



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# Bachelorthesis

Odin Marius Reiter

Physiologische Blendung von Innenraumleuchten  
- Implementierung und Anwendung des  
Unified Glare Ratings

Odin Marius Reiter  
Physiologische Blendung von Innenraumleuchten -  
Implementierung und Anwendung des  
Unified Glare Ratings

Bachelorthesis eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung  
im Studiengang Informations- und Elektrotechnik  
am Department Informations- und Elektrotechnik  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. rer. nat. Peter Möller  
Zweitgutachter: Dr. Claudius Noack

Abgegeben am 15. Oktober 2018

**Odin Marius Reiter**

**Thema der Bachelorthesis**

Physiologische Blendung von Innenraumleuchten - Implementierung und Anwendung des Unified Glare Ratings

**Stichworte**

Blendung, Blendbewertung, Unified Glare Rating, UGR, Arbeitsschutz, Beleuchtung, Licht, Lichtberechnung, LDT, EULUMDAT, MATLAB

**Kurzzusammenfassung**

Die Blendung von Innenraumleuchten kann in unterschiedlichen Tätigkeitsbereichen schwere Folgen haben. Dieses Dokument beschäftigt sich mit der Entstehung und den Auswirkungen von physiologischer und psychologischer Blendung. Weiterhin wird das Unified Glare Rating, ein Verfahren für die psychologische Blendbewertung, vorgestellt, implementiert und angewendet.

**Odin Marius Reiter**

**Title of the paper**

Physiological glare of interior lights - Implementation and Application of the Unified Glare Rating

**Keywords**

glare, glare rating, Unified Glare Rating, UGR, industrial safety, lighting, light, light calculation, LDT, EULUMDAT, MATLAB

**Abstract**

The glare of interior lights can cause serious consequences in various working areas. This document describes the emergence and consequences of physiological and psychological glare. Furthermore, the Unified Glare Rating, a method for the evaluation of psychological glare, will be presented, implemented and applied.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Blendung - Allgemeiner Hintergrund zur Blendungsbewertung</b>	<b>7</b>
2.1	Blendungsarten	7
2.1.1	Physiologische Blendung	8
2.1.2	Psychologische Blendung	9
2.1.3	Allgemeine physiologische und psychologische Blendbewertung	10
2.2	Die Blendbewertung - Geschichtlicher Hintergrund	11
2.2.1	Die Blendbewertung nach 1920	11
2.2.2	Die Blendbewertung nach 1945	12
2.2.3	Das Glare Index Verfahren	13
2.2.4	Das VCP - Verfahren	14
2.2.5	Die CGI - Blendungsformel	15
<b>3</b>	<b>Das Unified Glare Rating - Allgemeine Informationen zum Blendbewertungsstandard</b>	<b>16</b>
3.1	Aufbau der UGR - Formel	16
3.1.1	Korrekturwertberechnung	19
3.1.2	Blendungsbeurteilung	20
3.2	Anwendungen der UGR - Formel	22
3.2.1	Blendbewertung für einen spezifischen Raum	22
3.2.2	Das UGR - Tabellenverfahren	23
3.2.3	Das UGR - Grenzkurvenverfahren	26
3.3	Begrenzungen des UGR - Verfahrens	27
3.4	Fehlende Eigenschaften der Blendbewertung	28
<b>4</b>	<b>Implementierung des Unified Glare Ratings</b>	<b>29</b>
4.1	Implementierungsspezifikation	29
4.2	Implementierungsstrukturierung	30
4.3	Bestimmung der spezifischen Leuchtenwerte	32
4.3.1	Exkurs - Erstellung der Licht-Verteilungs-Kurven von Leuchten	32
4.3.2	Aufbau und Interpretation von EULUMDAT - Dateien	34
4.3.3	Einlesen von EULUMDAT - Dateien	37
4.3.4	Verifizierung und Korrektur der eingelesenen EULUMDAT - Dateien	38
4.3.5	Bestimmung von Partiallichtströmen und Betriebswirkungsgrade der Leuchte	40
4.4	Positionierung von Leuchten und Beobachter im Standardraum	43

4.5	Bestimmung der Direktblendung . . . . .	44
4.5.1	Berechnung der Distanz zwischen Beobachter und Leuchte und des Sichtwinkels . . . . .	44
4.5.2	Berechnung der sichtbaren Leuchtfäche . . . . .	46
4.5.3	Bestimmung des Positionsindex nach Guth . . . . .	48
4.5.4	Bestimmung der Lichtstärke von Leuchten zum Beobachter . . . . .	49
4.6	Bestimmung der Hintergrundleuchtdichte . . . . .	50
4.6.1	Berechnung des Direkt-Lichtstromanteil zur Nutzoberfläche . . . . .	51
4.6.2	Berechnung der Interreflexionwirkungsgrade . . . . .	53
4.6.3	Bestimmung des Raumwirkungsgrades und der Hintergrundleuchtdichte . . . . .	54
4.7	Bestimmung des UGR - Wertes und der UGR - Tabelle . . . . .	55
<b>5</b>	<b>Optimierung und Verifizierung der Implementation</b>	<b>56</b>
5.1	Optimierung der Implementierung . . . . .	56
5.2	Verifizierung der Implementierung . . . . .	57
5.2.1	Vergleich der Beispieldaten der verwendeten Normen . . . . .	58
5.2.2	Vergleich der LDT - Dateien von direkt strahlenden Leuchten . . . . .	60
5.2.3	Vergleich der LDT - Dateien von direkt/indirekt strahlenden Leuchten . . . . .	61
5.3	Diskussion der vorgestellten Ergebnisse und Beanstandung am UGR - Verfahren	62
5.3.1	Berechnung der Hintergrundleuchtdichte verschiedener Normen . . . . .	62
5.3.2	Bestimmung der UGR - Klasse des Referenzraumes . . . . .	64
5.3.3	Angaben der Leuchtendaten in LDT - Dateien . . . . .	65
5.3.4	Zusammenfassung der Kritikpunkte und Empfehlung für eine Verbesserung des UGR - Blendbewertungssystems . . . . .	66
<b>6</b>	<b>Anwendung des Unified Glare Ratings</b>	<b>68</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>71</b>
<b>8</b>	<b>Danksagung</b>	<b>72</b>
<b>9</b>	<b>Anhang</b>	<b>74</b>
9.1	Pseudocode für das Einlesen von LDT - Dateien . . . . .	74
9.2	Berechnung der Leuchtenpositionen . . . . .	75
9.3	Berechnung der Direktblendung . . . . .	76
9.4	Berechnungen für die Hintergrundleuchtdichte . . . . .	79
9.5	Berechnung des UGR Wertes für die UGR - Tabelle . . . . .	85
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>86</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>86</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>87</b>

# 1 Einleitung

Von „wahrnehmbar“ über „unangenehm“ oder „störend“ bis hin zu „unerträglich“ werden die Einflüsse der Blendung von betroffenen Personen beschrieben. Diese Blendung kann in unterschiedlichen, alltäglichen Situationen entstehen und kann je nach Tätigkeitsbereich schwerwiegende Folgen für die geblendete Person besitzen.

Eines der prägnantesten Beispiele ist der Blick in einen grellen Scheinwerfer im Straßenverkehr während einer Nachtfahrt. Die Auswirkungen dieser Blendung können von einer kurzzeitigen oder vorübergehenden Trübung des Sehvermögens bis hin zu dauerhaften Schäden des Auges reichen. Auch können weitere Folgeschäden entstehen, die, je nach Tätigkeit, weitaus größere gesundheitliche Folgen beinhalten.

Dieses Dokument beschäftigt sich näher mit dem Thema Blendung. Dabei soll die Entstehung und die Auswirkungen der Blendungsarten der physiologischen und psychologischen Blendung näher beschrieben und erläutert werden. Um die psychologische Blendung bestimmen und somit auch vermeidbar zu machen, wurden verschiedene Verfahren für eine Blendbewertung entwickelt, dessen Historie hier festgehalten wird.

Das wohl bedeutendste Blendbewertungsverfahren, das Unified Glare Rating, wird in dieser Arbeit ausführlich behandelt, implementiert und untersucht werden. Weiterhin wurden einige negative Aspekte innerhalb dieses Verfahrens entdeckt, die in diesem Dokument erörtert und festgehalten werden. Mit der Simulation von Innenraumleuchten soll dieses Verfahren zur Bewertung der psychologischen Blendung angewendet werden.

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist:

- das Thema Blendung theoretisch zu untersuchen
- die Geschichte der Blendbewertungsverfahren zu recherchieren
- das Blendbewertungssystem des Unified Glare Ratings theoretisch zu ergründen
- die Implementierung des Unified Glare Ratings nach Vorgaben von Normungen
- die Anwendung der Implementierung dieses Blendbewertungsverfahrens

Zu diesem Dokument gehört eine Anhangs-CD, auf der die Implementierung des Unified Glare Ratings sowie einige der genutzten Quellen und Bilder dieses Dokumentes gespeichert wurden. Diese CD kann bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. Peter Möller eingesehen werden, der zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieses Dokumentes als Professor in der Hochschule für angewandte Wissenschaften in Hamburg tätig ist.

## 2 Blendung - Allgemeiner Hintergrund zur Blendungsbewertung

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den Ursachen von Blendung und dessen Auswirkungen und soll als Motivation für die Implementierung des Unified Glare Ratings dienen.

Weiterhin wird auf den geschichtlichen Hintergrund der unterschiedlichen Blendbewertungsverfahren eingegangen werden, die für die Entwicklung und die Einführung des Unified Glare Ratings beigetragen haben.

### 2.1 Blendungsarten

Allgemein ist Blendung definiert als eine visuelle oder optische Störung, die durch zu hohe Leuchtdichten im Gesichtsfeld ausgelöst werden.<sup>1</sup>

Die Rezeptoren des Auges werden durch den Einfall von zu vielen Lichtphotonen in zu kurzer Zeit übersättigt. Dieser überhöhte Photonen-einfall kann direkt durch Lichtquellen oder über reflektierende Objekte und Oberflächen erfolgen. Somit wird zwischen Direktblendung und Reflexblendung unterschieden.

Tritt die Übersättigung in einem kleinen Bereich des Gesichtsfeldes auf, spricht man von einer lokalen Blendung, die zumeist durch Differenzen der Leuchtdichten im Umfeld auftreten. Im Gegensatz beschreibt die totale Blendung eine Störung durch einen hohen Lichteinfall im gesamten Gesichtsfeld.<sup>1</sup>

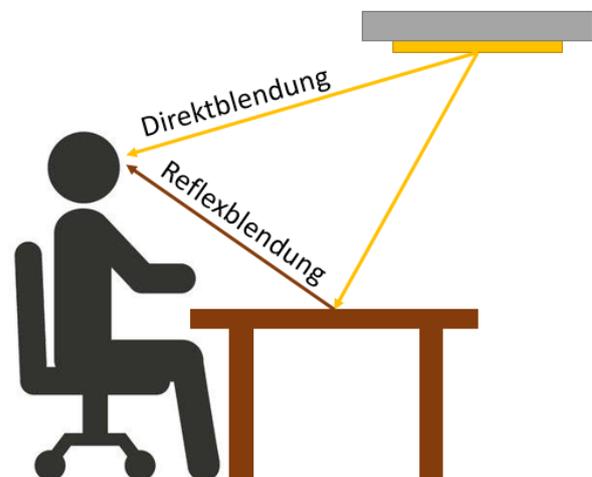


Abbildung 2.1: Beispielhafte Unterscheidung der Direkt- und Reflexblendung

Die Wirkung dieser Blendungen kann zwei unterschiedliche Auswirkungen hervorrufen. Hierbei wird zwischen der physiologischen und psychologischen Blendung unterschieden. Beide Blendwirkungen können getrennt beziehungsweise gemeinsam auftreten.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>vgl. Wikipedia, *Blendung (Überbelichtung)*

<sup>2</sup>vgl. LiTG, *Das UGR - Verfahren zur Bewertung der Direktblendung der künstlichen Beleuchtung in Innenräumen*, S. 7.

### 2.1.1 Physiologische Blendung

Die physiologische Blendung beschreibt die unmittelbare, messbare Beeinträchtigung des Sehvermögens.

Die erzeugte Störung kann eine Verringerung der Sehschärfe, der Form- bzw. Objekterkennung sowie der Tiefenwahrnehmung und der Wahrnehmungsgeschwindigkeit verursachen.

Diese Blendungsart wird durch die Streuung der empfangenen Leuchtdichte im Auge hervorgerufen, die durch die physikalischen Brechungs- und Reflexionseigenschaften von einzelnen Augenteilen wie der Hornhaut, Linse und Glaskörper aber auch von Brillen, Linsen, oder Scheiben entstehen können.<sup>3</sup> Die Schleierleuchtdichte, welche mit der Streuung des Lichtes im Auge erzeugt wird und als optischer Eindruck wahrgenommen werden kann, wirkt gegen die Adaptionsleuchtdichte des Auges, welche somit zu einer Herabsetzung des Sehvermögens führt. Wird die Streuwirkung erhöht, verschlechtert sich die Objekterkennung, besonders von kontrastarmen Formen. Für die Bewertung der physiologischen Blendung ist somit diese Schleierleuchtdichte ausschlaggebend.<sup>4</sup>

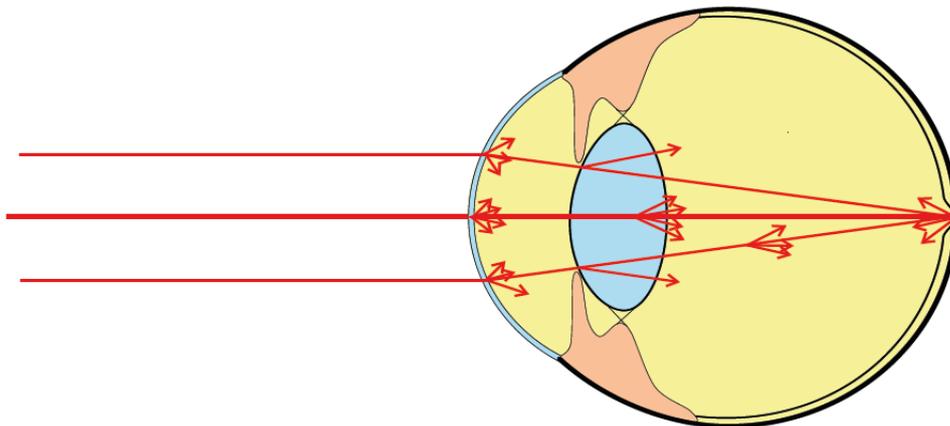


Abbildung 2.2: Streuung des einfallenden Lichtes im Auge<sup>5</sup>

Ein typisches Beispiel für das Auftreten der physiologischen Blendung sind Nachtfahrten im Straßenverkehr. In der Innenbeleuchtung kann diese Blendungsart weiterhin durch Sonneneinstrahlungen oder durch zu hohe Leuchtdichten von den installierten Lichtquellen entstehen, die direktstrahlend oder durch reflektierte Oberflächen auf das Auge einwirken.

Gegenmaßnahmen wären hierbei die Abschirmung von Fenstern und Leuchten sowie die Minimierung von reflektierenden Oberflächen.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup>vgl. IFA, *Blendung - Theoretischer Hintergrund*, S. 3 – 5.

<sup>4</sup>vgl. LiTG, *Das UGR - Verfahren zur Bewertung der Direktblendung der künstlichen Beleuchtung in Innenräumen*, S. 3.

<sup>5</sup>Universitätsverlag Ilmenau, *Blendungsbewertung von LED-Leuchten in Innenräumen*

### 2.1.2 Psychologische Blendung

Die psychologische Blendung beschreibt eine subjektiv betrachtete Störung der Innenraumbeleuchtung, die nicht messtechnisch nachweisbar ist.

Diese Störung tritt erst nach längerem Aufenthalt in einem Raum auf und je nach Empfinden der jeweiligen Person, wird das Wohlbefinden sowie die Konzentrationsfähigkeit und die Arbeitsleistung eingeschränkt. Weiterhin führt diese Blendungsart zu einer vorzeitigen Ermüdung, jedoch bleibt die Sehfähigkeit vollkommen erhalten.

Diese Beeinträchtigungen werden durch die ungewollte und regelmäßige Ablenkung der Blickrichtung auf die Lichtquelle erzeugt. Durch den Leuchtdichtenunterschied ist eine ständige Adaption des Auges notwendig. Die Wirkung der psychologischen Blendung verstärkt sich bei hohen Anforderung der Sehaufgabe.<sup>6</sup>

Somit ist die Begrenzung dieser Blendungsart am Arbeitsplatz von großer Bedeutung. Durch die Verringerung des Kontrastes zwischen der Lichtquelle und dem Umgebungslichtes durch die Reduzierung der Quellenleuchtdichte oder Erhöhung der Hintergrundleuchtdichte kann die psychologische Blendung reduziert werden. Weiterhin wird durch das Entfernen von Lichtquellen aus dem Sichtbereich des Beobachters eine Verbesserung erzielt.<sup>6</sup>

Eine einheitliche Blendungsbewertung ist jedoch nicht möglich, da die Leuchtenabmessungen von kleinen Strahlern bis zu großen Leuchten variiert werden kann und dies die Bedingungen der Bewertung ändert. Somit muss zwischen den Leuchtengrößen unterschieden oder diese in der Bewertung berücksichtigt werden.<sup>7</sup>

---

<sup>6</sup>vgl. IFA, *Blendung - Theoretischer Hintergrund*, S. 5.

<sup>7</sup>vgl. LiTG, *Das UGR - Verfahren zur Bewertung der Direktblendung der künstlichen Beleuchtung in Innenräumen*, S. 8 – 9.

### 2.1.3 Allgemeine physiologische und psychologische Blendbewertung

Die Blendbewertung einer Innenraumleuchte gestaltet sich als eine komplexe Aufgabe, da die Blendung physiologisch und bzw. oder psychologisch auftreten kann.

Aus den vorigen Kapiteln zusammengefasst können die nachfolgenden Effekte bei einer Blendung hervorgerufen werden:<sup>8</sup>

- Die Blendung ist physiologisch und bewirkt eine Einschränkung des Sehvermögens
- Die Blendung ist psychologisch und bewirkt Aufmerksamkeitsschwankungen oder erzeugt Unbehagen der jeweiligen Person

Die Blendbewertung der physiologischen Blendung bewertet die Helligkeit der Blendquelle und des Sehobjektes sowie den Winkel von Blendquelle und Objekt. Je stärker die Blendquelle, je dunkler das Sehobjekt und je kleiner der Winkel zwischen diesen ist, desto stärker wirkt sich dies auf das Sehvermögen aus.

Des Weiteren bewirkt die Schleierleuchtdichte, die im Auge des Beobachters entsteht, eine Reduzierung des Kontrastes, sodass das Sehobjekt schlechter wahrgenommen werden kann.

Als Maß der physiologischen Blendung kann der Blendungsgrad dienen, der sich mit den Kontrastempfindlichkeiten mit und ohne Blendung bestimmen lässt<sup>8</sup>:

$$n_{BI} = \frac{K_{BI}}{K_0} \quad \text{mit : } K_{BI} \text{ Kontrastempfindlichkeit mit Blendung}$$

$K_0$  Kontrastempfindlichkeit ohne Blendung  
 $n_{BI}$  Blendungsgrad

Sofern eine physiologische Blendung bei einem Beobachter auftritt, kann allgemein davon ausgegangen werden, dass dieser auch psychologisch geblendet wird.

Die Bewertung der psychologischen Blendung kann nicht vollständig verallgemeinert werden, da diese rein subjektiv ist und je nach betroffener Person unterschiedlich wahrgenommen wird. Somit erhalten Personen mit einem geschwächten oder eingeschränkten Sehvermögen unter anderem einen anderen Eindruck der psychologischen Blendung als gesunde Menschen, da diese Bewertung von der erlebten Helligkeit abhängig ist.

Die erlebte Helligkeit eines Beobachters ist quantitativ nicht messbar, sodass keine allgemeine Berechnung erstellt werden kann. Somit wird für jede Bewertungsmethode der psychologischen Blendung eine Blendungszahl definiert, die mit einer Empfindungsbewertung zwischen „nicht merkbar“ bis hin zu „unerträglich“ gekoppelt ist. Weiterhin wird je nach Verfahren eine statistische Wahrscheinlichkeit der nicht gestörten Beobachtern angegeben.

Weitere Faktoren der psychologischen Blendbewertung sind die Blendleuchtdichte, dem Raumwinkel der jeweiligen Lichtquellen zum Beobachter, der Umfeldadaptionsleuchtdichte sowie dem Positionsindex von der Leuchte zum Beobachter.<sup>8</sup>

In den weiteren Abschnitten werden die Blendbewertungsverfahren für die psychologische Blendung vorgestellt, da diese Blendungsart häufiger in Innenräumen auftritt und als Bewertungsverfahren kritischere Kriterien besitzt, als die physiologische Blendung.

---

<sup>8</sup>vgl. IFA, *Blendung - Theoretischer Hintergrund*, S. 8 – 9.

## 2.2 Die Blendbewertung - Geschichtlicher Hintergrund

In diesem Abschnitt soll die geschichtliche Entwicklung der Blendungsbewertung kurz zusammengefasst werden, um einen kleinen Einblick über die Forschung der psychologischen Blendungsbewertung und dessen Berechnungsverfahren zu erhalten.

### 2.2.1 Die Blendbewertung nach 1920

Die Forschung der Blendungsbewertung wurde durch *L.L.Holladay* mit seiner Veröffentlichung der Arbeit über die physiologische Blendung im Jahre 1926 begonnen. In dieser Forschungsarbeit berichtet er über die Herabsetzung des Unterscheidungsempfinden durch die im Auge entstehende Schleierleuchtdichte. Weiterhin hat *Holladay* eine Berechnung für die äquivalente Schleierleuchtdichte, die in Näherung im Auge erzeugt wird.<sup>9</sup>

$$L_{\text{Säq}} = k \cdot \frac{E}{\Theta^2} \quad \text{für } 2^\circ < \Theta < 60^\circ$$

Mit:

$L_{\text{Säq}}$	äquivalente Schleierleuchtdichte [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]
$E$	Beleuchtungsstärke in der Pupillenebene des Auges [ $\text{lx}$ ]
$\Theta$	Winkel zwischen Blickrichtung und Blendquelle [ $^\circ$ ]
$k$	altersabhängige Konstante

Zu diesem Zeitpunkt wurde dieser Forschung allerdings nicht viel Beachtung geschenkt, da die meisten Leuchtquellen klein waren und keinen hohen Lichtstrom abgegeben haben. Zudem war es üblich, die Leuchtquellen wie die Glühlampe mit Reflektoren oder Diffusoren abzuschirmen. Somit konnten keine nennenswerten Beeinträchtigungen erzeugt werden.<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup>vgl. LiTG, *Das UGR - Verfahren zur Bewertung der Direktblendung der künstlichen Beleuchtung in Innenräumen*, S. 11–13.

