditional Schemes of Interior Lighting Using Slit Guides; Publication CIE No. 71, pp 112-113, 1987
- /11/ Aizenberg, J. B., Korobko, A. A.; Hollow Light Guides Based On Prismatic Total-Internal-Reflektion Film (A Review); Light & Engineering Vol. 2, No. 2, pp. 14-20, 1994
- /12/ 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
- /13/ 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 2; Licht 10/97
- /14/ Ashdown, I.; Near Field Photometry: A New Approach; Journal of the IES, pp. 163-180, 1993
- /15/ Ashdown, I.; Near Field Photometry in Practice; IESNA, Annual Conference 1993, Houston, pp 413-425
- /16/ Ashdown, I.; Solving the Near-Field Problem; Lighting Magazine 6, pp 38-40, 1992
- /17/ Aydinli, S., Müller, T., Wolfgramm, F., Stolzenberg, K.; Berechnungsvergleiche von

- Beleuchtungsprogrammen; Tagungsband der 11. Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaften in Interlaken 1994
- /18/ Boyce, P. R.; Why Daylight?; International Daylighting Conference 1998
- /19/ Bredemeier, K., Poschmann, R., Schmidt, F., TechnoTeam; Nahfeldgoniophotometer – Systeme zur Messung der Lichtverteilung an Leuchten, Lampen und LED, Licht 2006
- /20/ CIBSE / Fischer, D; Analytische Approximation des Blendungsbewertungssystems nach Söllner; Lichttechnik 23, 1971, S. 395-398.
- /21/ CIE (Hrsg.); Discomfort Glare in Interior Lighting; CIE N°117-1995
- /22/ CIE-Publ. No.13.2; Verfahren zur Messung und Kennzeichnung der Farbwiedergabeeigenschaften von Lichtquellen; 1988, Commission International de l'Eclairage, Wien
- /23/ CIE-Publ. No. 29.2; Guide on Interior Lighting; 1986, Commission International de l'Eclairage, Wien
- /24/ CIE TC 3-30 Report; Hollow Light Guides Technical Publication; Draft for Final Review bz TC 3/30 Members, 1999; Commission International de l'Eclairage, Wien
- /25/ CO₂-Bilanz von Strom; <http://www.pro-physik.de/Phy/leadArticle.do?laid=8987>
- /26/ CO₂-Sequestrierung und Umweltschutz; [http://de.wikipedia.org/wiki/CO₂-Sequestrierung](http://de.wikipedia.org/wiki/CO2-Sequestrierung)
- /27/ Committee on Recommendation on quality and quantity of illumination of the IES (Hrsg); Outline of a standard procedure for computing Visual Comfort Rating for Interior Lighting. Illuminating Engineering 61, 1966, pp. 643
- /28/ Corpataux, M.; Aktive Tageslichtnutzung; Licht 94, Tagungsband der 11., Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaft in Interlaken 1994
- /29/ Crawford, D., Gould, C., Packer, M., Rubinstein, F., Siminovitch, M.; A Photometric and Energy Assessment of a Novel Lighting System, 3rd European Conference on Energy-Efficient Lighting
- /30/ Crawford, D., Gould, C., Packer, M., Rubinstein, F., Siminovitch, M.; An In-Situ Photometric and Energy Analysis of a Sulphur Lamp Lighting System; IESNA Annual Conference 1995, New York
- /31/ Deller C., Franklin, J., Smith, G.; Monte Carlo ray-tracing in paracticle-doped light guides; Lighting Research & Technology, Volume 38, Number 2, 2006
- /32/ DIN 18032; Hallen und Räume für Sport und Mehrzwecknutzung; 1989
- /33/ DIN 5032; Lichtmessung, Klasseneinteilung von Beleuchtungsstärke und Leuchtdichtemeßgeräten; 1982
- /34/ DIN 5033; Farbmessung; 1979
- /35/ DIN 5034; Tageslicht in Innenräumen; 1999
- /36/ DIN 5035; Beleuchtung mit künstlichen Licht; 1982
- /37/ DIN 5036; Strahlungsphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien; 1979
- /38/ DIN 5037; Lichttechnisch Bewertung von Scheinwerfern; 1992
- /39/ DIN 6169; Farbwiedergabe; 1976
- /40/ 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
- /41/ Duguay, M. A., Edgar, R. M.; Lighting With Sunlight Using Sun Tracking Concentrators, Applied Optics, Vol. 16 No. 5, 1977
- /42/ Edmonds, I., Moore, G., Smith, G., Swift, P.; Daylighting enhancement with light pipes coupled to laser-cut light-deflecting panels; Lighting Research & Technology, 1995, 27 pp. 27-35
- /43/ EGIS-GmbH; Heliostat, Offenbach / Main; <http://www.egis.org>
- /44/ Ehling, K.; Tageslichtsystem: Lichttechnische Bewertung und Wirtschaftlichkeit; Dissertation TU Berlin, 2000
- /45/ Ertekin, M.; Aufbau eines Heliostatsystems mit optischer Einkopplung in einen Hohllichtleiter, Diplomarbeit TU Berlin 1998
- /46/ Fiber Attenuation; <http://zone.ni.com/devzone/cda/ph/p/id/88>
- /47/ 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
- /48/ Fischbach, I., Riemann, M., Schmidt, F.; Zur Leistungsfähigkeit der Messung von Lichtstärkeverteilungskurven mittels bildauflösender Fotometrie; Licht 7-8, 1995 S 640- 645
- /49/ Florentine, F. A., Anderson, L., MacLennen, D., Whitehead, L. A.; Lighting High Bay Areas With Electrodeless Lampe; Journal of the Illuminating Engineering Society Vol. 26, No. 1, 1997
- /50/ Flüssigkeitslichtleiters; http://www.lot-riel.com/site/site_down/fo_liquidlight_dede8.-pdf
- /51/ Föhlich, W.; Neue Erfahrungen mit einem Autokollimationsphotometer in Verbindung mit einem Si-Photoelement; Licht 86, Lichttechnische Gemeinschaftstagung Baden, Tagungsband S. 330-340
- /52/ Föhlich, W., Schelzke, E.; Lichttechnische Meßmöglichkeiten mit einem Goniophotometer mit drehbarem Raster-Photometerkopf, Licht 11/1981
- /53/ Fresnel Optics GmbH; <http://www.fresnel-optics.de>
- /54/ Gramm, S., Aydinli, S., Kaase, H.; Auswertung von 2-jährige Sonnenstrahlung und Tageslichtdaten; Tageslicht 2009-1
- /55/ Guth S. K., Luckiesh M.; Brightness in the Visual Field at the Boarderline between Comfort and Discomfort (BCD). Illuminating Engineering 44, Nov. 1949, pp. 650
- /56/ Guth S. K.; A Method for the Evaluation of Discomfort Glare; Illuminating Engineering 58, May 1963, pp. 351
- /57/ Handbuch; RELUX Professional; 2007
- /58/ Handbook of Plastic Optics; Fraunhofer, http://www.uni-leipzig.de/~iom/muehlleithen/2005/kaless_2005.pdf
- /59/ Hentschel, H.-J.; Licht und Beleuchtung: Theorie und Praxis der Lichttechnik; 4. Auflage, Heidelberg: Huthig Buch Verlag, 1994.
- /60/ Hesse, J., Kaase, H., Tuneke, D.; Visualisierungsprogramme – Ein Vergleich der