## 2.2.2 Die Blendbewertung nach 1945

Mit der Einführung der Leuchtstofflampe wurden die Untersuchungen der psychologischen Blendung stark vorangetrieben, da diese Lichtquelle sich mit ihrer größeren Abmessung, der höheren Lichtausbeute und den unterschiedlichen Lichtfarben und Farbwiedergabeeigenschaften stark von der Glühlampe unterscheidet. Somit musste für diese neue Lichtquelle eine neue Bewertungsmethode gefunden werden, die in unterschiedlichen Forschungsgruppen mehrerer Länder vorgenommen wurde.

Als Ergebnis dieser Forschung ging hervor, dass der Blendungsgrad der psychologischen Blendung sich durch vier Funktionseigenschaften beschreiben lassen könnte:<sup>10</sup>

$$G = \frac{L_S^{(m)} \cdot \Omega^{(n)}}{L_b \cdot P^{(m)}}$$

Mit:

$G$	Blendungsgrad
$L_S$	Leuchtdichte der Lichtquelle [ $cd/m^2$ ]
$L_b$	Hintergrundleuchtdichte [ $cd/m^2$ ]
$\Omega$	Raumwinkel zwischen Beobachter und Leuchte [ $sr$ ]
$P$	Positionsindex der Leuchte zum Beobachter nach Guth
$(m), (n)$	Exponenten der Blendungsberechnung

Die Werte der Exponenten wurden von den jeweiligen Forschungsgruppen unterschiedlich festgelegt. Dies ist auf die jeweiligen Untersuchungsbedingungen zurückzuführen. Von einigen der bekannteren Autoren sind diese Exponentenwerte bekannt, die in der nachfolgenden Tabelle zu sehen sind:<sup>10</sup>

Autor	m	n
<b>Vermeulen</b> und <b>de Boer</b> (1948)	1,7	0,5
<b>Luckiesh</b> und <b>Guth</b> (1949)	2,3	0,8
<b>Petherbridge</b> und <b>Hopkinson</b> (1950)	1,6	0,8
<b>Arnde, Bodmann</b> und <b>Muck</b> (1959)	1,5	0,5

Tabelle 2.1: Exponenten für die Berechnung des Blendungsgrads<sup>10</sup>

Aus dieser Berechnung konnte die Blendwirkung einer einzelnen Leuchte in Abhängigkeit der Position des Beobachters bestimmt werden. Da es zu dieser Zeit schon üblich war, in größeren Büroräumen mehrere Leuchten zu installieren, mussten neue Verfahren für die Bewertung von Raumbelichtungen mit mehreren Leuchten gefunden werden.

In den folgenden Jahren sind mehrere Verfahren entstanden, die mit unterschiedlichen Berechnungen und Bedingungen arbeiten, um die psychologische Blendung zu bestimmen.

<sup>10</sup>vgl. LiTG, *Das UGR - Verfahren zur Bewertung der Direktblendung der künstlichen Beleuchtung in Innenräumen*, S. 12 – 13.

### 2.2.3 Das Glare Index Verfahren

Das Glare Index Verfahren beruht auf der Berechnung des Blendungsgrades, die für jede Leuchte im Berechnungsraum durchgeführt wird (siehe Formel ??) und wurde speziell in Großbritannien eingesetzt.

Durch eine einfache Summierung werden alle Ergebnisse zusammengeführt. Um auf einfache Blendungsergebnisse zu kommen, wird der Logarithmus mit geeigneten Konstanten für dieses Verfahren gewählt.

Somit wird für die Berechnung des Glare Indexes folgende Formel verwendet:<sup>11</sup>

$$GI = 10 \cdot \log_{10} \cdot \left[ 0.45 \cdot \sum \frac{L_S^{1.6} \cdot \Omega^{0.8}}{L_b \cdot P^{1.6}} \right]$$

Mit:

$GI$	Glare Index des Berechnungsraum
$L_S$	mittlere Leuchtdichte der einzelnen Lichtquelle [ $cd/m^2$ ]
$L_b$	Hintergrundleuchtdichte [ $cd/m^2$ ]
$\Omega$	Raumwinkel zwischen Beobachter und der einzelnen Leuchte [ $sr$ ]
$P$	Positionsindex der einzelnen Leuchte zum Beobachter nach Guth

Für die Bestimmung der Blendwirkung einer Leuchte werden nun folgende Standardbedingungen gesetzt:<sup>11</sup>

- Berechnung von 19 Standardräumen
- Gleichmäßige Leuchtenhöhe H über dem Beobachterauge
- Gleichmäßige Verteilung der Leuchten an der Decke:  $s/H = 1$   
mit  $s$  = Abstand der Leuchten untereinander
- Fünf verschiedene Reflexionskombinationen von Decke, Wände und Boden
- Beobachterposition in der Wandmitte
- Blickrichtung zu den Leuchten jeweils längs und quer
- Normierung der Glare-Index Werte auf einen Lichtstrom von 1000 lm

Für eine übersichtliche Ergebnisansicht sollen diese in einer Standardtabelle festgehalten werden. Die Blendungsrichtwerte des Glare Indexes wurden durch Erfahrungswerten aus realen Beleuchtungsanlagen bestimmt. Hierbei wird eine Leuchte mit einem Glare Index zwischen 16 und 28 als gut empfunden.

Ein Nachteil dieser Berechnung ist die Bewertung von großen Leuchten, da die Grundformel keine Unterteilung der Leuchtenfläche vorsieht, da der Raumwinkel mit dem gewählten Exponenten verschoben wird.<sup>11</sup>

---

<sup>11</sup>vgl. LiTG, *Das UGR - Verfahren zur Bewertung der Direktblendung der künstlichen Beleuchtung in Innenräumen*, S. 14 – 15.

### 2.2.4 Das VCP - Verfahren

In dem Visual-Comfort-Probability - Verfahren (abk. VCP) wird anders zu dem Glare Index Verfahren die Blendung nicht einkategorisiert. Stattdessen wird hier die prozentuale Wahrscheinlichkeit der Beobachter ermittelt, die die Blendung der Beleuchtungsanlage als "nicht störend" einstuft. Dieses Verfahren wurde in Nordamerika für die Bewertung von Beleuchtungsanlagen und Leuchten eingesetzt.<sup>12</sup>

Da dieses Verfahren keine Basisformel besitzt, wird auf die Berechnung der VCP - Werte nicht weiter eingegangen. Nähere Informationen können in der LiTG - Publikation 20 "Das UGR - Verfahren zur Bewertung der Direktblendung der künstlichen Beleuchtung in Innenräumen" eingesehen werden, die hier als Grundlage mehrfach zitiert wurde.

Die Standardbedingungen dieses Verfahren werden im folgenden aufgelistet:<sup>12</sup>

- Gleichmäßige Verteilung der Leuchten an der Decke
- Festlegung der mittleren Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche auf 1000 lx
- Reflexionseigenschaften der Decke / Wände / Boden: 0.8 / 0.5 / 0.2
- mehrere Leuchtenhöhen über dem Boden: 2.6m, 3m, 4m und 4.9m
- mehrere Raumformen und Raumabmessungen
- Verhältnis von maximaler zu mittleren Leuchtdichte < 5:1

Wenn der berechnete VCP - Wert über 70 liegt, gilt die Beleuchtungsanlage als "nicht störend". Weiterhin können die Wahrscheinlichkeiten des VCP - Verfahren auf die Blendungsskalen von anderen Verfahren überführt werden, da alle Verfahren grundsätzlich auf ähnlichen Formeln basieren.<sup>13</sup>

---

<sup>12</sup>vgl. LiTG, *Das UGR - Verfahren zur Bewertung der Direktblendung der künstlichen Beleuchtung in Innenräumen*, S. 15 – 22.

<sup>13</sup>Universitätsverlag Ilmenau, *Blendungsbewertung von LED-Leuchten in Innenräumen*.

### 2.2.5 Die CGI - Blendungsformel

Die Verwendung von mehreren Blendungsbewertungssystemen in Europa, die auf unterschiedlichen Basisuntersuchungen beruhen, sorgte für die Entwicklung der CGI - Blendungsformel, die von der CIE (CIE - Commission International de l'Eclairage, Internationale Beleuchtungskommission ) aufgestellt wurde.

Diese basiert auf den Ergebnissen des Glare Index - Verfahrens und auf dem Leuchtdichtegrenzkurven-Verfahren der DIN 5035. Letzteres Verfahren wurde hier nicht vorgestellt und kann für weitere Informationen in der genannten LiTG Publikation eingesehen werden.

Sie gilt als der bestmögliche Kompromiss zwischen den vorhandenen Blendungsbewertungssystemen und wurde in der CIE Publikation Nr. 55 vorgestellt. Folgende Basisformel wird in dieser Publikation angegeben:<sup>14</sup>

$$CGI = 8 \cdot \log_{10} \cdot \left[ 2 \cdot \frac{1 + E_d/500}{E_i + E_d} \cdot \sum \frac{L_s^2 \cdot \Omega}{P^2} \right]$$

Mit:

<i>CGI</i>	CIE Glare Index
<i>E<sub>d</sub></i>	direkte, vertikale Beleuchtungsstärke in der Pupillenebene [ <i>lx</i> ]
<i>E<sub>i</sub></i>	indirekte, vertikale Beleuchtungsstärke in der Pupillenebene [ <i>lx</i> ]
<i>L<sub>s</sub></i>	mittlere Leuchtdichte der einzelnen Leuchten [ <i>cd/m<sup>2</sup></i> ]
<i>Ω</i>	Raumwinkel zwischen Beobachter und der einzelnen Leuchte [ <i>sr</i> ]
<i>P</i>	Positionsindex der einzelnen Leuchte zum Beobachter nach Guth

Die Ergebnisse des Glare Index der CIE sind auf die Ergebnisse des britischen Glare Indexes abgestimmt. Somit können die Bewertungsskalen einfach übernommen werden.

Weiterhin können große Leuchten unterteilt werden, da der Exponent für den Raumwinkel mit eins definiert wurde. Trotz dieser positiven Eigenschaften wurde die CGI - Formel nicht als allgemeines Blendungsverfahren genutzt, da diese als zu kompliziert eingestuft wurde, da es keine Möglichkeit für eine vereinfachte Tabellenmethode geben soll.

Aus diesem Grund wurde das Blendungskomitee der CIE mit der Entwicklung eines praktischen Blendbewertungsverfahrens beauftragt.<sup>14</sup>

---

<sup>14</sup>vgl. LiTG, *Das UGR - Verfahren zur Bewertung der Direktblendung der künstlichen Beleuchtung in Innenräumen*, S. 21 – 22.

# 3 Das Unified Glare Rating - Allgemeine Informationen zum Blendbewertungsstandard

Mit der Vorstellung des Unified Glare Ratings in der Publikation Nr. 117 der Internationale Beleuchtungskommission CIE im Jahr 1995 wurde die psychologische Blendbewertung weltweit standardisiert. Das UGR - Verfahren ist die Weiterentwicklung des CIE Glare Index - Verfahrens (CGI - siehe Kap. 2.2.5).<sup>1</sup>

In den nachfolgenden Abschnitten sollen die allgemeinen Informationen über dieses Verfahren dokumentiert werden, die für die Implementierung sowie für ein besseres Verständnis dieses Blendbewertungsverfahrens von Nöten sind.

## 3.1 Aufbau der UGR - Formel

Das UGR - Verfahren beruht auf der folgenden Basisformel:<sup>2</sup>

$$UGR = 8 \cdot \log_{10} \left( \frac{0.25}{L_b} \cdot \sum \frac{L_s^2 \cdot \Omega}{P^2} \right)$$

Mit:

<i>UGR</i>	Blendungszahl der Beleuchtungsanlage, Unified Glare Rating
<i>L<sub>b</sub></i>	Hintergrundleuchtdichte [ <i>cd/m<sup>2</sup></i> ]
<i>L<sub>s</sub></i>	mittlere Leuchtdichte einer einzelnen Leuchte in Beobachterrichtung [ <i>cd/m<sup>2</sup></i> ]
<i>Ω</i>	Raumwinkel zwischen Beobachter und der einzelnen Leuchte [ <i>sr</i> ]
<i>P</i>	Positionsindex der einzelnen Leuchte zum Beobachter nach Guth

Bei der Berechnung des UGR - Wertes werden nur lichttechnische Größen verwendet, die durch die vorherigen Blendbewertungs-Verfahren genutzt wurden. Diese Parameter sowie die Exponenten wurden durch experimentelle Untersuchungen bestimmt, indem der Lichtstrom eine potentiellen Blendquelle variiert wurde und verschiedene Beobachter ihre subjektive Bewertung abgaben.<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup>www.licht.de, *Lichtlexikon - UGR*.

<sup>2</sup>CIE 117-1995, *Discomfort Glare in Interior Lighting*.

<sup>3</sup>LITG, *Das UGR - Verfahren zur Bewertung der Direktblendung der künstlichen Beleuchtung in Innenräumen*.

Weiterhin sollte dieses neue Verfahren auf den Ergebnissen der Vorgänger aufbauen und mit diesen vergleichbar sein. Somit wurden die Exponenten für die mittlere Leuchtdichte  $L_s$ , den Positionsindex von Guth  $P$  und die des Raumwinkels  $\Omega$  aus der CGI - Berechnungsformel entnommen. Einziger Unterschied zu dem Glare Index - Verfahren der CIE ist die Bewertung der Hintergrundleuchtdichte, die bereits in dem britischen Glare Index Anwendung gefunden hat, die anstelle der aufwändigen Berechnung aus dem CGI - Verfahren verwendet wird.<sup>4</sup> Die Konstanten wurden so gewählt, dass die Blendungsergebnisse der UGR - Berechnung mit den vorigen Verfahren verglichen werden können.

Somit hat die UGR - Berechnungsformel folgende Eigenschaften:<sup>4</sup>

- Unterteilung von großen Leuchten möglich (da Exponent von  $\Omega$  eins ist)
- Vergleich zwischen den verschiedenen Blendungsverfahren in der Blendungsurteilung
- Blendbewertung der Beleuchtungsanlage erfolgt durch die Auswertung jeder Leuchte im Raum in Abhängigkeit zur Beobachterposition.
- Raumeigenschaften werden durch  $L_b$  mit berücksichtigt.

In der UGR - Berechnung wird weiterhin davon ausgegangen, dass die zu berechneten Leuchten einfache geometrische Formen besitzen und das erzeugte Licht gleichmäßig abgegeben wird.<sup>4</sup> In den Abschnitten 3.3 und 3.4 werden die Einschränkungen und fehlenden Einflüsse näher diskutiert.

Für die Berechnung der UGR - Parameter können die folgenden Formeln aus der Lichttechnik verwendet werden.<sup>5</sup>

<u>mittlere Leuchtdichte:</u>	<u>Raumwinkel:</u>	<u>Bedeutung:</u>
$L_s = \frac{I_{c\gamma}}{A_p}$	$\Omega = \frac{A_p}{r^2}$	$I_{c\gamma}$ : Lichtstärke in Beobachterrichtung [cd]
		$A_p$ : sichtbare Leuchtenfläche von Beobachterposition [ $m^2$ ]
		$r$ : Distanz zwischen Beobachter und Leuchte[m]

Somit kann die UGR - Formel erweitert und vereinfacht werden:

$$UGR = \underbrace{8 \cdot \log_{10} \left( \frac{1}{4} \cdot \sum \frac{I_{c\gamma}^2}{A_p \cdot r^2 \cdot P^2} \right)}_{\text{Direktblendung}} - \underbrace{8 \cdot \log_{10}(L_b)}_{\text{Hintergrundleuchtdichte}}$$

<sup>4</sup>LITG, Das UGR - Verfahren zur Bewertung der Direktblendung der künstlichen Beleuchtung in Innenräumen.

<sup>5</sup>CIE 190-2010, Calculation and Presentation of Unified Glare Rating Tables for Indoor Lighting Luminaires.

Für die Bestimmung der Hintergrundleuchtdichte wird die indirekte Beleuchtungsstärke in der Pupillenebene des Auges benötigt. Diese kann näherungsweise mit der mittleren, indirekten Beleuchtungsstärke der Wand gleichgesetzt werden, sodass die Hintergrundleuchtdichte folgendermaßen berechnet werden kann:<sup>5</sup>

$$L_b = \frac{E_i}{\pi} \approx \frac{\overline{E_{Wall}}}{\pi}$$

Allerdings wird für die Berechnung der indirekten Beleuchtungsstärke ein aufwändigeres Verfahren benötigt, weshalb kein Vorteil durch eine Erweiterung erzielt werden kann. Die Berechnungsschritte für die Kalkulation der indirekten Beleuchtungsstärke der Wand werden in dem Kapitel 4 gezeigt.

In dieser Form kann jedoch der Direktanteil der UGR-Formel durch die Angaben von spezifischen Leuchtendaten berechnet werden. Diese Leuchtendaten werden vom Hersteller der Leuchte erzeugt und enthalten Information über Lichtstärkenverteilung, der Abmessungen der leuchtenden Fläche und des Gehäuses sowie über viele weitere lichttechnische und sonstige Größen. Das verwendete Datenformat *EULUMDAT* (Dateienendung: .ldt) wird im Kapitel 4 näher erläutert.

Die Auswirkungen der einzelnen Parameter auf das Ergebnis der UGR - Formel wird im folgenden zusammengefasst:<sup>5</sup>

- Wird die Leuchtdichte erhöht, führt dies zu einer Erhöhung der Blendung.

Beispiel: Die Verdopplung der Leuchtdichte führt auch zu einer Verdopplung der Hintergrundleuchtdichte. Da die Leuchtdichte zum Beobachter quadratisch eingeht, erhöht sich der UGR - Wert um  $8 \cdot \log_{10}(2) \approx 2.4$ .

- Wird die Leuchtfläche verkleinert bei gleichbleibender Hintergrundleuchtdichte, muss die Leuchtdichte der Leuchten erhöht werden. Somit ergibt sich eine Erhöhung der Blendung.

Beispiel: Bei einer Halbierung der Leuchtfläche, muss die Leuchtdichte verdoppelt werden. Somit ergibt sich einer Erhöhung des UGR - Wertes um  $8 \cdot \log_{10}(2) \approx 2.4$ .

- Wird die Lichtstärkenverteilung der Leuchte geändert, wirkt sich dies auf die Leuchtdichte aus, welche quadratisch in die UGR - Berechnung eingeht. Auch die Hintergrundleuchtdichte wird beeinflusst.

Da jede Erhöhung der Leuchtdichte zu einer Erhöhung der Blendwirkung der Leuchte führt, muss diese gering bleiben. Um die Blendung zu verringern kann somit die Leuchtenaustrittsfläche erhöht oder die Lichtstärkenverteilung angepasst werden. <sup>5</sup>

---

<sup>5</sup>LITG, *Das UGR - Verfahren zur Bewertung der Direktblendung der künstlichen Beleuchtung in Innenräumen*

### 3.1.1 Korrekturwertberechnung

Weiterhin wurde von der internationalen Beleuchtungskommission zu der UGR - Formel einige Korrekturberechnungen eingeführt, um einen bereits berechneten UGR - Wert anzupassen. Einige Leuchten von Herstellern unterscheiden sich zumeist nur in wenigen Gesichtspunkten. Bei baugleichen Leuchten, welche sich lediglich durch unterschiedliche Lampenbestückungen unterscheiden und eine gleiche relative Lichtstärken-Verteilung aufweisen, muss lediglich der Lichtstrom angepasst werden. In diesem Fall wird für die Standardleuchte der UGR - Wert berechnet. Jede weitere Variante kann mit folgender Lichtstromkorrektur - Formel angepasst werden:<sup>6</sup>

$$UGR(\Phi) = UGR(\Phi_0) + 8 \cdot \log_{10} \left( \frac{\Phi}{\Phi_0} \right)$$

$UGR(\Phi)$	Korrigierter UGR - Wert
$UGR(\Phi_0)$	Unkorrigierter UGR - Wert / UGR - Wert der Standardleuchte
$\Phi$	Gemessener Lichtstrom der Leuchte [lm]
$\Phi_0$	Normierter Lichtstrom (1000 lm) / Lichtstrom der Standardleuchte [lm]

Da die Lichtstärkenverteilung der jeweiligen Leuchtdaten stets auf 1000 Lumen normiert wird, ist die Lichtstrom-Korrektur von großer Relevanz. UGR - Werte, die mit den normierten Lichtstärken-Tabellen berechnet wurden beziehungsweise für einen Leuchtenlichtstrom von 1000 Lumen berechnet wurden, werden unkorrigierte UGR - Werte genannt. Korrigierte UGR - Werte müssen stets mit dem Lichtstrom der Leuchte angegeben werden.<sup>6</sup>

Falls eine Leuchte sich nur in der Ausdehnung der leuchtenden Fläche zu der Standardvariante der Leuchtenserie unterscheidet, kann die folgende Korrektur durchgeführt werden:<sup>7</sup>

$$UGR(A) = UGR(A_0) - 8 \cdot \log_{10} \left( \frac{A}{A_0} \right)$$

$A$	Leuchtende Fläche der variierten Leuchte
$A_0$	Leuchtende Fläche der Standardleuchte

Bei Unterschieden des Leuchtenbetriebswirkungsgrades bei baugleichen Leuchten, die durch unterschiedliche Lampenbestückungen einer Leuchtenserie entstehen können, kann folgende Korrektur angewendet werden:<sup>7</sup>

$$UGR(\eta) = UGR(\eta_0) + 8 \cdot \log_{10} \left( \frac{\eta}{\eta_0} \right)$$

$\eta$	Leuchtenbetriebswirkungsgrad der variierten Leuchte
$\eta_0$	Leuchtenbetriebswirkungsgrad der Standardleuchte

Somit wird nur der UGR - Wert der Standardvariante der Leuchtenserie benötigt. Alle gezeigten Korrekturwertberechnungen können ebenfalls auf das Tabellenverfahren der UGR - Berechnung angewendet werden, welches in dem Kapitel 3.2.2 vorgestellt wird.

---

<sup>6</sup>vgl. LiTG, *Das UGR - Verfahren zur Bewertung der Direktblendung der künstlichen Beleuchtung in Innenräumen.*

<sup>7</sup>vgl. CIE 117-1995, *Discomfort Glare in Interior Lighting*, S. 10.

### 3.1.2 Blendungsbeurteilung

Da sowohl die UGR - Berechnung als auch die meisten Verfahren vor diesem als Ergebnis eine Blendungszahl errechnet, wird für die Interpretation dieses Ergebnisses eine Blendungsskala benötigt. Die unterschiedlichen Blendungsurteile der Beobachter, welche in experimentellen Untersuchungen zustande gekommen sind, wurden von Söllner in einem siebenstufigen Blendungsgrad-System übertragen, welche im folgenden aufgelistet wird:<sup>8</sup>

Blendungsgrad 0:	Keine Blendung
Blendungsgrad 1:	Blendung zwischen nicht vorhanden und merkbar
Blendungsgrad 2:	Blendung merkbar
Blendungsgrad 3:	Blendung zwischen merkbar und störend
Blendungsgrad 4:	Blendung störend
Blendungsgrad 5:	Blendung zwischen störend und unerträglich
Blendungsgrad 6:	Blendung unerträglich

Tabelle 3.1: Definition der Blendungsgrade nach Söllner <sup>8</sup>

Sowohl für das Unified Glare Rating als auch für das CIE Glare Rating wurde gezeigt, dass sich die Blendsituation der Beleuchtungsanlage mit 3 Einheiten ändert. Auf Grundlage dieser Einteilung wurden von der CIE und der LiTG vereinfachte Güteklassen definiert, die den Zusammenhang zwischen den Blendungsgraden von Söllner und prozentualen Wahrscheinlichkeit des VCP - Verfahrens aufarbeitet. Somit wurden folgende Blendbeurteilungen für die jeweiligen UGR - Grenzwerte festgelegt:<sup>8</sup>

Güte- klasse LiTG	Güte- klasse CIE	Blendungs- grad	Anzahl der "gerade nicht gestörten" Beobachtern VCP - Verfahren	UGR Grenzwerte	Beschreibung Söllner
-	-	-	-	10	Keine Blendung
A	A	1,15	75%	13 / 16	Blendung nicht vorhanden
1	B	1,5	65%	19	Blendung vorhanden / merkbar
	C	1,85	55%		
2	D	2,2	45%	22	Blendung merkbar
3	E	2,55	35%	25 / 28	Blendung merkbar / störend
-	-	-	-	> 28	Blendung störend / unerträglich

Tabelle 3.2: Einteilung der jeweiligen UGR-Grenzwerte zu den Blendungsgraden <sup>8</sup>

<sup>8</sup>vgl. LiTG, *Das UGR - Verfahren zur Bewertung der Direktblendung der künstlichen Beleuchtung in Innenräumen*, S. 26 – 28.

Die Blendungsgrade für die jeweiligen UGR - Grenzwerte werden in Zwischenwerten angegeben, da jeder Beobachter eine andere subjektive Einschätzung der auftretenden Blendung entwickelt. Durch Untersuchungen der LiTG wurden weitere Abstufungen durch die Verwendung der Nennbeleuchtungsstärke nachgewiesen. Mit Hilfe dieses Wertes, der in der UGR - Formel nicht berücksichtigt ist, kann der berechnete UGR-Wert genauer einem Blendungsgrad beziehungsweise einer LiTG Güteklasse zugeordnet werden:

Güte- klasse	Blendungs- grad	Nennbeleuchtungsstärke in lx								
		1000	750	500	-	≤ 300	-	-	-	-
A	1.15	1000	750	500	-	≤ 300	-	-	-	-
1	1.5	2000	1500	1000	750	500	≤ 300	-	-	-
2	2.2					2000	1000	500	≤ 300	
3	2.55						2000	1000	500	≤ 300
UGR-Grenzwert		13		16		19		22	25	28

Tabelle 3.3: Unterteilung der UGR-Grenzwerte in die Blendungsgrade in Abhängigkeit der Nennbeleuchtungsstärke<sup>9</sup>

In der Norm *DIN EN 12464-1 - Beleuchtung von Arbeitsstätten* werden maximal zulässige UGR-Werte und die Nennbeleuchtungsstärken der Beleuchtungsanlage für verschiedene Raumarten und deren Tätigkeitsfelder festgelegt, um die Blendbewertung sowie die Beleuchtungsanlagenplanung zu vereinfachen. In dieser Norm werden die Beleuchtungsanforderungen von 53 Innenraumbereiche mit deren jeweiligen Tätigkeitsaufgaben spezifiziert. Je nach Schwierigkeit der Sehaufgabe werden geringere UGR - Werte und zumeist höhere Nennbeleuchtungsstärken gefordert. Für eine grobe Orientierung der benötigten UGR - Werte eines Tätigkeitsbereiches kann die folgende Tabelle genutzt werden:

Tätigkeit:	UGR - Grenzwert:
Technisches Zeichnen	≤ 16
Lesen, Schreiben, Unterrichtsräume, Computerarbeit, Kontrollarbeiten	≤ 19
Arbeiten in Industrie und Handwerk, Empfang	≤ 22
Grobe Arbeiten, Treppen	≤ 25
Flure	≤ 28

Tabelle 3.4: Anforderungen der Beleuchtungsanlage in verschiedenen Tätigkeitsbereichen<sup>10</sup>

<sup>9</sup>LiTG, *Das UGR - Verfahren zur Bewertung der Direktblendung der künstlichen Beleuchtung in Innenräumen*, S. 28

<sup>10</sup>licht.de, *Leitfaden zur DIN EN 12464-1*

## 3.2 Anwendungen der UGR - Formel

Für die praktische Verwendung der UGR - Formel existieren mehrere Anwendungsarten, die für Lichtplaner und Hersteller von Leuchten als auch für einen Endkunden geeignet sind. Diese Verfahren werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

### 3.2.1 Blendbewertung für einen spezifischen Raum

Um die Blendungeigenschaften eines Raumes für eine definierte Beobachterposition unter Verwendung der UGR - Formel genau zu bestimmen, können spezielle Berechnungstools genutzt werden, die den Raum sowie die Eigenschaften der Beleuchtungsanlage nachbilden. Für die UGR - Berechnung werden folgende Informationen benötigt:

- Eigenschaften der Leuchten:
  - Position und Leuchtengröße
  - Lichtstärke-Verteilung
  - Anschlussleistung und sonstiges
- Eigenschaften des Raumes:
  - Dimension des Raumes
  - Raumreflexionseigenschaften
- Position / Blickrichtung des Beobachters
- Art und Tätigkeitsbereiche des Raumes:
  - Bestimmung der Grenzwerte nach DIN EN 12464-1
- Optionale Reflexionsgegenstände und Lichteintrittsflächen:
  - Einrichtungsgegenstände
  - Fenster und Türen



Abbildung 3.1: Beispielbild einer Gebäudesimulation aus DIALux<sup>11</sup>

Die weit verbreitetsten Programme für die Lichtberechnung sind *DIALux* und *RELUX*. Mit Hilfe dieser Programme können Räume und komplette Gebäude in einer dreidimensionalen Visualisierung entworfen oder nachgebildet werden. Weiterhin können verschiedene Leuchten und Einrichtungsgegenstände sowie Fenster und Türen platziert werden.

Für die Berechnung des UGR - Wertes eines nachgebildeten Raumes können spezielle, vorgegebene Beobachterpositionen oder ein Bereich mit einem Beobachterraster geprüft werden. Reflexblendungen von platzierten Objekten sowie der Lichteinfall der Fenster können simuliert werden und tragen in der Blendbewertung bei. Auch das Mischen von unterschiedlichen Leuchten ist in diesem Verfahren möglich. Weitere wichtige Informationen wie beispielsweise das Einhalten der Nennbeleuchtungsstärken werden ebenfalls bereitgestellt.

Die Visualisierung sowie die Simulation dieser Räume ist sehr aufwändig. Trotzdem werden diese Programme von Lichtplanern oft eingesetzt, um genaue Werte für die Berechnung sowie für eine Abschätzung der benötigten Leuchten im Raum für eine gewisse Raumausleuchtung zu erhalten. Für eine objektive Beurteilung der Leuchten ist dieses Verfahren nicht geeignet, da die Blendbeurteilung nur für den jeweilig simulierten Raum gilt.

<sup>11</sup>[www.dial.de](http://www.dial.de), *DIALux - Professionelle Lichtplanungssoftware*

### 3.2.2 Das UGR - Tabellenverfahren

Für den einfachen und praktischen Vergleich von Leuchten und für eine Abschätzung in der Lichtplanung wurde das UGR - Tabellenverfahren in der CIE 117 vorgestellt. Dieses Verfahren greift auf die Eigenschaften des Glare - Index Verfahren zurück, welches damals mit standardisierten Räumen und festgelegten Reflexionseigenschaften berechnet wurde.

Das Tabellenverfahren der UGR - Berechnung ist das meist genutzte Verfahren und wird von der *DIN EN 13032-2* für die Darstellung der UGR - Werte von Leuchtenherstellern gefordert. Für eine einheitliche und reproduzierbare Berechnung der UGR - Werte sind die Standardbedingungen für dieses Verfahren wichtig, da ansonsten der Vergleich zwischen Leuchten und dessen Herstellern nicht mehr möglich wäre. Für eine etwaige Vorstellung für den Aufbau des Tabellenverfahrens wird in Abbildung 3.2 eine UGR - Tabelle gezeigt, welche die Grundeigenschaften und Aufbau zeigt.

Blendungsbewertung nach UGR											
ρ Decke	70	70	50	50	30	70	70	50	50	30	
ρ Wände	50	30	50	30	30	50	30	50	30	30	
ρ Boden	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
Raumgröße		Blickrichtung quer zur Lampenachse					Blickrichtung längs zur Lampenachse				
X	Y										
2H	2H	13.7	14.6	14.6	15.5	16.6	15.6	16.5	16.5	17.4	18.5
	3H	15.5	16.3	16.4	17.2	18.4	17.8	18.6	18.7	19.5	20.6
	4H	16.2	17.0	17.1	17.9	19.1	18.7	19.4	19.6	20.4	21.5
	6H	16.8	17.5	17.7	18.4	19.6	19.5	20.2	20.4	21.1	22.3
	8H	17.0	17.6	17.9	18.6	19.8	19.8	20.4	20.7	21.4	22.6
	12H	17.1	17.7	18.1	18.7	19.9	20.0	20.6	20.9	21.5	22.8
4H	2H	14.7	15.5	15.6	16.4	17.6	16.1	16.8	17.0	17.8	18.9
	3H	16.6	17.2	17.6	18.2	19.4	18.5	19.1	19.4	20.0	21.2
	4H	17.4	18.0	18.4	19.0	20.2	19.5	20.1	20.5	21.0	22.3
	6H	18.1	18.6	19.1	19.6	20.8	20.4	20.9	21.4	21.9	23.2
	8H	18.3	18.8	19.3	19.8	21.0	20.8	21.3	21.8	22.2	23.5
	12H	18.5	18.9	19.5	19.9	21.2	21.1	21.5	22.1	22.5	23.8
8H	4H	17.9	18.4	18.9	19.3	20.6	19.7	20.1	20.7	21.1	22.4
	6H	18.8	19.1	19.8	20.1	21.4	20.8	21.2	21.8	22.2	23.5
	8H	19.1	19.4	20.1	20.4	21.7	21.3	21.6	22.3	22.6	23.9
	12H	19.4	19.6	20.4	20.6	22.0	21.7	21.9	22.7	23.0	24.3
12H	4H	18.0	18.4	19.0	19.4	20.7	19.7	20.1	20.7	21.1	22.4
	6H	18.9	19.2	19.9	20.2	21.6	20.8	21.2	21.9	22.2	23.5
	8H	19.3	19.6	20.3	20.6	21.9	21.4	21.6	22.4	22.7	24.0
Variation der Beobachterposition für Leuchtenabstände S											
S = 1.0H	+0.1 / -0.1					+0.1 / -0.1					
S = 1.5H	+0.2 / -0.2					+0.2 / -0.2					
S = 2.0H	+0.4 / -0.5					+0.3 / -0.4					
Standardtabelle	BK07					BK08					
Korrektursummand	3.4					6.1					
Korrigierte Blendindizes bezogen auf 5997lm Gesamtlichtstrom											

Abbildung 3.2: Aufbau einer standardisierten korrigierten UGR - Tabelle<sup>12</sup>

Auf der linken Seite der UGR-Tabelle können die berechneten, rechteckigen Standardräume wiedergefunden werden. Die Raumdimensionen für die Länge und Breite des Raumes sind jeweils in Abhängigkeit der Höhe H angegeben, die in dem Tabellenverfahren für die Höhe zwischen der Augenhöhe des Beobachters und der Leuchte steht. Die Höhe H ist für die Berechnung des Tabellenverfahren festgelegt auf 2 Meter. Somit werden die Raumabmessungen von  $4m \times 4m$  bis zu  $24m \times 16m$  variiert.

<sup>12</sup>LDT-Editor, entnommen aus dem LDT - EDITOR von DIAL

Die Raumflächen dieser Standardräume werden mit unterschiedlichen Reflexionsparametern getestet, die in dem oberen Abschnitt vermerkt sind. Hierbei handelt es sich um prozentuale Angaben, welche die entsprechende Fläche reflektiert. Für eine einfache Benennung der Raumreflexionskombination werden die Werte in der Reihenfolge Decke / Wand / Boden genannt (Beispiel: 50 / 50 / 20 → Decke: 50 / Wand: 50 / Boden: 20).

Die gezeigten Kombinationen der Reflexionswerte sind die meist verbreitetsten bei der Berechnung der UGR - Tabelle. Diese dürfen beliebig mit entsprechender Kennzeichnung verändert und erweitert werden. Allerdings sollen die UGR - Werte mit den Reflexionssituation 70 / 50 / 20 stets berechnet werden, da diese Werte für das Ablesen der Referenzwerte benötigt werden.<sup>13</sup>

Da dieses Tabellenverfahren einfach gehalten werden soll, werden auf weitere Reflexionsobjekte sowie Fenster und Türen verzichtet. Einzig die Leuchten und der Beobachter befinden sich in dem Raum.

Um eine Aussage über die Blendwirkung einer Leuchte zu erhalten, wird die Beleuchtungsanlage eines Standardraumes mit dieser Leuchte virtuell installiert. Die Positionen der jeweiligen Leuchten in diesen Standardräumen sind in einer regelmäßigen, rechteckigen Anordnung vorzunehmen. Dabei soll die Ausrichtung der Leuchten zwischen quer und längs variiert werden. In der Abbildung 3.3 wird ein Beispiel für die Interpretation der Anordnungen gezeigt. Weiterhin wurde die Standardposition des Beobachters markiert. Diese befindet sich mittig an einer der Raumwände, da alle Leuchten im Raum von Beobachter wahrgenommen werden können und somit das "Worst Case" - Szenario abgebildet wird.

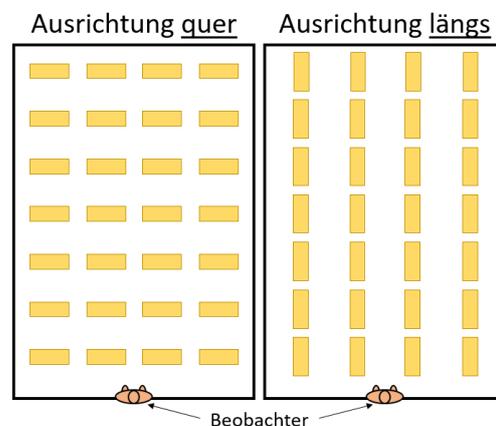


Abbildung 3.3: Variation der Leuchtenanordnung und Beobachterposition<sup>14</sup>

Die Augenhöhe eines sitzenden Beobachters wird mit 1.2m und eines stehenden Beobachters mit 1.7m angenommen, wobei ein sitzender Beobachter bevorzugt wird. Für beide Beobachter wird jedoch der gleiche UGR - Wert bestimmt, da die Höhe zwischen Augen und Leuchten bei der Tabellenmethode auf 2m festgelegt wurde.

Weiterhin ist der Abstand zwischen den Leuchten in dieser Anordnung von Bedeutung. Damit der berechnete UGR-Wert von der Beobachterposition relativ unabhängig ist, werden kleine Abstände zwischen den Leuchten benötigt. Somit wird eine gleichmäßigere Ausleuchtung des Raumes erzeugt, was sich positiv auf die Varianz der UGR-Berechnung in Abhängigkeit der Beobachterposition auswirkt. Bei größeren Leuchtenabständen können hohe Änderungen in dem UGR-Wert bei Veränderung der Beobachterposition auftreten, besonders bei Leuchten mit einem kleinen Austrittswinkel. In der Abbildung 3.4 ist der Unterschied zwischen den Leuchtenabständen unterschiedliche Beobachterpositionen visuell aufbereitet.

<sup>13</sup>vgl. LiTG, *Das UGR - Verfahren zur Bewertung der Direktblendung der künstlichen Beleuchtung in Innenräumen*, S. 37.

<sup>14</sup>vgl. Trilux, *Die neue Trilux Beleuchtungspraxis*

In dem technischen Report Nr. 117 der CIE wird daher der Leuchtenabstand in beide Raumrichtungen mit  $S = 0.25 \cdot H$  festgelegt. Da die Höhe  $H$  (Abstand zwischen Augenhöhe und Leuchten) mit 2 Metern bekannt ist, ergibt sich ein Leuchtenabstand  $S = 0.5 \text{ m}$ .<sup>15</sup> Da der Abstand zwischen den benachbarten Leuchten in Abhängigkeit der Höhe  $H$  angegeben wird, wurde als Berechnungsparameter das "Space-to-Hight - Ratio" (abk. SHR) eingeführt. In den meisten Ländern werden UGR - Tabelle gefordert, welche mit einem SHR von 0.25 erzeugt wurden. Dieser Abstand ist für die Berechnung vom Vorteil aber wird in einer realen Anlage kaum eingesetzt, da manche Leuchten länger als ein Meter sind und somit überlappen würden. Des Weiteren werden für große Räume schnell viele Leuchten benötigt.

Da in Großbritannien das Glare Rating stets mit einem SHR von 1 berechnet wurde, wird dies in der UGR - Berechnung weitergeführt. Das Ergebnis der UGR - Tabelle mit einem SHR von 1 ist zumeist geringer als mit einem geringeren Abstandsverhältnis. Die Folge ist jedoch die höhere Varianz der UGR - Werte bei Variation der Beobachterposition.

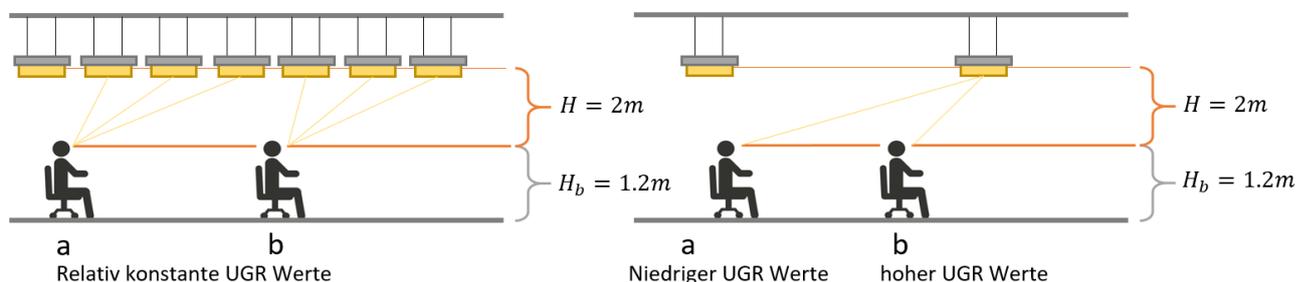


Abbildung 3.4: Veränderung des UGR-Wertes bei Variation des Beobachters mit verschiedenen Leuchtenabständen <sup>15</sup>

Mit diesen Informationen können nun die UGR - Werte in Abhängigkeit von

- den Raumdimensionen
- den Reflexionsgraden der Raumflächen
- der Ausrichtung der Leuchten
- dem genutzten "Space-to-Hight - Ratio"
- den spezifischen Leuchtendaten

berechnet und in die Tabelle eingetragen werden. Hierbei werden nur die korrigierten UGR - Werte mit dem angegebenen Lichtstrom in die Tabelle eingetragen.

Hierbei sind die Werte der Räume 4H/8H sowie 8H/4H mit der Raumreflexionssituation 70 / 50 / 20 für die Bestimmung des UGR-Referenzwertes der Leuchte von Bedeutung, die in der Abbildung 3.2 markiert wurden. Der höchste UGR-Wert wird als Referenzwert der Leuchte gesetzt. Somit kann der Hersteller in den technischen Datenblatt seiner Leuchte die UGR-Klasse angeben, die nach *DIN EN 12464-1* für die jeweiligen Arbeitsbereiche benötigt werden. In der gezeigten Abbildung 3.2 ist der höchste UGR-Wert 20.8. Somit ist dies der Referenzwert der Leuchte.

<sup>15</sup>vgl. CIE 117-1995, *Discomfort Glare in Interior Lighting*, S. 8 – 14

Für die Interpretation der UGR - Werte in der Tabelle werden weiterhin einige Parameter benötigt. Zu den wichtigsten Angaben zählt der verwendete Lichtstrom, der für die korrigierten Blendwerte genutzt wurde, welcher aus den Leuchtendaten entnommen wurde. Sobald ein anderer SHR - Wert als 0.25 für die Erstellung der UGR - Tabelle genutzt wird, muss dieser ebenfalls angegeben werden.

Optionale Angaben wie der Vergleich von Standardtabellen oder die Varianz der UGR - Werte bei Verschiebung des Beobachters (siehe Abb. 3.2) können hinzugefügt werden. Diese Berechnungen und Vergleiche sollen hier allerdings nicht weiter vorgestellt werden.