- Berechnungsergebnisse mit in Versuchsräumen gemessenen Werten; Tagungsbericht, Licht 98, Bregenz 1998
- /61/ Hesse, J., Müller, T., Neyer, A., Stolzenberg, K.; Beleuchtungsplanungsprogramme – Ein Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den in Versuchsräumen gemessenen Werten; Licht 96, Tagungsband der 12. Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaft in Leipzig
- /62/ Heuer, U.; Entwicklung eines Tageslicht-Beleuchtungssystems mit Heliostat und mechanischer Ankopplung an Hohllichtleiter; Diplomarbeit TU Berlin, 2002
- /63/ Hopkinson R. G.; Evaluation of Glare; Illuminating Engineering 52, June 1957
- /64/ [Http://195.178.164.205/IAEEL/iaeel/news/1997/ett1997/LiTech_d_1_97.html](http://195.178.164.205/IAEEL/iaeel/news/1997/ett1997/LiTech_d_1_97.html)
- /65/ IAEEL; A Brief History of Light Guides; IAEEL Newsletter 1/97
- /66/ Kaase, H.; Aydinli, S.; Jakobiak, R.; u.A.; Bericht zum Forschungsprojekt "Tagelichtnutzung in Gebäuden"; BMBF Förderkennzeichen 29037B; 2000
- /67/ Kasse, H., Kloss, S.-H., Müller, T., Rosemann, A.; Arthelio – Intelligent and Energy Optimised Lighting Systems Based on the Combination of Daylight and Artificial Light; Innovation in Lighting, Venice, 2000
- /68/ 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
- /69/ Kaase, H., Kloss, S.-H., Müller, T., Rosemann, A., Serick, F.; Arthelio – Ein Großforschungsprojekt der Technischen Universität Berlin; Licht 3/2000
- /70/ Kandilli, C., Ulgen, K.; Review and Modeling the System of Transmission Concentrated Solar Energy via Optical Fiber; Renewable and Sustainable Energy Reviews 13, 2009
- /71/ Kiwull, N.; Evaluierung der Einbindung von LVK- Meßdaten ausgewählter Hohllichtleiter in Beleuchtungsplanungsprogramme; Diplomarbeit TU Berlin, 2001
- /72/ Kiwull, N.; Kombinierte Tages- und Kunstlichtsysteme - Neue Konzepte und Nutzerakzeptanz; Dissertation TU Berlin, 2008
- /73/ Kloss, S.-H.; Ein Goniophotometer zur Messung des Lichtstroms und der Lichtstärkeverteilung von hohlen Lichtleitern; Dissertation, TU Berlin 2001
- /74/ Kloss, S.-H., Kasse, H., Müller, T., Rosemann, A.; Goniophotometrie an Hohllichtleitern; Tagungsband OTTI – Sechstes Symposium Innovative Lichttechnik in Gebäuden, Kloster Banz, 2000
- /75/ Kloss, S.-H., Kasse, H., Müller, T., Rosemann, A.; Goniophotometrie an Hohllichtleitern; Licht 2000, Tagungsband der 14. Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaft in Goslar
- /76/ Kloss, S.-H., Müller, T., Rosemann, A., Kasse, H.; Photometrische Messungen an Hohllichtleitern; Tagungsband Workshop "Tageslichtnutzung in Gebäude", Berlin, 1999
- /77/ Korsch, A., Müller, S., Stöckli, W.; Heliostatenanwendung in der Beleuchtungstechnik, Licht 96, Tagungsband der 12. Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaft in Leipzig
- /78/ Lautzenheiser, T., Weller, G., Stannard, S.; Photometry for near field applications;