### 3.2.3 Das UGR - Grenzkurvenverfahren

Ein weiteres Verfahren, welches von der CIE in ihrem technischen Report Nr. 117 vorgestellt wurde, ist das UGR - Grenzkurvenverfahren. In der Abbildung 3.5 werden die Grenzkurven gezeigt, die bei UGR 10 beginnend jeweils drei Einheiten auseinanderliegen und somit den empfohlenen Klassifizierungen der *DIN EN 12464-1* entsprechen.<sup>16</sup>

Es existieren zwei Diagrammarten für jeweils bestimmte Leuchtenkategorien. *Diagramm I* gilt für Leuchten mit Spiegelraster oder für Leuchten mit geringen Austrittswinkeln. *Diagramm II* hingegen gilt für breitstrahlende, diffuse Leuchten und für Leuchten mit einem indirektem Lichtanteil. Eine exakte Trennung zwischen diesen Diagrammen wird von der CIE nicht definiert. Die UGR-Grenzkurven gelten nur für helle Räume mit den Mindest-Reflexionswerten 70 / 50 / 20 für die Raumflächen. Eine Unterscheidung zwischen den Blickrichtungen in Längs- oder Querrichtung wird nicht benötigt, da diese in der Formel der Leuchtenkurven schon enthalten ist.<sup>17</sup>

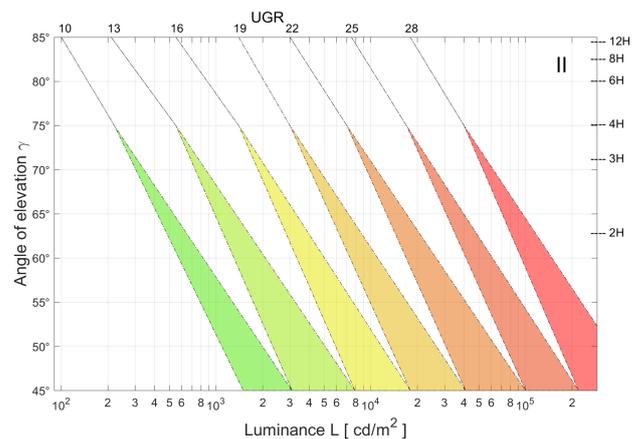


Abbildung 3.5: Diagramm II des UGR Grenzkurvenverfahrens

Verlaufen die Leuchtendichtekurven links von einer der Grenzkurven, wird dieser UGR - Wert eingehalten. Wird die Grenzcurve eines UGR - Wertes geschnitten, so muss die Leuchte als der nächst höherer UGR - Wert angegeben werden. Liegt die Leuchtenkurve innerhalb in einem der schraffierten Bereiche ist eine Auslegung des Leuchtenabstandes der Beleuchtungsanlage notwendig. Dabei gilt die rechte Grenzcurve für geringe Leuchtenabstände, wobei die linke Grenzcurve für Beleuchtungsanlagen mit großen Leuchtenabständen gilt. Auch hier sind keine expliziten Angaben von der CIE genannt worden.<sup>17</sup>

Das Grenzkurvenverfahren liefert nur ungenaue Ergebnisse und schließt viele bewertbare Einflüsse aus, die im Tabellenverfahren abgedeckt wurden. Eine Anwendung dieses Verfahren ist das Testen und Bewerten von realen Beleuchtungsanlagen sowie für einen grafischen Vergleich von ähnlichen Leuchten.<sup>16</sup>

<sup>16</sup>vgl. CIE 117-1995, *Discomfort Glare in Interior Lighting*, S. 21 – 23.

<sup>17</sup>vgl. LiTG, *Das UGR - Verfahren zur Bewertung der Direktblendung der künstlichen Beleuchtung in Innenräumen*, S. 97 – 101

### 3.3 Begrenzungen des UGR - Verfahrens

Die Blendungsbewertung durch das UGR - Verfahren kann für die meisten Leuchten genutzt werden. Einige Leuchten können trotz des neuen Blendbewertungsstandards nicht vollständig bewertet werden:

#### - **Große Leuchten**

Die UGR - Formel wird limitiert durch die Festlegung eines maximalen Raumwinkel einer Leuchte, die vom Beobachter gesehen wird. Dieser Wert liegt bei 0.1 Steradian und wird durch eine Leuchte mit einer leuchtenden Fläche von einem Quadratmeter, die aus einer Entfernung von 3 Meter betrachtet wird, erreicht.<sup>18</sup> Bei großen Leuchten wird der Einfluss der Hintergrundleuchtdichte geschwächt, da der Adaptionszustand des Auges durch die Blendquelle zu stark beeinflusst wird.<sup>19</sup> Die Möglichkeit für die Berechnung des UGR - Wertes wäre, die leuchtende Fläche in Teilflächen zu unterteilen. Hierfür existiert allerdings kein verallgemeinertes Verfahren.

#### - **Leuchten mit hohem Indirektanteil**

In den bisherigen Untersuchungen mit dem UGR - Verfahren wurden bislang keine Leuchten mit einem indirekten Lichtstromanteil über 65 % getestet. Die Blendbewertung für diese Leuchten kann somit nicht verwendet werden. Weiterhin können reine indirekt strahlende Leuchten mit dem UGR - Verfahren nicht bewertet werden, da der Beobachter keine leuchtenden Oberflächen erkennen kann.<sup>19</sup>

#### - **Kleine Leuchtquellen**

Auch kleine Lichtquellen, die vom Beobachter mit einem Raumwinkel unter 0.0003 Steradian betrachtet werden können, sind von der CIE nicht für die UGR - Berechnung geeignet. Unter einem so geringen Raumwinkel wirkt sich die Leuchtdichte laut Riccosches Gesetz nicht mehr auf das Helligkeitsempfinden aus. Hierfür sei die Beleuchtungsstärke auf der Pupillenebene zuständig. Da kleine Raumwinkel in vielen Anwendungen auch durch größere Leuchten auftreten können (durch große Entfernungen bzw. hohe Deckenhöhen), wird deshalb die Aufhebung der unteren Raumwinkelbegrenzung durch die LiTG empfohlen.<sup>19</sup>

---

<sup>18</sup>vgl. CIE 117-1995, *Discomfort Glare in Interior Lighting*, S. 6.

<sup>19</sup>vgl. LiTG, *Das UGR - Verfahren zur Bewertung der Direktblendung der künstlichen Beleuchtung in Innenräumen*, S. 30 / 52 – 59.

## 3.4 Fehlende Eigenschaften der Blendbewertung

Seit den Untersuchungen für die Erstellung der UGR - Formel wurden von vielen wissenschaftlichen Forschungsteams weitere Erkenntnisse gesammelt, die bisher in dem Blendbewertungsstandard nicht mit aufgenommen wurden. Viele natürliche Effekte können allerdings nie in Gänze für ein vereinheitlichtes System erfasst werden, sodass die nachfolgenden Punkte eher als zusätzliches Wissen angesehen werden sollten:<sup>20</sup>

### - Lichtdruck

Durch Untersuchungen wurde gezeigt, dass Lichtquellen, die sich außerhalb des Sichtbereiches befinden (beispielsweise direkt über dem Beobachter) ein etwaiges Unwohlsein auslösen können. Unter dem Begriff "Lichtdruck" wird dieser Effekt beschrieben, welcher durch das Verwenden des Positionsindex von Guth in der UGR-Berechnung nicht betrachtet werden kann.

### - Dynamische Blendung

Im UGR - Verfahren wird stets mit einem statischen Beobachter gerechnet. Die dynamische Blendung tritt bei einer bewegten Beobachterposition auf, die sich unter Leuchten mit kleinen Lichtaustrittswinkeln befindet. Durch einfache Kopfbewegungen kann die wahrgenommene Helligkeit schnell zwischen hell und dunkel erlebt werden. Somit kann sich die Blendbewertung schnell verändern.

### - Sehveränderungen und Sehkorrekturhilfen

Allgemein ist bekannt, dass das Sehvermögen im Alter abnimmt, weshalb ältere Menschen zumeist mehr Licht als jüngere Menschen benötigen, um eine äquivalente Sehaufgabe zu erfüllen. Somit verändert sich die Blendbeurteilung von älteren Menschen ebenfalls. Weiterhin wurde festgestellt, dass Menschen mit Sehhilfen wie Brillen die physiologische Blendung einer Beleuchtungsanlage zumeist höher einkategorisieren.

### - Spektrale Lichtverteilung der Leuchtquelle

Einige Untersuchungen ergaben, dass Beleuchtungsanlagen mit Leuchtstofflampen eine höhere Blendwirkung erzeugen als eine Anlage mit äquivalenten Halogen-Metaldampflampen. Somit hat das ausgesendete Spektrum einer Leuchte einen Beitrag in dem subjektiven Blendempfinden.

Die Lichtfarbe kann ebenfalls einen Einfluss auf dem Betrachter haben. Beispielsweise beschreibt die Kruithof-Kurve den Bereich, in dem eine Lichtquelle in Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke und der Lichtfarbe als angenehm empfunden wird.

### - Ermüdung, Motivation

Die psychologische Blendung wird von jeder Person individuell empfunden und bewertet. Somit können auch Einflussfaktoren wie Müdigkeit, Motivation, Stressfaktor oder Gemütszustand das Wohlbefinden der Person beeinflussen, was zu einer Veränderung der Blendbeurteilung führen kann.

Weiterhin existieren viele weitere fehlende Eigenschaften und Kritikpunkte, die hier nicht weiter aufgeführt werden sollen.

---

<sup>20</sup>vgl. LiTG, *Das UGR - Verfahren zur Bewertung der Direktblendung der künstlichen Beleuchtung in Innenräumen*, S. 58 – 59.

# 4 Implementierung des Unified Glare Ratings

Dieses Kapitel befasst sich detailliert mit der Implementierung des Unified Glare Rating beginnend mit dem Einlesen und der Auswertung der spezifischen Leuchtendaten bis hin zu der Berechnung eines korrigierten UGR - Wertes.

Des Weiteren wird auf die Spezifikationen der Implementierung eingegangen, die für die Verifikation der berechneten Werte entscheidend ist, sowie auf die Strukturierung des Berechnungsprogrammes und der benötigten Parameter mit deren Zwischenergebnissen.

## 4.1 Implementierungsspezifikation

Für die Berechnung von UGR - Werten müssen viele Parameter bekannt sein, wie beispielsweise die Raumdimension oder die Leuchten- und Beobachterpositionen. Für eine Festlegung dieser Parameter soll somit das UGR - Tabellenverfahren implementiert werden. Dieses Verfahren, welches im Abschnitt 3.2.2 näher beschrieben wurde, legt den Aufbau des Raumes und der Positionen sehr strikt fest. Weiterhin wird auch die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit anderen Berechnungsprogrammen durch diese Festlegungen positiv beeinflusst.

Die Implementierungsspezifikationen werden im folgenden zusammengefasst:

- Implementierung des Tabellenverfahrens der UGR - Berechnung:
  - Höhe H (zwischen Augen des Beobachters und Leuchten) = 2m
  - Verwendete "Spacing to Height - Ratios" (SHR) = 0.25 / 1
  - Feste Beobachterposition in der Mitte der Wand auf der X - Achse
  - Ausgabe der berechneten UGR - Tabellen im .xlsx - Dateiformat (Microsoft Excel, OpenOffice)
  - Genauigkeit der jeweiligen UGR - Werte von jeweils  $\pm 0.2$  Punkten (Referenz: Beispiele des UGR - Tabellenverfahrens aus der CIE 117 und CIE 190)
- Verwendung des EULUMDAT - Dateiformates für das Einlesen der spezifischen Leuchtendaten

Als Programmiersprache für diese Implementierung soll das Softwaretool *MATLAB* genutzt werden. Die in diesem Kapitel vorgestellten Berechnungen für die Erzeugung von UGR - Werten sind nicht an dieses Tool gebunden und können auch in anderen Programmiersprachen implementiert werden. Der komplette Quellcode, welcher für die Implementierung benötigt wurde, ist auf der CD zu finden, die im Anhang dieses Dokumentes hinterlegt ist.

Weiterhin kann diese CD bei Prof. Dr. rer. nat. Peter Möller eingesehen werden.

## 4.2 Implementierungsstrukturierung

Für die Berechnung eines UGR - Wertes werden mehrere Parameter benötigt. Mit der Raumgröße, Reflexionsgrade, Leuchtenabstand, Beobachterposition und den Leuchtendaten wird der jeweilige Tabellenwert erzeugt. In der Abbildung 4.1 werden die übergeordneten Berechnungsabschnitte gezeigt, die sich mit den jeweilig verbundenen Parametern berechnen lassen und folgende Berechnungen beinhalten:

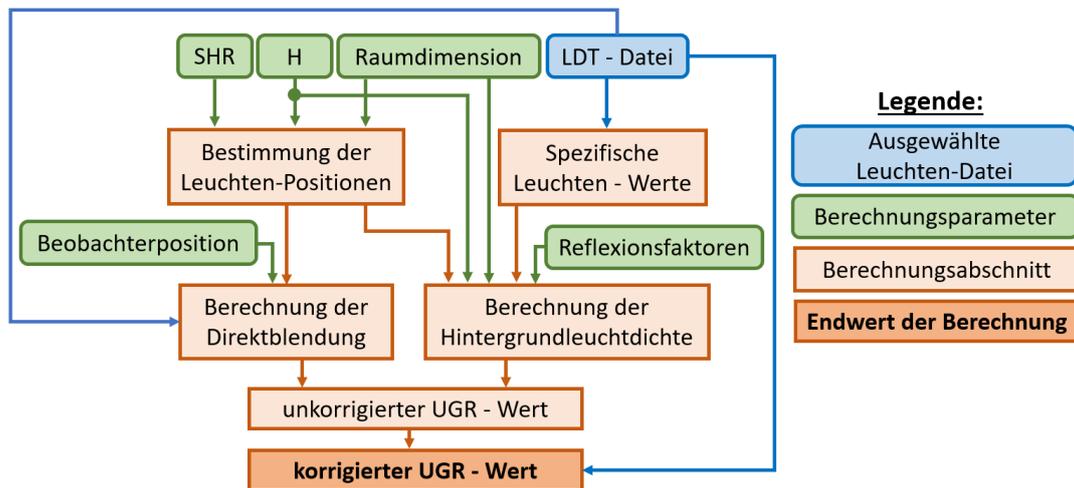


Abbildung 4.1: Berechnungsabschnitte der UGR-Berechnung

Diese gezeigten Berechnungsabschnitte enthalten die Bestimmung folgender Parameter, welche in den folgenden Abschnitten weiter erläutert werden:

### 1. Spezifische Leuchtenwerte

- Zonal Flux (  $FC$  )
- Flux - Code (  $N$  )
- Betriebswirkungsgrade der Leuchte (  $LOR/DLOR/ULOR$  )

### 2. Leuchtenposition:

- Setzen der X- und Y- Position der jeweiligen Leuchten für das Leuchten-Raster des Raumes

### 3. Berechnung der Direktblendung

- Distanz zw. Beobachter und Leuchte (  $r$  )
- Azimuth- und Elevation-Winkel (  $C / \gamma$  )
- sichtbare leuchtende Fläche (  $A_p$  )
- Positionsindex (  $P$  )
- Lichtstärke-Wert zum Beobachter (  $I_{C/\gamma}$  )

### 4. Berechnung der Hintergrundleuchtdichte

- Geometric Multiplier (  $GML$  )
- Direkt-Lichtstromanteil Nutzoberfläche (  $F4$  )
- Interreflexionswirkungsgrade (  $TF$  )
- Raumwirkungsgrade (  $UF / RU$  )

Tabelle 4.1: Beschreibung der Berechnungsabschnitte mit den benötigten Zwischenwerten

Ein einfacher Programmablauf für die Berechnung einer UGR - Tabelle kann aus der Abbildung 4.2 entnommen werden.

Die Leuchtendatei, zudem die jeweilige UGR - Tabelle berechnet werden soll, muss zunächst vom Benutzer angefordert werden. Diese wird vom Programm eingelesen und kontrolliert. Je nachdem, ob die LDT - Datei für die UGR - Berechnung geeignet ist, können die spezifischen Leuchtenwerte berechnet und die festen Standardwerte wie beispielsweise das "Space to Height - Ratio" festgelegt werden. Auch die jeweiligen Kombinationsmöglichkeiten der Raumabmessungen mit den jeweiligen Reflexionsgrade können somit bestimmt werden.

Somit kann mit der Berechnung der UGR - Tabelle begonnen werden. Solange die Tabelle nicht vollständig ist, werden die UGR - Werte der jeweiligen Kombinationsmöglichkeit berechnet. Der Ablauf der Berechnung für einen UGR-Wert ist auf der rechten Seite gezeigt. Mit Hilfe der Abbildung 4.1 können die benötigten Parameter für die jeweiligen Berechnungsabschnitte ermittelt werden. Falls alle Werte erfolgreich berechnet wurden, kann die UGR - Tabelle ausgegeben und als *.xlsx - Datei* exportiert werden.

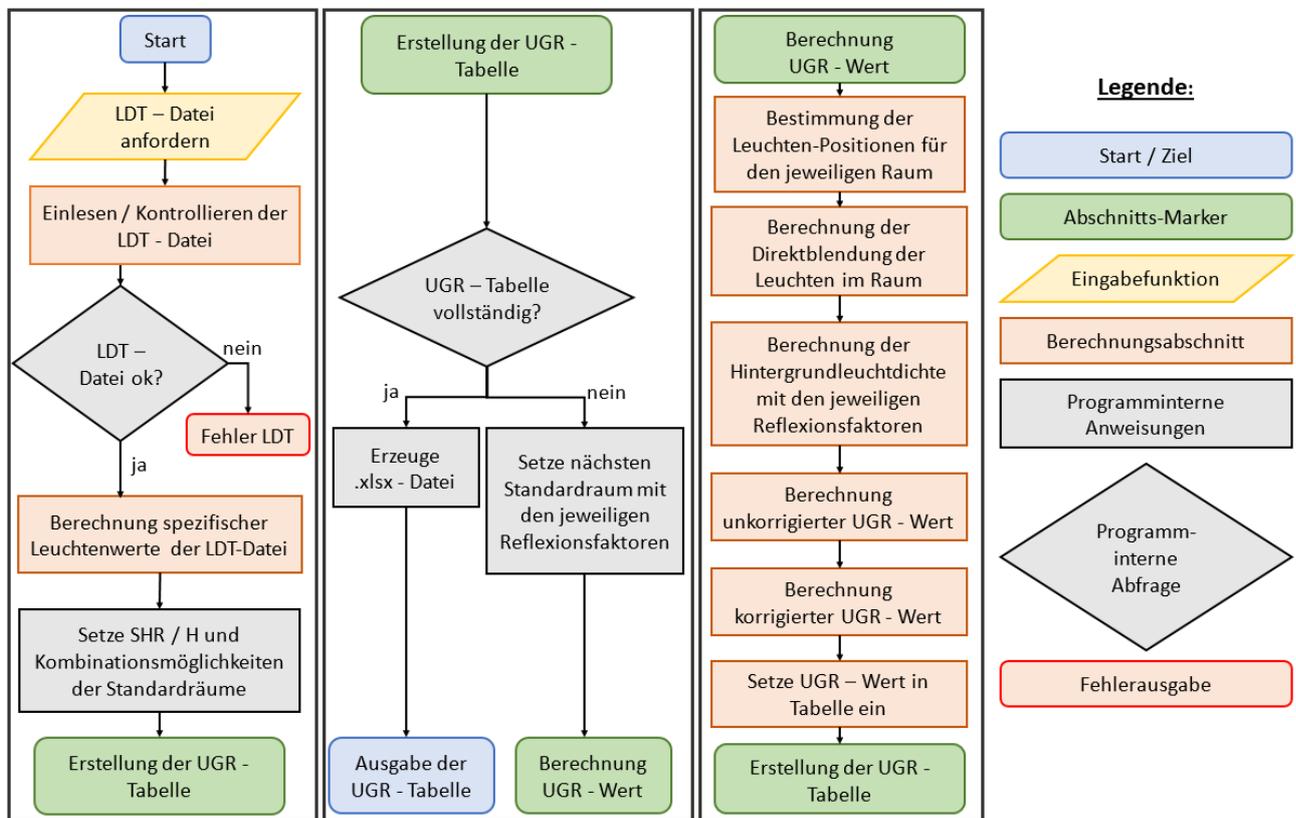


Abbildung 4.2: Flussdiagramm für die Berechnung der UGR - Tabelle

Da die standardisierte UGR - Tabelle 19 Standardräume mit 5 Reflexionsgrade und zwei unterschiedlichen Leuchtenmontage-Richtungen vorsieht, werden insgesamt 190 Werte benötigt. Durch die Einzelberechnung jedes Wertes für die UGR - Tabelle würden Zwischenwerte mit einem gleichen Ergebnis mehrfach berechnet werden.

Um die Berechnungen von UGR - Werten vorzustellen, ist diese Programmstrukturierung ausreichend. In dem Kapitel 5.1 werden einige Ansätze für eine praktischere Berechnung der UGR - Tabelle gezeigt.

## 4.3 Bestimmung der spezifischen Leuchtenwerte

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit dem Einlesen und Interpretieren von EULUMDAT - Dateien sowie dem Berechnen der Partiallichtströme und den jeweiligen Lichtaustrittsverhältnissen. Um zuverlässige Ergebnisse erhalten zu können, muss die jeweilige Leuchtendatei einige Anforderungen erfüllen, die kontrolliert werden müssen.

Um allerdings den Aufbau und die eingeführten Begrifflichkeiten besser verstehen zu können, soll die Messung von Licht-Verteilungs-Kurven (Abk. LVK) als Exkurs erläutert werden.

### 4.3.1 Exkurs - Erstellung der Licht-Verteilungs-Kurven von Leuchten

Die Erstellung von EULUMDAT - Dateien erfordert die Messung der sogenannten Licht-Verteilungs-Kurven (o.a. Lichtstärken-Verteilungs-Körper - Abk. LVK) der jeweiligen Leuchte, welche mit speziellen Testaufbauten und Messgeräten vom Hersteller oder Prüflaboren erstellt werden können. Mit Hilfe von Licht-Verteilungs-Kurven kann genau bestimmt werden, wie das Licht aus der jeweiligen Leuchte abgegeben wird. Folgende Bedingungen und Messgeräte werden für die Bestimmung einer LVK benötigt:

- Dunkelraum (schwarze Raumflächen, kein externer Lichteinfall)
- 2-Achsen-Goniometer
- Beleuchtungsstärke-Messgerät

Um die Messung der zu vermessenden Leuchte nicht zu verfälschen, wird ein Dunkelraum benötigt. Dieser soll sowohl externes Licht abschirmen, welches durch andere Lichtquellen erzeugt wird, als auch die Reflexionen der Raumflächen minimieren. Somit wird ein fensterloser, mattschwarzer Raum benötigt, der minimale Raumreflexionen aufweist.

Die Leuchte wird auf ein Goniometer in der normalen Montageposition angebracht, die mit Hilfe zwei Drehachsen die Leuchte in jede Richtung zum Sensor ausrichten kann. In Abhängigkeit der Leuchtenposition, die durch das Goniometer gesteuert wird, werden unterschiedliche Lichtstärken vom Messgerät empfangen. Dieses besteht zumeist aus einem Beleuchtungsstärke-Messgerät, welches mit Hilfe des photometrischen Entfernungsgesetz die jeweilige Lichtstärke ermittelt:

$$I = E \cdot r^2 \cdot \frac{1}{\Omega_0}$$

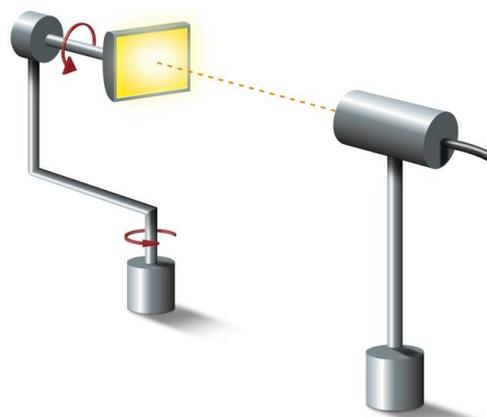


Abbildung 4.3: Lichtmessaufbau mittels 2-Achsen Goniometer<sup>1</sup>

<sup>1</sup>optronik.de, Beschreibung der Goniometertypen)

Mit diesem Aufbau können nun Licht-Verteilungs-Kurven von der montierten Leuchte aufgenommen werden. Dabei werden alle Messungen in einem  $C - \gamma$  - Polarkoordinatensystem abgebildet. Der  $\gamma$ -Winkel bildet hierbei den Höhenwinkel oder auch Elevation-Winkel ab. Der C-Winkel (o.a. Azimuth-Winkel) ist die vertikale Drehung der Leuchte, welcher weiterhin auch C-Ebene genannt wird. Eine C-Ebene besteht aus mehreren Lichtstärke-Werten, die bei bestimmten  $\gamma$ -Winkeln zwischen  $0^\circ$  und  $180^\circ$  gemessen wurden. Bei einem  $\gamma$ -Winkel von  $0^\circ$  zeigt die Leuchte auf das Messgerät (Siehe Abbildung 4.3), wobei ein Winkel von  $180^\circ$  das Wegrichten der Leuchte bewirkt.

Für die Messung einer C-Plane wird die Leuchte um  $180^\circ$  auf der horizontalen Achse gedreht. In definierten Winkelschritten  $\Delta\gamma$  wird eine Lichtstärkemessung durchgeführt und gespeichert. Dabei soll darauf geachtet werden, dass die Leuchte in ihrem eingeschwungenen Zustand vermessen wird. Nach Fertigstellung der jeweiligen C-Plane, wird die Leuchte um den definierten Winkel  $\Delta C$  in der vertikalen Achse gedreht. Dieser Prozess wird solange durchgeführt, bis die Leuchte einmal um die komplette vertikale Achse gedreht wurde. Weiterhin können Symmetrieeigenschaften der Leuchte genutzt werden, um die Messung zu beschleunigen beziehungsweise die zu speichernden Werte zu reduzieren. Diese Eigenschaften werden im folgenden Kapitel näher erläutert.

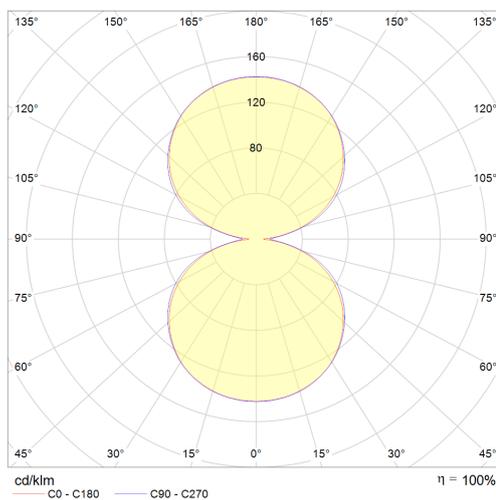


Abbildung 4.4: Darstellung einer LVK <sup>2</sup>

Anhand dieser Daten kann ein LVK - Diagramm erzeugt werden, wie es beispielsweise für eine direkt/indirekt strahlende Leuchte in der Abbildung 4.4 zu sehen ist. Dabei werden ausschließlich nur die C-Planes  $C=0-C=180$  und  $C=90-C=270$  visualisiert, da diese die Abstrahlcharakteristik in X- und Y- Richtung beziehungsweise in Quer- und Längs-Richtung darstellt.

Durch dieses Messverfahren kann weiterhin der Lichtstrom der Leuchte bestimmt werden. Die Berechnung des Lichtstromes kann im Abschnitt 4.3.5 eingesehen werden. Die gemessenen Lichtstärken  $I_g$  werden mit dem bestimmten Lichtstrom  $\Phi_g$  auf  $1000 \text{ lm}$  normiert:

$$I_N = I_g \cdot \frac{1000 \text{ lm}}{\Phi_g}$$

Die normierten Lichtstärken  $I_N$  werden somit in die zu erstellende Leuchtendatei übernommen. Weiterhin werden einige andere Informationen und Parameter zur Leuchte und der jeweiligen Messung für die Erstellung der EULUMDAT - Datei benötigt, die im folgenden behandelt werden sollen.

<sup>2</sup>entnommen aus: LDT-Editor

### 4.3.2 Aufbau und Interpretation von EULUMDAT - Dateien

Das *EULUMDAT* - Format ist in den meisten Ländern Europas der Industriestandard für das Speichern von photometrischen Leuchtendaten. EULUMDAT - Dateien, welche typischerweise mit der Dateiendung *.ldt* abgeschlossen werden, sind zeilenweise strukturierte ASCII - Textdateien. In der Tabelle 4.2 wird der generelle Aufbau des Dateiformat gezeigt. Weiterhin werden die Anzahl der Zeichen pro Zeile begrenzt sowie die benötigten Zeilen für das jeweilige Feld festgelegt:

Feld	Bezeichnung des Feldes	ben. Zeilen	Zeichen pro Zeile
F1.	Firmen-Kennzeichnung / Datenbank / Version ect.	1	78
F2.	Typ-Identifikator / Lichtquellentyp	1	1
F3.	Symmetrie-Identifikator	1	1
F4.	Anzahl der C-Ebenen / C-Planes ( $C_{Anz.}$ )	1	2
F5.	Abstand zwischen den C-Ebenen ( $\Delta C$ )	1	5
F6.	Anzahl der Lichtstärken in jeder C-Ebene ( $\gamma_{Anz.}$ )	1	2
F7.	Abstand zwischen den Lichtstärken ( $\Delta \gamma$ )	1	5
F8.	Messprotokoll-Nr.	1	78
F9.	Leuchten-Name	1	78
F10.	Leuchten-Nummer	1	78
F11.	Datei-Name	1	78
F12.	Datum/Sachbearbeiter	1	78
F13.	Länge/Durchmesser der Leuchte / Gehäuse [mm]	1	4
F14.	Breite der Leuchte / Gehäuse [mm]	1	4
F15.	Höhe der Leuchte / Gehäuse [mm]	1	4
F16.	Länge/Durchmesser der leuchtenden Fläche [mm]	1	4
F17.	Breite der leuchtenden Fläche [mm]	1	4
F18.	Höhe der leuchtenden Fläche C0 [mm]	1	4
F19.	Höhe der leuchtenden Fläche C90 [mm]	1	4
F20.	Höhe der leuchtenden Fläche C180 [mm]	1	4
F21.	Höhe der leuchtenden Fläche C270 [mm]	1	4
F22.	Anteil des unteren halbräumlichen Lichtstroms	1	4
F23.	Leuchtenwirkungsgrad in %	1	4
F24.	Umrechnungsfaktor für Lichtstärkewerte	1	6
F25.	Neigung der Leuchte während der Messung	1	6
F26.	Anzahl der Standard-Lampensätze	1	4
F27.	Anzahl der Lampen	F26	4
F28.	Typ der Lampen	F26	24
F29..	Gesamtlichtstrom der Lampen	F26	12
F30.	Lichtfarbe / Farbtemperatur	F26	16
F31.	Farbwiedergabeklasse / Farbwiedergabeindex	F26	6
F32.	Leistungsaufnahme der Leuchte [W]	F26	8
F33.	Direct Ratios für definierte Raum-Indexe	10	7
F34.	Liste der gemessenen C-Winkel	F4	6
F35.	Liste der gemessenen $\gamma$ -Winkel	F6	6
F36.	normierte Lichtstärke-Werte [cd]	x	6

Tabelle 4.2: Aufbau des EULUMDAT - Dateiformates<sup>3</sup>

<sup>3</sup>DIAL, Wissensdatenbank DIALux 4

Einige der gezeigten Felder enthalten allgemeine Informationen über die Leuchte, sowie über den Hersteller oder die jeweilige Messung, die für die Bestimmung von UGR - Werten nicht relevant sind. Die wichtigsten Felder dieses Dateiformates werden im folgenden weiter beschrieben, da diese Informationen in den nachfolgenden Berechnungen benötigt werden:

#### **F2.: Typ-Identifikator / Lichtquellentyp:**

In dieser Zeile kann der Lichtquellentyp der Lampe angegeben werden. Hierbei können die folgenden Arten mit den jeweiligen Nummern ausgewählt werden:

- 1 → punktartige rotationssymmetrische Leuchte (Symmetrie zur vertikalen Achse)
- 2 → linienartige Leuchte
- 3 → punktartige nicht rotationssymmetrische Leuchte

Diese Identifikation wird allerdings nicht weiter benötigt und wurde hier für die Vollständigkeit aufgenommen.

#### **F3.: Symmetrie-Identifikator:**

Die Art der Symmetrie wird in diesem Feld durch eine numerische Ziffer gekennzeichnet. Folgende Symmetrie-Eigenschaften werden mit den folgenden Ziffer gekennzeichnet:

- 0 → keine Symmetrie
- 1 → Symmetrie zur vertikalen Achse (Rotations-Symmetrisch)
- 2 → Symmetrie zur Ebene C0-C180
- 3 → Symmetrie zur Ebene C90-C270
- 4 → Symmetrie zur Ebene C0-C180 und C90-C270

Durch eine Symmetrieeigenschaft der Leuchte, können C-Ebenen gespiegelt bzw. mit der jeweiligen Symmetrieebene gleichgesetzt werden.

Ist beispielsweise eine Leuchte symmetrisch zu der Ebene C0-C180, so können alle Lichtstärke-Werte der C0 - Ebene in die C180 - Ebene kopiert werden. Weiterhin können die Ebenen C=5-C195, C30-C210 und weitere gleichgesetzt werden. Somit benötigt die Datei nur die Lichtstärke-Werte von den C-Ebenen von 0° bis 180°. Bei runden Leuchten (Rotationssymmetrisch) wird nur eine C-Ebene benötigt, da alle anderen dieser gleichen. Bei der Symmetrieeigenschaft Nr. 4 werden die Ebenen von 0° bis 90° angegeben, da C0 = C180, C90 = C270, C15=C165=C195=C345 usw. entsprechend.

#### **F4. bis F7.: Anzahl und Winkelintervalle der C- und $\gamma$ -Winkel**

Die jeweiligen Eintragungen in diesen Felder wird für das Einlesen der jeweiligen C- und  $\gamma$ -Winkelwerte sowie für die Zuordnung der Lichtstärke-Werte benötigt.

#### **F13. bis F21.: Abmessung der Leuchte und der leuchtenden Fläche**

Die Abmessungen sowohl für das Gehäuse der Leuchte als auch für die leuchtende Fläche werden jeweils in Millimeter angegeben. Diese Angaben werden für die Berechnung der sichtbaren Leuchtfläche benötigt. In diesem Dateiformat kann lediglich nur zwischen rechteckigen/quaderförmigen und runden/zylinderförmigen Leuchten unterschieden werden.

Bei der Messung von runden Leuchten beziehungsweise von runden Leuchtflächen muss die Breite der Leuchte / der leuchtenden Fläche (F14 / F17) auf 0 gesetzt werden. Somit wird der Wert für die Länge der Leuchte / der leuchtenden Fläche als Durchmesser interpretiert.

Weitere Details werden im Kapitel 4.5.2 behandelt.

### **F24.: Umrechnungsfaktor für Lichtstärkewerte**

Bei Leuchten mit sehr hohen Lichtstärke-Werten wird ein Umrechnungsfaktor benötigt, welcher auf jeden Lichtstärkewert multipliziert wird. Bei den meisten Leuchtendateien ist diese auf 1 gesetzt, sodass keine Änderungen benötigt wird.

### **F26.: Anzahl der Standard-Lampensätze**

Einige Leuchten-Hersteller bieten Leuchtenserien mit unterschiedlichen Lampenbestückungen an. Da der Aufbau der Leuchte sowie die jeweilige Form der Lichtverteilungskurven sich zumeist nicht ändert, können die Daten der unterschiedlichen Lampenbestückungen in der selben LDT - Datei abgespeichert werden.

Das Feld F26 zeigt die jeweilige Anzahl von unterschiedlichen Lampenbestückungen. Je nachdem wie viele unterschiedliche Lampenbestückungen existieren, werden die nachfolgenden Felder F27 bis F32 für die einzelnen Bestückungen gespeichert. Nach dem Feld F32 des ersten Lampensets, wird in der nächsten Zeile das Feld F27 des zweiten Lampensets aufgeführt. Somit werden die Felder F27 bis F32 für alle Lampenbestückungen wiederholt aufgenommen. Diese Information wird vor allem für das Einlesen von LDT - Dateien benötigt. Zumeist wird nur ein Lampenset in einer LDT - Datei angegeben (F26 = 1), sodass keine weiteren Anpassungen benötigt werden.

### **F33.: Direct Ratios für definierte Raum-Indizes:**

Die Berechnung des Direct Ratio (DR) sowie des Raum-Indizes wird im Kapitel 4.6 weiter behandelt. In der LDT-Datei werden 10 Direkt Ratios für folgende Raum-Indizes gespeichert:

$$RI : 0.60 / 0.80 / 1.00 / 1.25 / 1.50 / 2.00 / 2.50 / 3.00 / 4.00 / 5.00$$

Diese Werte werden für die Ermittlung der Leuchten-Anzahl eines Raumes nach dem Wirkungsgrad-Verfahren der LiTG 5 genutzt. Für die UGR - Berechnung können diese nicht eingesetzt werden, da noch weitere Raum-Indizes für die Berechnung der UGR - Tabelle benötigt werden.

### **F34 und F35.: Auflistung der C- und $\gamma$ - Werte:**

Diese Felder geben alle C- und  $\gamma$ -Winkel an, die für die Licht-Verteilungs-Kurven relevant sind. Die Felder F4 und F6 zeigen hierbei an, wie viele Werte für dieses Feld gespeichert wurden. Dabei wird immer bei dem Winkel  $0^\circ$  begonnen.

### **F36.: Normierten Lichtstärke-Werte:**

Am Ende der Datei werden die gemessenen Lichtstärke-Werte der jeweiligen Leuchte gespeichert. Dabei werden die Werte chronologisch nach den gemessenen C-Ebenen beginnend mit C0 sortiert. Die Werte in den einzelnen C-Ebenen werden ebenfalls sukzessiv nach den entsprechenden  $\gamma$ -Werten beginnend mit  $\gamma = 0^\circ$  sortiert. Nach dem letzten Lichtstärke-Wert der jeweiligen C-Ebene, wird die nächste C-Ebene bei  $\gamma = 0^\circ$  angefangen. Für die Nutzung der eingelesenen Lichtstärke-Werte wird zumeist eine tabellarische Form gewählt. Somit können die einzelnen Werte der LVK in Abhängigkeit der jeweiligen C-Ebene und des  $\gamma$ - Winkels ermittelt werden, die in F34 und F35 angegeben sind.

### 4.3.3 Einlesen von EULUMDAT - Dateien

Mit den gegebenen Informationen über das Dateiformat, kann nun eine Einlesefunktion für LDT - Dateien erzeugt werden. Die Auswahl der jeweiligen Datei durch den Benutzer kann durch die Wahl der Programmiersprache auf unterschiedliche Art realisiert werden. Auch das Speichern der Werte aus der ausgewählten Datei kann variieren.

In dem Programmbeispiel, welches mit *MATLAB* realisiert wurde, wurde die Auswahl der LDT-Datei mit Hilfe der Funktion *uigetfile()* realisiert. Diese Funktion erstellt eine von dem jeweils verwendeten Betriebssystem übliche Dialogbox für die Auswahl einer Datei. Diese LDT - Datei wird nun zeilenweise ausgelesen. Diese ausgelesenen Zeilen sollen nun in einer Struktur gespeichert werden, die als Feldnamen die verwendete Bezeichnung aus der Tabelle 4.2 ausweist. Die genutzten Datentypen mit der jeweiligen Matrixgröße wurden in der Tabelle 4.3 eingetragen.

Feld	Datentyp	Matrixgröße
F1	String	1x1
F2 bis F7	Double	1x1
F8 bis F12	String	1x1
F13 bis F27	Double	1xF27
F28	Cell	1xF27
F29	Double	1xF27
F30 bis F32	Cell	1xF27
F33	Double	10x1
F34	Double	F4x1
F35	Double	F6x1
F36	Double	F6xF4

Tabelle 4.3: MATLAB - Datentypen in der Struktur *LDT*

Die ersten 26 Zeilen der LDT - Datei können zu den jeweiligen Feldern der Struktur zugewiesen werden. Lediglich eine Konvertierung von *String* zu *Double* muss für einige Felder erfolgen. Bei dem Auslesen des Feldes F26 wird festgestellt, wie viele Lampensets in dieser LDT - Datei vorhanden sind. Hier müssen die Felder F27 bis F32 bei mehreren Leuchtensets, mehrmals befüllt werden. Das gleiche Prinzip muss bei den weiteren Feldern angewandt werden, wobei die Anzahl der Werte für das Feld F33 definiert ist. Für das Einlesen der Lichtstärke-Werte sollen nur Werte eingelesen werden, die mit der Nutzung der Symmetrieeigenschaften benötigt werden.

Eine beispielhafte Implementierung anhand dieser Informationen kann im Anhang (Kap. 9.1.1) betrachtet werden.

### 4.3.4 Verifizierung und Korrektur der eingelesenen EULUMDAT - Dateien

Da die Erstellung von EULUMDAT - Dateien die Möglichkeit bietet, unterschiedliche Winkelabstände für die C-Ebenen und der  $\gamma$ -Winkel für die Messung von Leuchten zu definieren, wurde von der *DIN EN 13032-2* eine normalisierte Lichtstärke-Tabelle eingeführt. Mit dieser Festlegung der Winkelabstände möchte man das Fehlerpotential der Interpolationen zwischen den einzelnen C-Ebenen minimieren. In der UGR - Berechnung wird die Interpolation bei der Bestimmung der Direktblendung benötigt, die im Kapitel 4.5.4 beschrieben wird. Folgende Bestimmungen für die Messung von unterschiedlichen Leuchten sollen eingehalten werden:

Lichtstärkeverteilung	C-Ebenen
Rotationssymmetrisch	Eine C-Ebene
Symmetrisch in zwei Ebenen	Alle 15° von 0° bis 90°
Symmetrisch in einer Ebenen	Alle 15° von 0° bis 90° oder von 90° bis 270°
Asymmetrisch	Alle 15° von 0° bis 360°

Tabelle 4.4: Geforderte C-Ebenen von Leuchtsymmetrien nach *DIN EN 13032-2* <sup>4</sup>

Leuchtentyp	Unterer Lichtstromanteil	$\gamma$ -Winkel
Direktstrahlend	> 0.9	Alle 5° von 0° bis 90°
Indirekt/Direktstrahlend	0.1 bis 0.9	Alle 5° von 0° bis 180°
Indirektstrahlend	< 0.1	Alle 5° von 90° bis 180°

Tabelle 4.5: Geforderte  $\gamma$ -Ebenen von Leuchtentypen nach *DIN EN 13032-2* <sup>4</sup>

Aus diesen Tabellen kann abgeleitet werden, dass die Anzahl der bestimmbareren C-Ebenen nicht unter 24 unterschiedliche Ebenen liegen darf. Weiterhin müssen diese Ebenen mit einem  $\gamma$ -Winkelintervall von 5° aufgenommen werden. Hierbei können die Messwerte von direkt- oder indirekt-strahlenden Leuchten reduziert werden, da diese keinerlei Informationen enthalten. Da diese Menge an Messwerten nicht für jede Messung aufgenommen werden soll, insbesondere wenn der Hersteller Testmuster von Leuchten überprüfen möchte, soll die UGR - Berechnung mit einer geringeren C-Ebenenanzahl durchführbar sein. Folgende minimale Winkelabstände wurden für die Berechnung der UGR - Tabelle definiert:

- Rotationssymmetrische Leuchten: Eine C-Ebene
- Leuchten mit zwei Symmetrieachse: max. Winkelintervall der C-Ebenen von 45°
- Leuchten mit einer Symmetrieachse: max. Winkelintervall der C-Ebenen von 30°
- Asymmetrische Leuchten: max. Winkelintervall der C-Ebenen von 15°
- max.  $\gamma$ -Winkelintervall: 5°

Diese Definitionen sind die Minimalanforderungen für die Berechnung eines zuverlässigen Blendbewertungswertes. Die jeweilig angegebenen Winkelintervalle der LDT - Datei können für das Prüfen der Minimalanforderung genutzt werden.

<sup>4</sup>13032-2, *Messung und Darstellung photometrischer Daten von Lampen und Leuchten - Teil 2*

Ein häufig in der Lichtmessung auftretender Fehler ist die Überbestimmung des Nullpunktes der Lichtverteilung. Bei dem beschriebenen Messverfahren in dem Kapitel 4.3.1 wird bei der Messung von mehreren C-Ebenen die Position, in der die Leuchte genau auf das Messgerät gerichtet ist ( $\gamma = 0^\circ$ ), bei jeder C-Ebene gemessen. Diese Position ist für jede C-Ebene gleich und sollte theoretisch den gleichen Lichtstärke-Wert besitzen. Aufgrund von Messungenauigkeiten durch den Sensor, der Bewegungsgeschwindigkeit oder auch von schwankenden elektrischen oder thermischen Einflüssen, kann diese Position unterschiedliche Werte einnehmen, was somit zu einer Verzerrung der Licht-Verteilungs-Kurve führt.

In der Abbildung 4.5 wird ein Beispiel für eine direkt strahlenden Licht-Verteilungs-Kurve gezeigt, dessen Nullpunkt zwischen der C0-C180 Ebene und der C90-C270 Ebene stark abweicht. Somit entsteht eine Verzerrung im Körper der Lichtverteilung.

Um zu Überprüfen, ob dieser Effekt bei der eingelesenen Leuchtendatei unterdrückt wurde, müssen die ersten Werte jeder C-Plane miteinander verglichen werden. Falls alle Werte annähernd gleich sind, wird keine Nachberechnung benötigt.

Für den Ausgleich der jeweiligen C-Planes können mehrere Korrekturverfahren angewendet werden. Die meist verbreitetste Berechnung ist die Bestimmung des Mittelwertes über die Anfangswerte der jeweiligen C-Ebene. Für jede C-Ebene wird ein Korrekturfaktor ermittelt, der auf jeden Wert angewendet wird.

Somit kann eine Berechnung für das Beheben dieses Effektes entwickelt werden, welche im Anhang (Kap. 9.1.2) zu sehen ist.