- Journal of the IES, January 1984, S.262-269
- /79/ LBM Lichtleit-Fasertechnik; Produktinformationen; 1999
- /80/ Lichtwellenleiter; <http://de.wikipedia.org/wiki/Lichtwellenleiter>
- /81/ LiTG; Das UGR – Verfahren zur Bewertung der Direktblendung der künstlichen Beleuchtung in Innenräumen; Publikation 20, 2003
- /82/ Littlefair, P.; Innovative daylighting systems; IP 22/89. Building Research Establishment
- /83/ Miloni, R. P.; Lichttransport mit Lichtleitern; Tagungsband OTTI - Fünftes Symposium Innovative Lichttechnik in Gebäuden, Kloster Banz, 1999, pp. 24-32
- /84/ Müller, T.; Evaluierung des UGR – Blendungsbewertungsverfahrens; Dissertation, TU Berlin, 1998
- /85/ Müller, T., Kaase, H.; ARTHELIO – Ein intelligentes und energie-optimiertes Beleuchtungssystem basierend auf der kombinierten Nutzung von Tageslicht und dem Kunstlicht der Schwefellampe; Licht 98, Tagungsband der 13. Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaft in Bregenz
- /86/ 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, pp. 34-40
- /87/ Müller, T., Kloss, S.-H., Rosemann, A., Kaase, H., Mingozi, A., Ejhed, J.; ARTHELIO - Zwei Hohllichtleiterbeleuchtungssysteme mit kombinierter Einspeisung von Tageslicht und Kunstlicht der Schwefellampe; Licht 2000, Tagungsband der 14. Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaft in Goslar
- /88/ Müller, T., Rosemann, A., Albert, D., Kloss, S.-H., Kaase, H., Mingozi, A., Ejhed, J.; ARTHELIO - Kombinierte Einspeisung von Tageslicht und Kunstlicht in Hohllichtleiterbeleuchtungssysteme; Licht 11/12 2000
- /89/ Müller, T., Rosemann, A., Kloss, S.-H., Kaase, H., Mingozi, A., Bottiglioni, R., Casalone, R., Ejhed, J., Rehm, G., Albert, D., Radde, U., Schmits, P.W.; Großdemonstrationsobjekte für Tageslichtlenkung - Zwei ARTHELIO – Prototyp- Installationen; Tagungsband OTTI- Siebente Symposium Innovative Lichttechnik in Gebäuden, Kloster Banz, 2001
- /90/ Nishimura, M.; New Lighting System For Expressways With Prism Light Guides; Light & Engineering, Vol. 5, No. 1, pp. 5-13, 1998
- /91/ Nusrat, A.; Entwurf und Modellaufbau eines Tageslichtsystems mit sonnenstandsnachgeführtem Heliostatensystem; Diplomarbeit TU Berlin, 2003
- /92/ Pearson, H.; Piping light with acrylic materials; Modern Plastics, 1946, pp. 123-127
- /93/ Rosemann, A.; Hohllichtleiter für Tageslichtnutzung; Dissertation TU Berlin, 2001
- /94/ Rosemann, A., Kiwull, N., Kloss, S.-H., Müller, T., Kaase, H.; Innenraumbeleuchtung mit Hohllichtleitern; Licht 2000, Tagungsband der 14. Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaft in Goslar
- /95/ Rosemann, A., Kloss, S.-H., Müller, T., Kaase, H.; Hohllichtleiter mit kombinierter Tages- und Kunstlichteinkopplung - Demonstrationsanlage an der TU Berlin; Tagungs-