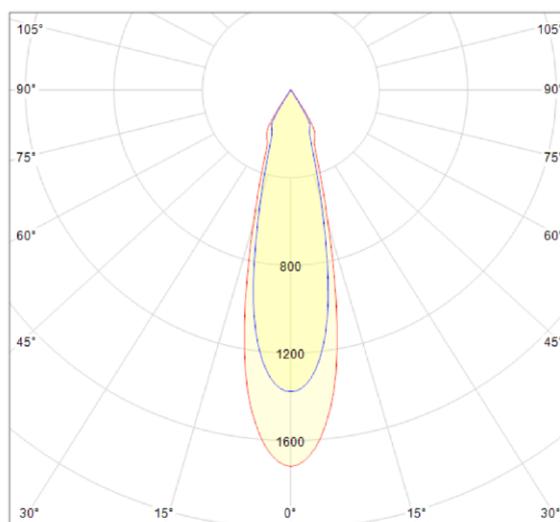


Abbildung 4.5: Verzerrte Licht - Verteilungs - Kurve (modifiziertes Beispiel)<sup>5</sup>

Um die weiteren Berechnungen zu vereinfachen, werden die jeweiligen Symmetrieeigenschaften der Leuchten in die Lichtstärke-Tabellen übernommen. Bei dem Einlesevorgang werden die jeweiligen C-Ebenen nur bis zu einem definierten Winkel eingelesen und gespeichert, da sich die Daten wiederholen würden und es zu keinem Informationsgewinn führt. Somit kann die Tabelle der Lichtstärke-Werte mit diesen Eigenschaften erweitert werden, sodass die C-Ebenen um  $360^\circ$  mit den entsprechenden Winkelabständen abgeschlossen werden. Diese Erweiterung kann aus den Informationen im Kapitel 4.3.2 erstellt werden.

<sup>5</sup>ent. LDT-Editor, entnommen aus dem LDT - EDITOR von DIAL

### 4.3.5 Bestimmung von Partiallichtströmen und Betriebswirkungsgrade der Leuchte

Die Partiallichtströme (engl. Zonal Flux) sind Teillichtströme einer Leuchte oder Lampe, die bis zu einem gewissen  $\gamma$ -Winkel abgegeben werden.

Diese Lichtströme werden mit Hilfe des Zonenmultiplikations-Verfahren bestimmt, welches den Lichtstromanteil von rotationssymmetrischen Lichtstärke-Verteilungen auf eine parallele, rechteckige gestrahlte Fläche bestimmt.

Dabei wird angenommen, dass die Licht-Verteilung der Leuchte einer Kugeloberfläche gleicht. Dieses Verfahren wird in der LiTG 3.5 und in der CIE 52-1982 erläutert.

Da auch nicht rotationssymmetrische Leuchten bestimmt werden sollen, wird von der Lichtstärketabelle der Mittelwert über alle  $\gamma$ -Winkel bestimmt, sodass mit einer gemittelten C-Ebene weiter gerechnet werden kann. Die Bestimmung des Teillichtstromes kann mit Hilfe des Raumwinkels und der Lichtstärke der gemittelten, rotationssymmetrischen

C-Ebene bestimmt werden. Der Raumwinkel sollte dabei mittig um den jeweiligen  $\gamma$ -Winkel des Lichtstärke-Wertes liegen. Da diese  $\gamma$ -Winkel in einem festen Winkelintervall gemessen wurden, kann jeweils die Hälfte dieses Winkelintervalls um den jeweiligen  $\gamma$ -Winkel des Lichtstärke-Wertes für die Berechnung des Raumwinkels genutzt werden. In Abbildung 4.6 wird ein Beispiel für das Aufstellen des Raumwinkels durch die Winkel  $\gamma_1$  und  $\gamma_2$  um den Lichtstärke-Wert  $\gamma_m$  gezeigt. Der Raumwinkel des Beispiels kann durch die Kugeloberfläche mit folgender Formel berechnet werden:

$$\Omega_m = 2 \cdot \pi \cdot (\cos(\gamma_1) - \cos(\gamma_2))$$

$$\text{mit } \gamma_1 = \gamma_m - \frac{\Delta\gamma}{2} \quad \text{und} \quad \gamma_2 = \gamma_m + \frac{\Delta\gamma}{2}$$

Die Raumwinkel für die Lichtstärke-Werte der Winkel  $\gamma = 0^\circ$  und  $\gamma = 180^\circ$  müssen allerdings von der gezeigten Berechnungsformel abweichen, da es in einer C-Ebene keine  $\gamma$ -Winkel unter  $0^\circ$  oder  $180^\circ$  existieren. Somit werden beispielsweise die Winkel  $0^\circ$  und  $\Delta\gamma/2$  für den ersten Lichtstärke-Wert verwendet. Wird der Winkelwert von  $180^\circ$  überschritten, so kann dieser auch auf diese Grenze reduziert werden. Mit diesen Raumwinkeln können nun die jeweiligen Teillichtströme bestimmt werden:

$$\Phi_{\gamma_i + \frac{\Delta\gamma}{2}} = I_{\gamma(i)} \cdot \Omega_i$$

Diese Verschiebung der Teillichtströme um  $\Delta\gamma/2$  wird durch die Anpassung des ersten und letzten Raumwinkels erzeugt. Für diese Berechnung müssen die Normierung der Lichtstärke-Werte aufgehoben werden. Für die weiteren Berechnungen werden allerdings die normierten Werte benötigt.

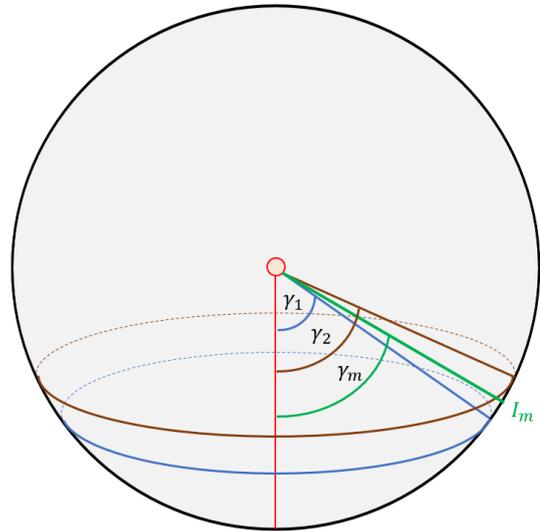


Abbildung 4.6: Bestimmung des Lichtstromes unter dem Winkel  $\gamma_m$ <sup>6</sup>

<sup>6</sup>vgl. LiTG, *Projektierung von Beleuchtungsanlagen nach dem Wirkungsgradverfahren*

Durch die Aufsummierung der einzelnen Teillichtströme, jeweils beginnend von dem ersten Teillichtstrom aus, kann das Partiallichtstrom-Diagramm erstellt werden, welches in Abhängigkeit des Raumwinkels  $\Omega$  bzw. des Winkels  $\gamma$  den jeweiligen Lichtstrom vom Ursprung anzeigt. In der Abbildung 4.7 wird für eine direkt/indirekt strahlende Leuchte diese Summation der Teillichtströme durchgeführt, dessen Licht-Verteilungs-Kurve in der Abbildung 4.8 zu sehen ist.

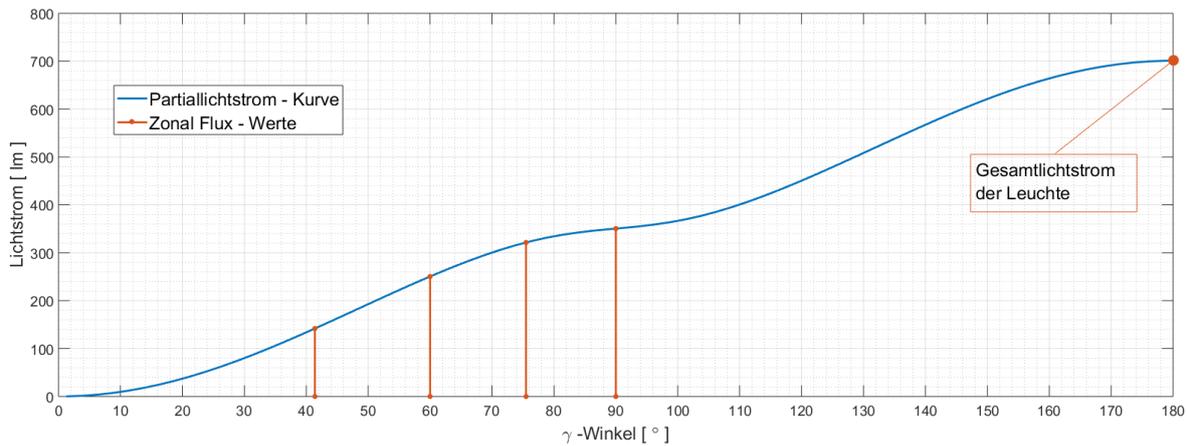


Abbildung 4.7: Verlauf des Partiallichtstromes einer Direkt-Indirekt- strahlenden Leuchte

Für die weiteren Berechnungen werden spezielle Werte der Partiallichtströme benötigt, die mit einem gewissen Raumwinkel von der Leuchte abgegeben werden. Die benötigten Raumwinkel und deren äquivalenten  $\gamma$ -Winkel können sowohl aus der Abbildung 4.7 als auch aus der nachfolgenden Tabelle entnommen werden:

Wert	$FC_1$	$FC_2$	$FC_3$	$FC_4$
Raumwinkel:	$\pi/2$	$\pi$	$3\pi/2$	$2\pi$
$\gamma$ -Winkel:	41,4	60,0	75,5	90,0

Tabelle 4.6: Benötigte Raumwinkel - /  $\gamma$ -Winkel - Werte für die Zonal-Flux - Werte

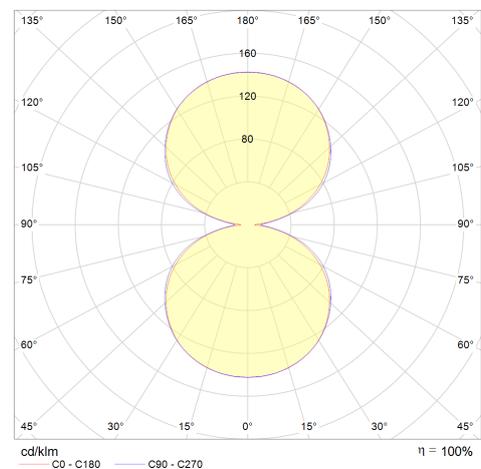


Abbildung 4.8: Berechnete Lichtverteilungskurve

Aufgrund der Herkunft dieser speziellen Lichtströme aus der CIE 52-1982, werden diese Werte *Zonal-Flux* - Werte für die weiteren Berechnungen genannt.

Da nicht alle  $\gamma$ -Werte für die Bestimmung dieser Werte vorhanden sind, müssen diese durch eine lineare Interpolation angenähert werden.

Für die Bestimmung der Betriebswirkungsgrade der Leuchte wird weiterhin die Summe aller Teillichtströme über alle  $\gamma$ -Werte benötigt. Die Summe ist der Lichtstrom der Leuchte und kann mit dem angegebenen Lichtstrom der LDT - Datei (LDT.F29) verglichen werden. Somit wird der Betriebswirkungsgrad der gesamten Leuchte (engl. Light Output Ratio, Abk.: LOR) bestimmt. Weiterhin kann der untere sowie der obere Betriebswirkungsgrad der Leuchte (engl. Downward Light Output Ratio / Upward Light Output Ratio, Abk.: DLOR / ULOR) mit den folgenden Berechnungen bestimmt werden:

$$LOR = \frac{\varphi(0^\circ - 180^\circ)}{LDT.F29}$$

$$DLOR = \frac{FC_4}{LDT.F29}$$

$$ULOR = LOR - DLOR$$

In einigen Verfahren für die Bestimmung der Hintergrundleuchtdichte wird nicht mit den absoluten Zonal-Flux - Werten gerechnet sondern mit relativen Größen, die in der CIE 52-1982 als *Flux-Code* vorgestellt wurden. Dieser fünfstellige Code berechnet für die ersten drei Werte das Verhältnis von  $FC_{1-3}$  mit  $FC_4$ . Des Weiteren wird auch der Betriebswirkungsgrade der Leuchte und das Verhältnis mit dem unteren Betriebswirkungsgrad in diesen Code eingepflegt, welcher im folgenden berechnet wird:<sup>7</sup>

$$N_1 = \frac{FC_1}{FC_4} \quad N_2 = \frac{FC_2}{FC_4} \quad N_3 = \frac{FC_3}{FC_4} \quad N_4 = \frac{DLOR}{LOR} \quad N_5 = LOR$$

Zusammenfassend zeigen die nachfolgenden Tabellen die benötigten Parameter sowie die daraus resultierenden Ergebnisse dieses Berechnungsabschnittes. Der sich im Anhang befindende Pseudocode (Kap. 9.1.1) zeigt den Ablauf und die Berechnungen für die Bestimmung der Betriebswirkungsgrade und der Zonal Flux - Werte der eingelesenen Leuchtdatei.

<b>Parameter</b>	<b>Bez.</b>	<b>Ergebnis</b>	<b>Bez.</b>
- Verfügbare $\gamma$ -Winkel	LDT.F35	- Zonal-Flux - Werte	FC
- $\gamma$ -Winkelabstand	LDT.F7	- Flux Code	N
- Lichtstärke-Tabelle	LDT.F36	- Betriebswirkungsgrad	LOR
- Lichtstrom der Leuchte	LDT.F29	- unterer Betriebswirkungsgrad	DLOR
		- oberer Betriebswirkungsgrad	ULOR

<sup>7</sup>CIE 52-1982, *Calculation for Interior Lighting, Applied Method.*

## 4.4 Positionierung von Leuchten und Beobachter im Standardraum

Die Berechnungsabschnitte der Direktblendung sowie der Bestimmung der Hintergrundlichtdichte benötigen die Positionen der Leuchten in der rechteckigen Anordnung des jeweiligen Standardraumes. Die grundsätzliche Positionierung der Leuchten sowie die Bedeutung und Auswirkungen des "Space to Height - Ratio" wurden im Abschnitt 3.2.2 erläutert.

Diese Angabe wird für den Abstand der jeweiligen Leuchten untereinander benötigt. Mit  $SHR = S/H$  kann der Abstand  $S$  in Abhängigkeit der Höhe  $H$  zwischen Beobachter und Leuchten berechnet werden. Diese Höhe ist mit  $H = 2m$  in dem Tabellenverfahren definiert worden.

In der Abbildung 4.9 ist der Aufbau der Leuchtenanordnung mit den jeweiligen Abständen zu weiteren Leuchten sowie zu Wandflächen eingezeichnet. Die Positionierung des Beobachters soll für das Tabellenverfahren mittig an der unteren Wandfläche gesetzt werden. Für die weiteren Berechnungen ist es sinnvoll, die Beobachterposition als Ursprung für die Leuchtenposition zu wählen. Somit sollen die Leuchten, die links von dem Beobachter liegen, mit einer negativen X-Position versehen werden.

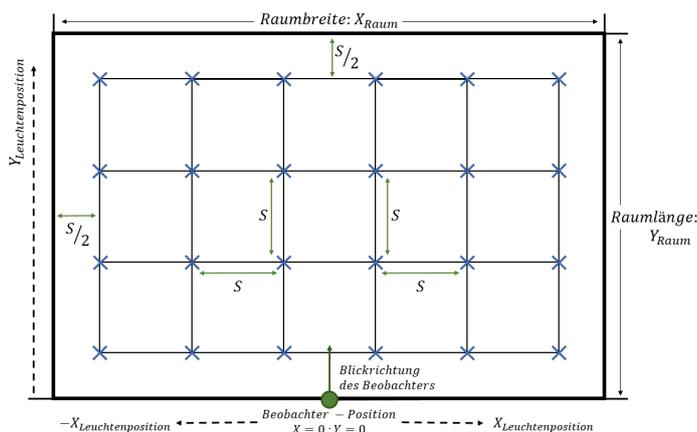


Abbildung 4.9: Bestimmung der Leuchtenpositionen im Standardraum<sup>8</sup>

Die horizontale Entfernung wird durch die Y - Position vorgegeben, die bei dieser Beobachterposition immer positiv ist. Die Raumdimension geben hierbei nur die Begrenzung für die Anordnung der Leuchten an. Die Speicherung der X- und Y-Positionen werden hier in Vektoren gesetzt, welche in der Struktur *Luminaire* gesetzt wurden. Diese Struktur soll für die folgenden Ergebnisse sowie für die weiteren Berechnungen genutzt werden

Somit können mit folgenden Parametern die Leuchtenpositionen für die UGR - Berechnung bestimmt werden. Der dazugehörige Pseudocode wird im Anhang (Kap. 9.2) gefunden.

Parameter	Bez.	Ergebnis	Bez.
- Raumdimension in X / Y	Room.X / Y	- Leuchten - Position X	Luminaire.X / Y
- Höhe H	H	- Leuchten - Anzahl	Luminaire.Counter
- Spacing to Height - Ratio	SHR		

<sup>8</sup>vgl. CIE 190-2010, *Calculation and Presentation of Unified Glare Rating Tables for Indoor Lighting Luminaires*

## 4.5 Bestimmung der Direktblendung

In diesem Abschnitt sollen die Berechnungen für die Bestimmung der Direktblendung des Beobachters durch die jeweiligen Leuchten dokumentiert werden. Die Positionen der Leuchten im Standardraum wurden im Abschnitt 4.4 erläutert und werden für die Berechnungen der folgenden Parameter benötigt:

### Berechnung der Direktblendung:

- Distanz zw. Beobachter und Leuchte (  $r$  ) - Azimuth- und Elevation-Winkel (  $C / \gamma$  )
- sichtbare leuchtende Fläche (  $A_p$  ) - Positionsindex (  $P$  )
- Lichtstärke-Wert zum Beobachter (  $I_{C/\gamma}$  )

Mit diesen Parametern kann der Direktblendungsanteil der UGR-Formel (siehe Kapitel 3.1) für die Quer- und Längsrichtung der Leuchte folgendermaßen berechnet werden:

$$UGR_d = 8 \cdot \log_{10} \left( \underbrace{\frac{1}{4} \cdot \sum_{k=1}^N \frac{I_{C\gamma}(k)^2}{A_p(k) \cdot r(k)^2 \cdot P(k)^2}}_{\text{Direktblendung}} \right)$$

mit :  $N = \text{Anzahl der Leuchten (Luminaire.Counter)}$

### 4.5.1 Berechnung der Distanz zwischen Beobachter und Leuchte und des Sichtwinkels

Für die Bestimmung der sichtbaren leuchtenden Fläche und dem Lichtstärke-Wert der jeweiligen Leuchte zum Beobachter wird die Distanz sowie der jeweilige  $C$ - und  $\gamma$ -Winkel (Azimuth- und Elevation-Winkel) zwischen der Leuchte und der Beobachterposition benötigt.

In der Abbildung 4.10 wird diese Berechnung visuell dargestellt. Für die Distanzberechnung wird angenommen, dass sich der Mittelpunkt der Leuchte an der jeweiligen  $X$ - und  $Y$ -Position befindet. Da die Höhe  $H$  auf 2 Meter durch das Tabellenverfahren festgelegt sowie die Positionierung des Beobachters im Ursprung gesetzt wurde, ist die Berechnung der Distanz der  $k$ -ten Leuchte durch die folgende Formel leicht zu berechnen.

$$r_k = \sqrt{X(k)^2 + Y(k)^2 + H^2}$$

Die Berechnung des Höhenwinkels ( $\gamma$ -Winkels) ist mit dieser Distanz und der festgelegten Höhe mit folgender Berechnung bestimmbar:

$$\gamma_k = \arccos \left( \frac{H}{r(k)} \right)$$

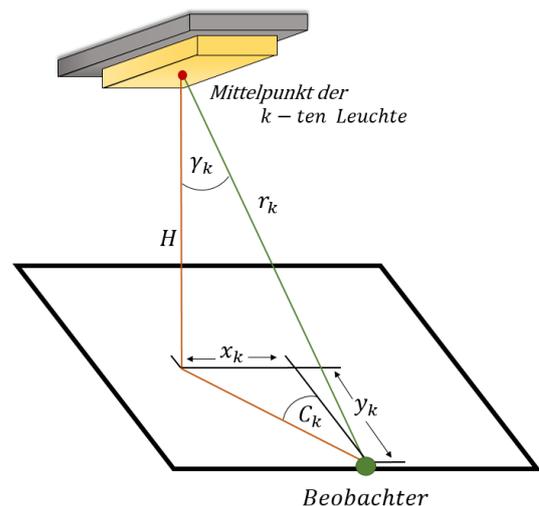


Abbildung 4.10: Distanz- und Winkel-Berechnung von Leuchte zum Beobachter<sup>9</sup>

<sup>9</sup>vgl. CIE 190-2010, *Calculation and Presentation of Unified Glare Rating Tables for Indoor Lighting Luminaires*

Für die Berechnung des C-Winkels wird zwischen der Quer- und Längsrichtung der Leuchte unterschieden. Weiterhin muss darauf geachtet werden, ob die jeweilige Leuchte sich links oder rechts vom Beobachter befindet.

Der C-Winkel für die Queransicht der Leuchten kann durch die vereinfachte Beobachterposition im Ursprung folgendermaßen berechnet werden:

$$C_{\text{Queransicht}}(k) = \arctan\left(\frac{X_k}{Y_k}\right)$$

Jede Leuchte die links vom Beobachter positioniert wurde, wird einen negativen Winkel aufweisen. Somit müssen diese Ergebnisse mit kompletten Drehung von  $360^\circ$  korrigiert werden. Die C-Winkel für die Längsrichtung der Leuchten wird durch die Addition einer Vierteldrehung mit  $90^\circ$  bestimmt:

$$C_{\text{Längsansicht}}(k) = \arctan\left(\frac{X_k}{Y_k}\right) + 90$$

Da durch die Vierteldrehung keine negativen Ergebnisse entstehen können, wird hier keine Anpassung benötigt.

Somit können aus den Leuchtenpositionen und der Höhe die benötigten Winkel und die Distanz jeder Leuchte zum Beobachter berechnet werden. Diese Parameter und die daraus resultierenden Ergebnisse sind in folgenden Tabelle festgehalten:

<b>Parameter</b>	<b>Bez.</b>	<b>Ergebnis</b>	<b>Bez.</b>
- Leuchtenpositionen	Luminaire.X / Y	- Distanz	Luminaire.r
- Höhe H	H	- C-Winkel Querrichtung	Luminaire.azimuth_c
		- C-Winkel Längsrichtung	Luminaire.azimuth_e
		- $\gamma$ -Winkel	Luminaire.elevation

### 4.5.2 Berechnung der sichtbaren Leuchtfläche

Mit den berechneten Distanzen und Winkeln können nun die sichtbaren, leuchtenden Flächen der Leuchten, von der Beobachterposition aus gesehen, berechnet werden. Für diese leuchtenden Flächen werden ebenfalls die angegebenen Abmessungen der Leuchte aus der LDT - Datei benötigt. Da das EULUMDAT - Format die Maße des Gehäuses und der leuchtenden Fläche nur in Länge / Breite / Höhe speichern kann, können nur die rechteckige / quaderförmige oder runde / zylinderförmige Leuchten berechnet werden, wie auch schon im Kapitel 4.3.2 beschrieben wurde.

In den Abbildungen 4.11 und 4.12 sind quaderförmige und zylinderförmige Leuchten mit den jeweiligen Teilflächen gezeigt. Rechteckige und runde Leuchten besitzen keine Höhe in den leuchtenden Flächen. Somit sind die Seiten- und Frontflächen nicht existent.

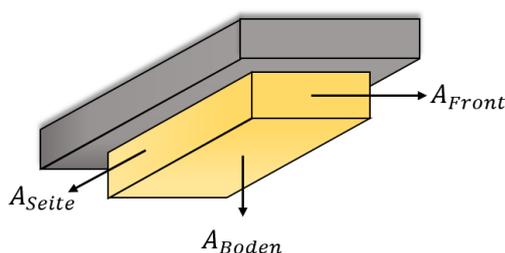


Abbildung 4.11: Sichtbare leuchtende Flächen bei quaderförmigen Leuchten<sup>10</sup>

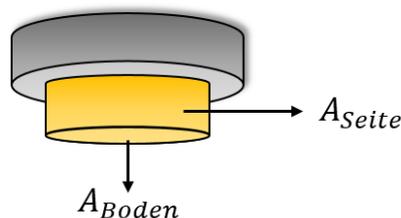


Abbildung 4.12: Sichtbare leuchtende Flächen bei zylinderförmigen Leuchten

Für die Berechnung muss zunächst unterschieden werden, ob die eingelesene LDT - Datei eine Leuchte mit einer runden oder einer eckigen Lichtaustrittsfläche beschreibt. Bei runden Flächen wird die Angabe der Breite (LDT.F17) auf Null gesetzt. Der Durchmesser ist somit von der Längenangabe der LDT - Datei (LDT.F16) zu entnehmen.

Weiterhin werden die Höhe der leuchtenden Fläche durch vier Parameter angegeben, die die Höhe um 90° versetzt voneinander angeben. Somit können komplexere Formen nachgebildet werden. Um diese Berechnung einfach zu halten, wird hier der Mittelwert der Höhen ( $Luminaire\_height = mean(LDT.F18 - F21)$ ) ermittelt, welcher als Einheitshöhe der Leuchte genutzt wird. Diese Vereinfachung führt zu einem Fehler in der Leuchtfläche bei unterschiedlichen Abmessungen der Höhen. Für die meisten Leuchten werden nur einfache Formen verwendet, sodass die sichtbare, leuchtende Fläche exakt berechnet werden kann. Mit den Abmessungen aus der LDT - Datei und den bereits berechneten Ergebnissen können die sichtbaren leuchtenden Flächen mit den folgenden Formeln berechnet werden:

<sup>10</sup>vgl. CIE 190-2010, *Calculation and Presentation of Unified Glare Rating Tables for Indoor Lighting Luminaires*

**Für runde/zylinderförmige Leuchten:**

$$A_{Boden} = \frac{LDT.F16}{2} \cdot \pi \cdot 10^{-6}$$

$$A_{Front} = LDT.F17 \cdot Luminaire\_height \cdot 10^{-6}$$

$$A_{crosswise}(i) = A_{Bottom} \cdot \cos(\gamma(i)) + A_{Front} \cdot \sin(\gamma(i))$$

$$A_{endwise}(i) = A_{crosswise}(i)$$

**Für rechteckige/quaderförmige Leuchten:**

$$A_{Bottom} = LDT.F16 \cdot LDT.F17 \cdot 10^{-6}$$

$$A_{Front} = LDT.F17 \cdot Luminaire\_height \cdot 10^{-6}$$

$$A_{Side} = LDT.F16 \cdot Luminaire\_height \cdot 10^{-6}$$

$$A_{crosswise}(i) = A_{Bottom} \cdot \frac{H}{r(i)} + A_{Side} \cdot \frac{|X(i)|}{r(i)} + A_{Front} \cdot \frac{Y(i)}{r(i)}$$

$$A_{endwise}(i) = A_{Bottom} \cdot \frac{H}{r(i)} + A_{Side} \cdot \frac{Y(i)}{r(i)} + A_{Front} \cdot \frac{|X(i)|}{r(i)}$$

Die Berechnung von Leuchten mit einer kugelförmigen Lichtaustrittsfläche können ebenfalls durch einige Annahmen in der LDT - Daten durchgeführt werden. Falls die eingeleseene Leuchte rund ist, die Höhen der jeweiligen C-Ebenen (LDT.F18 - 21) mit der Gehäusehöhe (LDT.F16) gleich groß sind, kann die Leuchte als kugelförmig angenommen werden. Die gesehene Oberfläche von jeder Position des Beobachters ist immer eine Halbkugel mit dem angegebenen Durchmesser aus der LDT - Datei (LDT.F16 / F18-21). Diese Abfrage ist allerdings nicht durch das EULUMDAT - Format vorgesehen wird aber von einigen Herstellern von Lichtberechnungsprogrammen genutzt.<sup>11</sup>

Die folgende Tabelle zeigt die benötigten Parameter für die Bestimmung der sichtbaren leuchtenden Fläche der Leuchten. Weiterhin wird im Anhang ein entsprechender Pseudocode für diese Berechnung vorgefunden.

<b>Parameter</b>	<b>Bez.</b>	<b>Ergebnis</b>	<b>Bez.</b>
- Leuchtenpositionen	Luminaire.X / Y	- Sichtbare Fläche	Luminaire.Ac
- Höhe H	H	Querrichtung	
- Leuchtendimensionen	LDT.F13 - F21	- Sichtbare Fläche	Luminaire.Ae
- C- / $\gamma$ -Winkel	Luminaire. azimuth/elevation	Längsrichtung	
- Distanz r	Luminaire.r		

<sup>11</sup> DIAL GmbH - E-Mail von Friedrich Wilhelm Bremecker - Business Unit Director, Sales.

### 4.5.3 Bestimmung des Positionsindex nach Guth

Der Positionsindex nach Guth bestimmt die Blendungswirkung einer Leuchte in Abhängigkeit der Position zum Beobachter. Mit diesem Index werden beispielsweise die Abschattungen von Leuchten durch die Augenbrauen oder auch das Sichtfeld der Augen mitberücksichtigt.

Die Berechnung von dem Positionsindex benötigt die Position der Leuchten in Abhängigkeit der Beobachterposition, die durch die Wahl der Position im Ursprung keinerlei Einflüsse besitzt.

Weiterhin wird die Interpolationstabelle aus der Abbildung 9.1 benötigt, die in der CIE 117 enthalten und im Anhang (Kap. 9.3.3) zu sehen ist.<sup>12</sup> Diese zeigt die Positionsindizes in Abhängigkeit von  $X/Y$  und  $H/Y$  an. Die Bestimmung des genauen Positionsindex wird mit einer bilinearen Interpolationen berechnet.

Die Kombinationen, die außerhalb dieser Tabelle liegen, sind undefiniert und sollen nicht in die UGR - Berechnung einbezogen werden. In diesem Implementierung werden diese Werte auf unendlich gesetzt, um eine eindeutige Identifikation zu erhalten.

In der Abbildung 4.13 wird ein Raum der Größe  $12H/12H$  gezeigt ( $H = 2m$ ). Dieser Raum wurde mit  $48 \times 48$  Leuchten ausgestattet ( $SHR = 0.25$ ) und der Positionsindex wurde für jede einzelne Leuchte ermittelt. An der farblichen Markierung des Feldes kann der jeweilige Wert entnommen werden. Dabei zeigen die roten Felder die Leuchten mit einem undefinierten Positionsindex an, welche durch die Augenbrauen verdeckt werden oder nicht im Sichtbereich der Augen liegen. Die gelben Felder symbolisieren Leuchten mit einem hohen Positionsindex, die somit einen geringeren Anteil in der UGR - Berechnung erhalten.

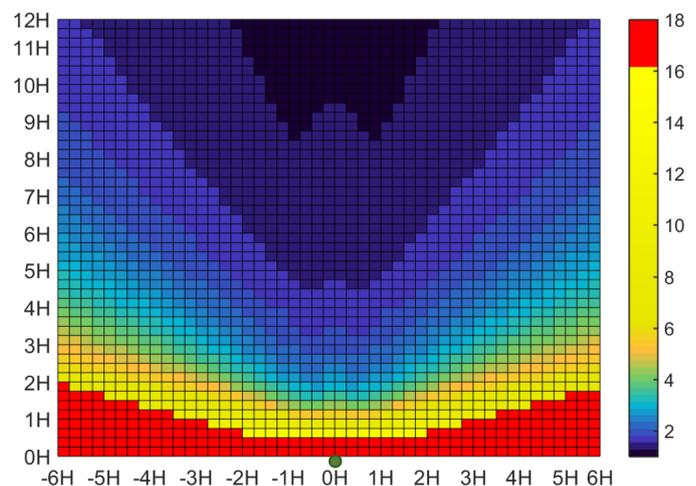


Abbildung 4.13: Werteverteilung des Positionsindexes im Raum  $12H/12H$

Die blauen und grünen Felder werden allerdings vom Beobachter sehr gut wahrgenommen und besitzen dadurch einen hohen Anteil in der Blendbewertung durch den Positionsindex. Dieser Positionsindex wird bereits von vielen Blendbewertungsverfahren nach 1945 genutzt und wurde ständig mit anderen Exponenten und Faktoren in Verbindung gebracht. Somit besteht eine gewisse Unsicherheit bei einigen Forschungsteams, die sich mit Blendungen beschäftigen. Des Weiteren ist die Berechnung des Positionsindexes durch die gegebene Interpolationstabelle keine Absolutberechnung und bietet für die Implementierung keine Vorteile. Es existieren mehrere Berechnungsformeln allerdings wurden mit diesen keine zufriedenstellende Ergebnisse erzeugt.

Parameter	Bez.	Ergebnis	Bez.
- Leuchtenpositionen	Luminaire.X / Y	- Positionsindex jeder Leuchte	Luminaire.P
- Höhe H	H		

<sup>12</sup>vgl. CIE 117-1995, *Discomfort Glare in Interior Lighting*.

#### 4.5.4 Bestimmung der Lichtstärke von Leuchten zum Beobachter

Die Ermittlung der Lichtstärke-Werte der jeweiligen Leuchte, welche zum Beobachter gerichtet ist, kann mit Hilfe der bereits berechneten  $C$ - und  $\gamma$ -Winkel aus dem Kapitel 4.5.1 bestimmt werden. Diese können mit Hilfe einer bilinearen Interpolation aus der Lichtstärke-Tabelle der LDT-Datei für die Quer- und Längsrichtung der Leuchten bestimmt werden. Da durch den Positionsindex nicht alle Leuchten in die UGR - Berechnung mit eingebunden werden sollen, wird die Interpolation der Lichtstärke-Werte für Leuchten mit einem nicht definierten Positionsindex nicht berechnet und somit auf Null gesetzt. Somit können die Lichtstärke-Werte jeder Leuchte mit den bereits berechneten Parametern bestimmt werden.

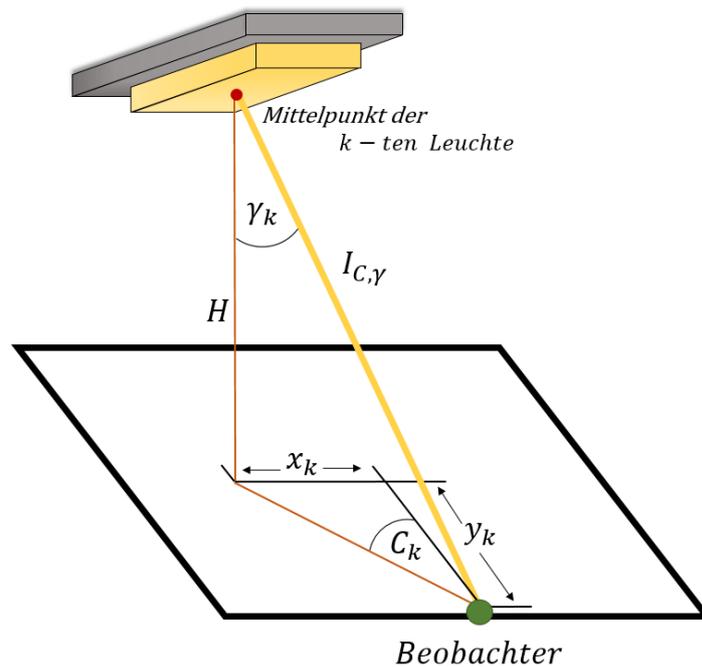


Abbildung 4.14: Bestimmung der Lichtstärke der k-ten Leuchte

Die folgende Tabelle zeigt die benötigten Parameter für die Bestimmung der Lichtstärke-Werte einer Leuchte, die für die UGR - Berechnung notwendig sind. Im Anhang (Kap. 9.3.4) wird der Pseudocode für diese Berechnung gefunden.

Parameter	Bez.	Ergebnis	Bez.
- Lichtstärke-Tabelle	LDT.F36	- Lichtstärke jeder Leuchte	Luminaire.
- Verfügbare $C$ -/ $\gamma$ -Winkeln	LDT.F34 / F35	zum Beobachter	$I_c / I_e$
- $C$ -/ $\gamma$ -Winkel der Leuchten	Luminaire. azimuth/elevation		
- Positionsindex	Luminaire.P		

## 4.6 Bestimmung der Hintergrundleuchtdichte

Die Berechnung der Hintergrundleuchtdichte ist der zweite, wesentliche Bestandteil der UGR - Berechnung. Historisch wurde diese Berechnung bereits in mehreren Blendbewertungsverfahren nach 1945 eingesetzt und durch mehrere Forschungsteams über verschiedene Ansätze und Methoden bestimmt. Somit existieren mehrere Berechnungsverfahren für die Hintergrundleuchtdichte der UGR - Formel, die aus zeitlichen Gründen nicht alle recherchiert und implementiert werden konnten.

Somit sollen hier die folgenden zwei Verfahren zur Bestimmung der Hintergrundleuchtdichte vorgestellt und berechnet werden:

- Wirkungsgradverfahren nach der CIE 190-2010
- Wirkungsgradverfahren nach der CIE 52-1982

Der Aufbau der genannten Wirkungsgradverfahren ist sehr ähnlich und kann durch die Berechnung der folgenden Werte verglichen werden:

- Berechnung des Direkt-Lichtstromanteil zur Nutzoberfläche  
( über die Geometric Multiplier ( *GML* ) )
- Berechnung der Interreflexionsgrade  
( Transfer Factors ( *TF* ) )
- Bestimmung des Winkrungsgrades  
( Utilisation Factor ( *UF / RU* ) )

Diese Berechnungsschritte sind bei diesen Verfahren unterschiedlich aufgebaut. Lediglich bei der Bestimmung der geometrischen Leuchtenverteilungsfaktoren können die gleichen Ergebnisse verwendet werden, dessen Berechnung in der CIE 40-1978 erläutert ist.

Für das Wirkungsgradverfahren aus der CIE 190 werden die Interreflexionswirkungsgrade in Tabellenform angegeben. Diese können weiterhin auch mit der Berechnungsmethode aus der LiTG Publ. 3.5 genau berechnet werden. Die Interreflexionswirkungsgrade und das Wirkungsgradverfahren der CIE 52-1982 werden in dieser Schrift vorgestellt. Die Ergebnisse werden von der CIE 117-1995 aufgegriffen und für die UGR - Berechnung angepasst.

Diese Berechnungswege werden in diesem Kapitel vorgestellt und verglichen. Jedoch wird nicht umfassend auf die theoretischen und mathematischen Hintergründe der einzelnen Berechnungen eingegangen, da diese zumeist in den entsprechenden Normen nicht angegeben wurden.

### 4.6.1 Berechnung des Direkt-Lichtstromanteil zur Nutzoberfläche

Für die Berechnung der Hintergrundleuchtdichte muss zunächst festgestellt werden, wie hoch der Anteil des erzeugten Lichtstromes ist, welcher zu der jeweiligen Raumfläche gerichtet ist. Für diese Berechnung wird zunächst der Direkt-Lichtstromanteil in Richtung der Nutzoberfläche berechnet, der bei der UGR - Berechnung auf die Höhe der Augen des Beobachters gesetzt wurden. Aus diesem Anteil können die weiteren Lichtströme zu den jeweiligen Raumflächen mit den Betriebswirkungsgraden abgeleitet werden.

Für die Bestimmung des Direkt-Lichtstromanteils werden die *Geometric Multiplier* benötigt, die in der CIE 40 definiert wurden. Diese vier Faktoren werden mit Hilfe der Raumgröße und den jeweiligen Leuchtenpositionen berechnet. In der Abbildung 4.15 wird das Berechnungsverfahren dieser Faktoren visuell dargestellt. Hierbei wird von der k-ten Leuchte die Längen und Breiten von den einzelnen Wänden benötigt. Somit kann der Raum in vier Teilbereiche unterteilt werden, dessen Schnittpunkt durch die entsprechenden Koordinaten der Leuchte festgelegt wird.

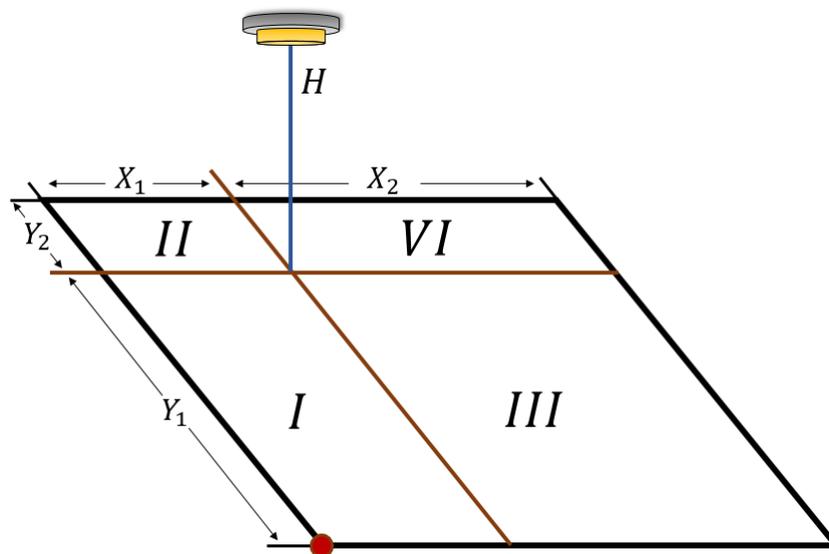


Abbildung 4.15: Berechnungsverfahren für die Geometric Multiplier<sup>13</sup>

Da die Koordinaten anhand der Beobachterposition ausgerichtet wurden, muss eine Verschiebung der X-Koordinate jeder Leuchte zu einer Raumseite erfolgen. Der rote Punkt in der Abbildung 4.15 symbolisiert den Koordinatenursprung für diese Berechnung. Somit müssen alle X-Koordinaten der Leuchten um die halbe Raumbreite verschoben werden.

Mit den ermittelten Längen und Breiten können vier Faktoren für die entsprechenden Teilflächen der k-ten Leuchte berechnet werden. Diese Faktoren der Teilflächen werden zusammengeführt, sodass vier *Geometric Multiplier* der k-ten Leuchte erzeugt werden.

Für die Berechnung des Direkt-Lichtstromanteils zur Nutzoberfläche werden die vier *Geometric Multiplier* aller Leuchten addiert und durch die Anzahl der Leuchten geteilt, sodass diese Faktoren für die gesamte Beleuchtungsanlage gelten. Mit den bereits bestimmten Partiallichtströmen bzw. den Zonal-Flux Werten oder dem Flux-Code der CIE kann der Lichtstromanteil der Nutzoberfläche bestimmt werden.

<sup>13</sup>CIE 52-1982, *Calculation for Interior Lighting, Applied Method*

Diese Berechnungen, die im Anhang (Kap. 9.4.1) gezeigt wird, wurden aus der CIE 40 entnommen und getestet.<sup>14</sup> Da diese Berechnung nicht trivial ist und schnell zu Implementierungsfehlern führen kann, werden die *Geometric Multiplier* - Werte in der CIE 190-2010 für die Standardräume mit einem  $SHR = 1$  angegeben, welche als Ergebniskontrolle genutzt wurde.

Bei der Berechnung des Direkt-Lichtstromanteils zur Nutzoberfläche muss weiterhin darauf geachtet werden, dass die einzelnen *Zonal-Flux*-Werte  $FCL_{1-4}$  auf 1000 *lm* normiert sind. Bei der Verwendung der Verhältnswerten des *Flux-Code*  $N_{1-3}$  wird keine Anpassung benötigt. Die Normierung der *Zonal-Flux*-Werte kann einfach mit der Formel

$$FCL_N = FCL \cdot \frac{1000 \text{ lm}}{LDT \cdot F29}$$

durchgeführt werden.

Weiterhin existiert eine Interpolationstabelle für die jeweiligen Faktoren einer Leuchtenposition. Diese ist wegen der Größe (Tabellengröße: 256x53) als Tabellendatei in der Anhangs-CD hinterlegt.

Somit zeigt die nachfolgende Tabelle die benötigten Parameter für die Bestimmung der *Geometric Multiplier*. Der dazugehörige Pseudocode befindet sich im Anhang (Kap. 9.4.1) dieses Dokumentes.

<b>Parameter</b>	<b>Bez.</b>	<b>Ergebnis</b>	<b>Bez.</b>
- Raumdimension	Room.X / Y	- Geometric Multiplier	GML
- Leuchtenpositionen	Luminaire.X / Y		
- Höhe H	H		

---

<sup>14</sup>CIE 40-1978, *Calculation for Interior Lighting, Basic Method*.

## 4.6.2 Berechnung der Interreflexionwirkungsgrade

Mit der Berechnung der Interreflexionswirkungsgrade werden die Raumflächenreflexionsgrade berücksichtigt, die für die Decke, Wände und den Boden von dem Tabellenverfahren vorgegeben werden. Die Interreflexionwirkungsgradberechnung sieht die Berechnung von vier Raumflächen vor: Decke, Fries, Wände und Boden.