- band OTTI - Sechstes Symposium Innovative Lichttechnik in Gebäuden, Kloster Banz, 2000
- /96/ Rosemann, A., Sit, A., Aydinli, S., Kaase, H.; Messung zur lichttechnischen Bewertung Von Tageslichtsystem; Tagungsband OTTI - Sechstes Symposium Innovative Lichttechnik in Gebäuden, Kloster Banz, 2000
- /97/ Saxe, S. G., Whitehead L. A., Cobb S.; Progress in the development of prism light guides; SPIE, Vol. 692, Materials and Optic for Solar Energy Conversion and Advanced Lighting Technology, pp. 235/240, 1986
- /98/ Schauerte, B., Polle, D., Rausch S.; Verlässlichkeit von Lichtberechnungsprogrammen bei komplexen möblierten Räumen; Tagungsbericht, Licht 98
- /99/ Schmits, P. W.; Fußgängerbrücke über den Moskauer Autobahnring; Licht 10/98
- /100/ Senkel, H.; Architectural Lighting Installations With Long Hollow Light Guides; Light & Engineering, Vol. 8, No. 3, pp. 29-33, 2000
- /101/ Siminovitch, M. J.; Centralized Lighting System for Office Interiors; Lawrence Berkeley National Laboratory
- /102/ Schroeder, C.; Systematische Messfehler in der Photometrie; dargestellt an Praxisbeispielen mit Luxmetern und UV-Radiometern; Licht 2006
- /103/ Söllner, G.; Bemerkungen zu einigen Verfahren der Blendungsbewertung; Lichttechnik Nr. 10/1968
- /104/ Söllner G.; Einfaches System zur Blendungsbewertung; Lichttechnik 5, 1965, S. 59A-66A.
- /105/ Stockmar, A.; EULUMDAT – Ein Leuchtendatenformat für den europäischen Beleuchtungsplaner; Tagungsbericht, Licht 90
- /106/ Stockmar, A.; Vergleich gemessener und berechneter Beleuchtungsstärkeverteilung von Direkt- und Indirektbeleuchtungssystemen im Innenraum; Tagungsbericht, Licht 90
- /107/ Sutton S., Australian Patent # 586.359, 1986
- /108/ Sutton S., USA Patent # 5 099 622, 1992
- /109/ Swift, P., Smith, G.; Cylindrical mirror light pipes., Solar Energy Materials and Solar Cells, 1995 36, pp 159-168
- /110/ TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH; Benutzerhandbuch Goniofotometer RiGO 601; 1999
- /111/ TracePro; Optiksoftware; <http://www.linos.com/pages/home/shop-optik/optiksoftware/trace-pro/general-information>
- /112/ TracePro Tutorial; Integrating Sphere; Lambda Research Corporation, 2007
- /113/ TracePro Tutorial; Lightpipe; Lambda Research Corporation, 2007
- /114/ TracePro Tutorial; Light Pipe Example; Lambda Research Corporation, 2001
- /115/ TracePro Tutorial; Raytrace and Analysis; Lambda Research Corporation, 2008
- /116/ TracePro Tutorial; Simulation of Lighting Systems; Lambda Research Corporation, 1999
- /117/ TracePro Tutorial; Stray Light Simulation; Lambda Research Corporation, 1999
- /118/ TracePro Tutorial; Tissue Optics; Lambda Research Corporation, 2007

- /119/ TracePro Tutorial; Textured Red Tile Backlight; Lambda Research Corporation, 2007
- /120/ User Manual; Bildauflösendes Leuchtdichtemeßgerät LMK 96; Techno Team Bildverarbeitung GmbH
- /121/ User Manual; Tracepro, Lambda Research Corporation; 2007
- /122/ User Manual; pdiff-Meßgerät; Lichtmeßtechnik Berlin LMT
- /123/ Venturi, L., Wilson M., Jacobs A., Solomon, J.; Light Piping Performance Enhancement Using a Deflecting Sheet Lighting Research & Technology, Volume 38, Number 2, 2006
- /124/ Weber, M. F., Stover, C. A., Gilbert, L. R., Nevitt, T. J., Ouderkirk, A. J.; Giant Birefringent Optics in Multilayer Polymer Mirrors; Science, Vol. 287, 2000
- /125/ Whitehead, L. A.; Illumination of a hazardous area with piped light; Lighting Design & Application / October 1982
- /126/ Whitehead, L. A.; New Simplified Design Procedures for Prism Light Guide Luminaires; Journal of the Illuminating Society, Summer 1998
- /127/ Whitehead, L. A.; Overview of Hollow Light Guide Technology and Application; International Daylighting Conference, 1998
- /128/ Whitehead, L. A.; Simplified Ray Tracing in Cylindrical Systems; Applied Optics, Vol. 21, No. 19, 1982
- /129/ Whitehead, L. A., Hoffmann, K.; Method for Estimating the Efficiency of Prism Light Guide Luminaires; Journal of the Illuminating Engineering Society, Summer 1998
- /130/ Whitehead, L., Kan, P., Lui, K.; Improved Extractor Design for Modular Light Guides; Journal of the Illuminating Engineering Society, Summer 1999
- /131/ 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,
- /132/ Whitehead, L., Scott, J. E., Lee, B., York, B.; Large-Scale Core Daylighting by Means of a Light Pipe; International Daylight Conference- Proceeding I, 1986
- /133/ World Intellectual Property Organization; International Application Published Under The Patent Cooperation Treaty (PCT), 2004
- /134/ Zastrow, A., Wittwer, V.; Proceedings of the Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, 1986: 692, 227

Fragebogen zur Blendungsuntersuchung

Willkommen

im Spezialversuchsraum des FG Lichttechnik der Technischen Universität Berlin. Stellen Sie sich vor, dass sich im Versuchsraum Ihr Arbeitsplatz befindet, an dem Sie konzentriert arbeiten müssen.

Um eine Lichtsituation zu beurteilen, können Sie sich zunächst frei im Raum bewegen, hinsetzen und umschaun. Vermeiden Sie aber den Blick direkt in die Leuchten. Danach setzen Sie sich an eine der festgelegten Sitzpositionen und schauen Sie auf das gegenüberliegende Bild bzw. Zeichen. Bitte bewerten Sie an dieser Position die ‚Störwirkung durch helle Leuchten‘. Bitte wiederholen Sie diesen Vorgang für die anderen Positionen.

- POS. 1**
Störwirkung durch helle Leuchte
- ☐ 0 - nicht vorhanden
 - ☐ 1 – zwischen nicht vorhanden und merkbar
 - ☐ 2 – merkbar
 - ☐ 3 – zwischen merkbar und störend
 - ☐ 4 – störend
 - ☐ 5 – zwischen störend und unzumutbar
 - ☐ 6 – unzumutbar

- POS. 2**
Störwirkung durch helle Leuchte
- ☐ 0 - nicht vorhanden
 - ☐ 1 – zwischen nicht vorhanden und merkbar
 - ☐ 2 – merkbar
 - ☐ 3 – zwischen merkbar und störend
 - ☐ 4 – störend
 - ☐ 5 – zwischen störend und unzumutbar
 - ☐ 6 – unzumutbar

- POS. 3**
Störwirkung durch helle Leuchte
- ☐ 0 - nicht vorhanden
 - ☐ 1 – zwischen nicht vorhanden und merkbar
 - ☐ 2 – merkbar
 - ☐ 3 – zwischen merkbar und störend
 - ☐ 4 – störend
 - ☐ 5 – zwischen störend und unzumutbar
 - ☐ 6 – unzumutbar

- POS. 4**
Störwirkung durch helle Leuchte
- ☐ 0 - nicht vorhanden
 - ☐ 1 – zwischen nicht vorhanden und merkbar
 - ☐ 2 – merkbar
 - ☐ 3 – zwischen merkbar und störend
 - ☐ 4 – störend
 - ☐ 5 – zwischen störend und unzumutbar
 - ☐ 6 – unzumutbar

Es gibt keine falschen Urteile.
Vielen Dank für Ihre Unterstützung !!!