Der Fries ist der Raumteil zwischen Decke und angehängten Leuchten, wie in der Abbildung 4.16 zu sehen ist. Da das Tabellenverfahren der UGR-Berechnung kein Abhängen der Leuchten fordert, fällt dieser Raumteil weg, was die Berechnung der Interreflexionwirkungsgrade vereinfacht. Somit sind die platzierten Leuchten als Deckenleuchten anzunehmen. Falls die eingeleseene Leuchte einen indirekten Lichtanteil besitzt, so wird dieser Anteil sofort an die Decke abgegeben. Da die Gehäuseteile der Leuchte in diesem Verfahren nicht berücksichtigt werden, kann das reflektierte Licht der Decke an die weiteren Raumflächen abgegeben werden.

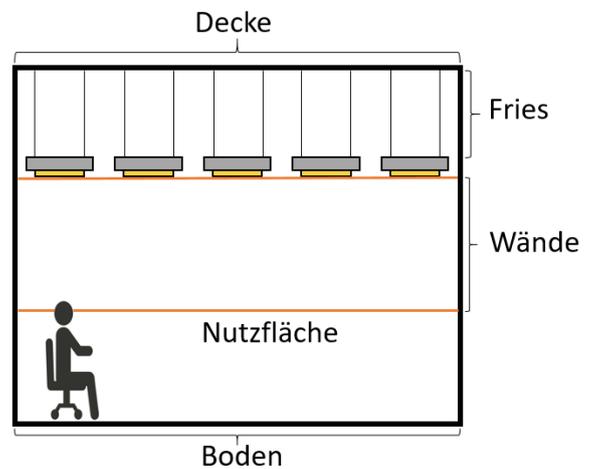


Abbildung 4.16: Aufteilung der vier Raumflächen

In der LiTG Publ. 3.5 sowie in der CIE 40 wird ein Berechnungsverfahren der Interreflexionwirkungsgrade vorgeschlagen. Dabei stellen beide Verfahren Matrizen auf, in denen die jeweiligen Wirkungsgrade für den Austausch von reflektieren Licht der ersten Reflexionsfläche zu der zweiten Reflexionsfläche enthalten sind. Da der Fries in dieser Berechnung wegfällt, werden 3x3 Matrizen erzeugt, die folgendermaßen definiert sind:

$$TF = \begin{bmatrix} \eta_{C \leftarrow C} & \eta_{C \leftarrow W} & \eta_{C \leftarrow F} \\ \eta_{W \leftarrow C} & \eta_{W \leftarrow W} & \eta_{W \leftarrow F} \\ \eta_{F \leftarrow C} & \eta_{F \leftarrow W} & \eta_{F \leftarrow F} \end{bmatrix}$$

C: Decke / Ceiling (1)  
W: Wände / Walls (3)  
F: Boden / Floor (4)

Beispiel:  $C \leftarrow W = \eta_{13} = TF_{13}$  Reflexion der Wände zur Decke

Die Berechnungen der Interreflexionswirkungsgrade werden sowohl von der LiTG 3.5 als auch von der CIE 40 im Anhang vorgestellt. Zu den beiden Varianten wird ebenfalls der Pseudocode im Kapitel 9.4.2 und 9.4.3 vorgefunden. Dabei werden die spezifischen Formelzeichen der jeweiligen Dokumente verwendet.

Für die Interreflexionswirkungsgrade werden außerdem in den entsprechenden Dokumenten vorgefertigte Tabellen vorgefunden, die für die Berechnung der UGR - Werte genutzt werden können. Diese Tabellen konnten als Verifikationsmittel genutzt werden.

### 4.6.3 Bestimmung des Raumwirkungsgrades und der Hintergrundleuchtdichte

Für die Bestimmung der Hintergrundleuchtdichte wird der Raumwirkungsgrad benötigt (engl. Utilisation Factor), welcher sich mittels den berechneten Interreflexionsgraden, der Raumgröße, dem Direkt-Lichtstromanteil und den jeweiligen Lichtaustrittsverhältnissen der Leuchte ermittelt lässt.

So wie beim Interreflexionsverfahren wurde auch bei der Bestimmung der Raumwirkungsgrade verschiedene Verfahren entwickelt. Somit muss darauf geachtet werden, dass die berechneten Interreflexionswirkungsgrade auch mit den dazugehörigen Raumwirkungsgrad-Verfahren genutzt werden. Das Ergebnis soll die Bestimmung der Hintergrundleuchtdichte beziehungsweise die abgegebene Beleuchtungsstärke der Wände sein, die einfach in die entsprechende Hintergrundleuchtdichte approximiert werden kann.

In den Anhangskapitel 9.4.4 und 9.4.5 werden die Berechnungen der CIE 190-2010 und die der CIE 117-1995 vorgestellt. Das Verfahren aus der CIE 190-1995 verwendet die Ergebnisse der Interreflexionsberechnungen aus der LiTG 3.5. Hierbei wird die Hintergrundbeleuchtungsstärke der Wände über den entsprechenden Raumwirkungsgrad ermittelt.

Die Berechnung der Hintergrundleuchtdichte der CIE 117-1995 benötigt die Bestimmung des Raumwirkungsgrades aus der CIE 52-1882. Mit Hilfe der Berechnung einer Standard-Hintergrundleuchtdichte wird durch den Raumwirkungsgrad ein Korrekturwert ermittelt, um die tatsächliche Hintergrundleuchtdichte des Raumes zu erhalten. Wichtig ist hier die Einführung eines Korrekturfaktors für den Direkt-Lichtstromanteil zur Nutzoberfläche in der CIE 52-1982 zu erwähnen. Dieser wurde bislang nicht genutzt und somit auf Eins gesetzt. Weitere Details werden im Kapitel 5.3 erörtert.

Auch in dieser gezeigten Berechnungen werden die Formelzeichen der jeweiligen Normen übernommen beziehungsweise erweitert. Die Pseudocodes zeigen die vollständige Berechnung der Hintergrundleuchtdichte von der Berechnung des Direkt-Lichtstromanteils der Nutzoberfläche bis zu einem Endergebnis für die Hintergrundleuchtdichte.

## 4.7 Bestimmung des UGR - Wertes und der UGR - Tabelle

Mit der Bestimmung der Hintergrundleuchtdichte sind nun alle Parameter für die UGR - Formel vollständig. Somit kann der unkorrigierte UGR - Wert für den jeweiligen Standardraum mit den entsprechenden Reflexionsgraden und den Betrachtungsweisen der Leuchten berechnet werden:

$$UGR_0 = \underbrace{8 \cdot \log_{10} \left( \frac{1}{4} \cdot \sum \frac{I_{C\gamma}^2}{A_p \cdot r^2 \cdot P^2} \right)}_{\text{Direktblendung}} - \underbrace{8 \cdot \log_{10}(L_b)}_{\text{Hintergrundleuchtdichte}}$$

Die Korrekturberechnung, die definitiv für die Verwendung des Tabellenverfahrens genutzt werden muss, ist die Lichtstromkorrektur, da der berechnete UGR - Wert mit den gezeigten Methoden für eine Leuchte mit normierten Lichtströmen von 1000 *lm* durchgeführt wurde. Somit wird die folgende Funktion für die Korrektur benötigt:

$$UGR = UGR_0 + \frac{LDT \cdot F29}{1000 \text{ lm}}$$

$UGR_0$ : normierter / unkorrigierter UGR - Wert auf 1000 *lm*

$UGR$ : korrigierter UGR Wert

Falls weitere Leuchtensets in der eingelesenen LDT - Datei vorhanden sind, können die UGR - Werte durch die unkorrigierten Ergebnisse und dem jeweiligen Lichtstrom berechnet werden. Weitere Korrekturberechnungen können nach Belieben verwendet werden, die in dem Kapitel 3.1.1 bereits vorgestellt wurden.

Um nun die komplette UGR - Tabelle mit den gezeigten Berechnungen zu erzeugen, müssen diese für:

- jeden Standardraum
- jede Raumreflexionskombination
- jede Betrachtungssichtweise

wiederholt werden. Um bereits in dieser Beispielberechnung eine Berechnungsschleife zu minimieren, werden die Betrachtungsweisen der Leuchten für die Quer- und Längsrichtung in jedem Durchlauf zusammen berechnet. Somit kann der Pseudocode für die Berechnung der kompletten UGR - Tabelle der eingelesenen Leuchtendatei verwendet werden, welche im Anhang (Kap. 9.5) zu finden ist.

# 5 Optimierung und Verifizierung der Implementation

In diesem Kapitel wird zunächst eine Optimierung für die Bestimmung der Direktblendung vorgestellt. Im zweiten Teil sollen die erreichten Ergebnisse der Implementierungen verglichen und verifiziert werden.

## 5.1 Optimierung der Implementierung

In den beschriebenen Berechnungen der Direktblendung werden viele Leuchtenpositionen mehrfach für die jeweiligen Standardräume ermittelt. Beispielsweise werden die Leuchtenpositionen und die Ergebnisse des Standardraumes 2H/2H weiterhin für jeden anderen Standardraum benötigt. Somit werden diese Positionen 19 mal berechnet.

Um diese Mehrfachberechnungen zu unterbinden, wird für die Direktblendung ein 12H/12H - Raum aufgestellt, sodass jede Leuchtenposition der zu berechnenden Standardräume enthalten ist. Somit wird für diesen Raum 12x12 Leuchten bei einem  $SHR = 1$  und 48x48 Leuchten bei  $SHR = 0.25$  erzeugt. Die Direktblendung können mit den bereits gezeigten Berechnungen durchgeführt werden. Um die berechneten Ergebnisse für die Direktblendung der jeweiligen Räume zu nutzen, wird eine 12x12 bzw. 48x48 große Matrix erzeugt, welche die Summanden der Direktblendung speichert. Für die Direktblendungskalkulation der jeweiligen Räume können nun die benötigten Leuchtenpositionen ausgewählt und dessen gespeicherten Summandenwerte in der Matrix aufaddiert werden, die innerhalb des gewählten Raumes liegen. Mit der Verwendung der UGR - Formel können die Direktblendungsanteile des entsprechenden Raumes ohne die Mehrfachberechnung von Leuchtenpositionen ermittelt werden.<sup>1</sup>

In der Abbildung 5.1 wird ein Beispiel für die Summationsmatrix gezeigt. Hierbei wurden die großen Summanden dunkelrot eingefärbt wobei die niedrigen Werte grün dargestellt werden. Auf der rechten Seite befindet sich ein Ausschnitt für den Standardraum 4H/6H. Diese Werte werden für die Bestimmung der Direktblendung dieses Raumes aufsummiert:

Abbildung 5.1: Aufbau der Matrix zur Berechnung der Direktblendung (Vollansicht)

Abbildung 5.2: Vergrößerte Ansicht (Beispiel für 4H/6H)

<sup>1</sup> DIAL GmbH - E-Mail von Friedrich Wilhelm Bremecker - Business Unit Director, Sales.

## 5.2 Verifizierung der Implementierung

Für die Verifikation der Implementierung wurde die UGR - Tabelle von mehreren LDT - Dateien von bekannten Herstellern und den verwendeten Beispielleuchten der CIE 117 und der CIE 190 mit den gezeigten Berechnungen erzeugt.

Diese UGR - Tabellen der verschiedenen Testdateien wurden mit den Ergebnistabellen der folgenden Programme verglichen:

1. Implementierung mit dem Verfahren der CIE 190-2010 für die Hintergrundleuchtdichte
2. Implementierung mit dem Verfahren der CIE 117-1995 für die Hintergrundleuchtdichte
3. DIAL GmbH - LDT Editor
4. LMT Lichtmesstechnik GmbH
5. Photometrik GmbH
6. LCI Light Consult International

Bei dem Berechnungsprogramm der Firma DIAL GmbH wurde die Berechnung der Hintergrundleuchtdichte mit dem beschriebenen Verfahren aus der CIE 117-1995 (CIE 52-1982) erzeugt. Bei den Kalkulationen der Firma LMT GmbH und Photometrik GmbH wird das Verfahren nach CIE 190-2010 (LiTG 3.5) genutzt.

Es wurden 14 LDT - Dateien von unterschiedlichen Herstellern getestet. Dabei wurden die korrigierten UGR - Tabellenwerte der jeweiligen Programmen verglichen. Diese 14 LDT - Dateien wurden für die Vergleichsbewertung in drei Kategorien eingeteilt:

- Vergleich der Beispieldaten von verwendeten Normen
- Vergleich von direkt strahlenden Leuchten
- Vergleich von direkt/indirekt strahlenden Leuchten

Der Vergleich der kompletten UGR - Tabelle ist die genaueste Methode, allerdings ist dies für einen Überblick der erreichten Ergebnisse zu unübersichtlich. Somit wurden für den Vergleich der jeweiligen LDT - Dateien eine reduzierte UGR - Tabelle erzeugt, welche in der Abbildung 5.3 gezeigt wird. Die UGR - Werte des entsprechenden Raumes für die Quer- und Längsansicht der Leuchten soll gemittelt in diese Tabelle eingetragen werden. Bei der Raumauswahl wurde darauf geachtet, das kleine sowie größere Räume verglichen werden. Dabei sollen alle Raumreflexionsgrade überprüft werden.

Vergleichswerte						
<b>Decke</b>		<b>70</b>	<b>70</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>30</b>
<b>Wände</b>		<b>50</b>	<b>30</b>	<b>50</b>	<b>30</b>	<b>30</b>
<b>Boden</b>		<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>
<b>2H</b>	<b>3H</b>					
<b>4H</b>	<b>4H</b>					
<b>8H</b>	<b>4H</b>					
<b>12H</b>	<b>6H</b>					

Abbildung 5.3: Vergleichstabelle der Berechnungsprogramme (mit gemittelten Werten für Quer- und Längsansicht)

Weiterhin wurden die Felder bei dem Vergleich zweier Tabellen rötlich eingefärbt, sobald die Differenz größer als 0,2 UGR-Einheiten beträgt und somit außerhalb der gewünschten Toleranz liegt (siehe Spezifikation Kap. 4.1). Grünlich gefärbte Felder signalisieren eine Übereinstimmung der verglichenen Tabellenwerte. Die vollständigen Auswertungen der kompletten UGR - Tabellen sowie die gezeigten Vergleichstabellen können für alle verwendeten LDT - Dateien auf der Anhangs-CD wiedergefunden werden.

Eine Diskussion der erreichten Ergebnisse wird in Kapitel 5.3 geführt.

### 5.2.1 Vergleich der Beispieldaten der verwendeten Normen

In der CIE 117-1995 wurden zwei Beispieldaten für die dazugehörigen Leuchtendaten hinterlassen. Die weiteren Details können aus dieser Norm entnommen werden.<sup>2</sup>

Diese sollen als Referenzdaten für die Verifikation der UGR - Berechnung eine hohe Bedeutung haben. Mit diesen Beispieldaten der Leuchten "Parabolic" und "Sphere" wurden aus den genannten Berechnungsprogrammen die UGR - Ergebnisse erzeugt. Diese wurden mit den angegebenen UGR - Tabellen aus der CIE 117-1995 verglichen, sodass folgende Vergleichstabellen entstanden sind:

Imp. CIE 190 - Normwerte						Imp. CIE 117 - Normwerte							
Decke	70	70	50	50	30	Decke	70	70	50	50	30		
Wände	50	30	50	30	30	Wände	50	30	50	30	30		
Boden	20	20	20	20	20	Boden	20	20	20	20	20		
2H	3H	-0,1	0,3	0	0,3	0,5	2H	3H	-0,3	-0,2	-0,3	-0,3	-0,2
4H	4H	0,1	0,3	-0,1	0,3	0,4	4H	4H	-0,2	-0,1	-0,4	-0,2	-0,2
8H	4H	0,1	0,2	0,1	0,2	0,3	8H	4H	-0,2	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3
12H	6H	0	0,2	0	0,2	0,3	12H	6H	-0,2	-0,1	-0,3	-0,2	-0,3

DIAL - Normwerte						LMT - Normwerte						Photometrik - Normwerte								
Decke	70	70	50	50	30	Decke	70	70	50	50	30	Decke	70	70	50	50	30			
Wände	50	30	50	30	30	Wände	50	30	50	30	30	Wände	50	30	50	30	30			
Boden	20	20	20	20	20	Boden	20	20	20	20	20	Boden	20	20	20	20	20			
2H	3H	0	0	0	-0,1	0	2H	3H	0	0,3	0,1	0,3	0,5	2H	3H	-0,1	0,3	0	0,3	0,4
4H	4H	0,1	0	-0,1	0	0	4H	4H	0,1	0,3	0	0,3	0,4	4H	4H	0,1	0,3	-0,1	0,3	0,4
8H	4H	0,1	0	0,1	0	0	8H	4H	0,1	0,2	0,1	0,2	0,3	8H	4H	0,1	0,2	0,1	0,2	0,3
12H	6H	0,1	0,1	0	0,1	0	12H	6H	0,1	0,3	0,1	0,3	0,3	12H	6H	0	0,2	0	0,2	0,3

Abbildung 5.4: Vergleich der UGR - Tabelle der jeweiligen Berechnungsprogramme mit den Ergebnissen aus der CIE 117 der "Parabolic" - Leuchte

Imp. CIE 190 - Normwerte						Imp. CIE 117 - Normwerte							
Decke	70	70	50	50	30	Decke	70	70	50	50	30		
Wände	50	30	50	30	30	Wände	50	30	50	30	30		
Boden	20	20	20	20	20	Boden	20	20	20	20	20		
2H	3H	0	-0,1	-0,1	-0,2	-0,4	2H	3H	-0,6	-0,6	-0,6	-0,5	-0,4
4H	4H	0,1	0,1	-0,1	-0,1	-0,4	4H	4H	-0,4	-0,3	-0,5	-0,3	-0,3
8H	4H	0,1	0,1	0	0	-0,3	8H	4H	-0,3	-0,2	-0,3	-0,2	-0,2
12H	6H	0,2	0,1	0	0	-0,4	12H	6H	-0,2	-0,2	-0,2	-0,1	-0,2

DIAL - Normwerte						LMT - Normwerte						Photometrik - Normwerte								
Decke	70	70	50	50	30	Decke	70	70	50	50	30	Decke	70	70	50	50	30			
Wände	50	30	50	30	30	Wände	50	30	50	30	30	Wände	50	30	50	30	30			
Boden	20	20	20	20	20	Boden	20	20	20	20	20	Boden	20	20	20	20	20			
2H	3H	0	0	0	0	0	2H	3H	-2,6	-2,6	-2,6	-2,5	-2,5	2H	3H	0	-0,1	0	-0,2	-0,3
4H	4H	0	0	0	0	0	4H	4H	-2,5	-2,4	-2,5	-2,4	-2,3	4H	4H	0,1	0,1	-0,1	-0,1	-0,3
8H	4H	0	0	0	0	0	8H	4H	-2,4	-2,3	-2,5	-2,3	-2,3	8H	4H	0,1	0,1	0	0	-0,2
12H	6H	0	0	0	0	0	12H	6H	-2,3	-2,2	-2,2	-2,2	-2,2	12H	6H	0,2	0,1	0	0	-0,3

Abbildung 5.5: Vergleich der UGR - Tabelle der jeweiligen Berechnungsprogramme mit den Ergebnissen aus der CIE 117 der "Sphere" - Leuchte

<sup>2</sup>vgl. CIE 117-1995, *Discomfort Glare in Interior Lighting*, S. 28.

Auch in der CIE 190-2010 ist eine Beispielleuchte mit den entsprechenden Leuchtendaten enthalten. Allerdings wurden die UGR - Werte mit einem Leuchtenabstand von  $SHR = 1$  erzeugt. Somit kann diese UGR-Tabelle nicht mit den Tabellen von LMT und Photometrik verglichen werden, da für diesen Leuchtenabstand die entsprechenden Tabellen nicht vorliegen. Die Werte aus dem LDT - Editor können ebenfalls nicht verwendet werden. Von der Firma DIAL kann jedoch aus dem Programm DIALux 4.12 die UGR - Tabelle für diesen Leuchtenabstand erzeugt werden. Somit kann das Beispiel der CIE 190-2010 mit den Implementierungsberechnungen und den Werte aus DIALux 4.12 verglichen werden:

Imp. CIE 190 - Normwerte						Imp. CIE 117 - Normwerte						DIALux - Normwerte								
Decke	70	70	50	50	30	Decke	70	70	50	50	30	Decke	70	70	50	50	30			
Wände	50	30	50	30	30	Wände	50	30	50	30	30	Wände	50	30	50	30	30			
Boden	20	20	20	20	20	Boden	20	20	20	20	20	Boden	20	20	20	20	20			
2H	3H	-0,1	0	0,1	0,1	0	2H	3H	-1,5	-1,7	-1,4	-1,7	-1,9	2H	3H	0	-0,2	0,1	-0,2	-0,3
4H	4H	0	0	0	0	0	4H	4H	-1,3	-1,5	-1,4	-1,6	-1,8	4H	4H	0	-0,2	0	-0,2	-0,3
8H	4H	0	0	0	0	0	8H	4H	-1,2	-1,3	-1,3	-1,5	-1,7	8H	4H	0,1	-0,1	0	-0,2	-0,3
12H	6H	0,1	0,1	0	0,1	0,1	12H	6H	-1,2	-1,3	-1,4	-1,5	-1,6	12H	6H	0,1	0	0	0	-0,1

Abbildung 5.6: Vergleich der UGR - Tabelle der jeweiligen Implementierungen mit den Ergebnissen und Vergleich aus der CIE 190

Aus diesen Vergleichsergebnissen kann deutlich erkannt werden, dass die Ergebnisse des LDT - Editors der Firma DIAL mit den Referenzdaten der CIE 117 übereinstimmen. Die Abweichungen von 0.1 UGR-Punkten bei der "Parabolic" - Leuchte wird durch die Mittlung der Betrachtungsansichten und die darauffolgende Rundung auf eine Nachkommastelle erzeugt. Die Ergebnisse aus Dialux 4.12 für die Beispielleuchte der CIE sind für die höheren Reflexionsgradkombination im Toleranzspektrum. Lediglich sind die Ergebnisse für die Reflexionsgrade 30 / 30 / 20 um 0.1 UGR-Punkt aus dem geforderten Bereich. Somit können die Berechnungen des LDT - Editors nach CIE 117-1995 als gute Referenz für die nächsten Berechnungen genutzt werden.

Die erzielten Ergebnisse der vorgestellten Implementierungen weisen hingegen höhere Abweichungen bei den niedrigeren Reflexionsgradkombinationen für die Beispielleuchten der CIE 117-1995 auf. Allerdings wird eine gute Übereinstimmung der Referenzwerte der CIE 190 mit den Berechnungen nach dieser Norm erreicht. Für die Leuchte der CIE 190 wurden allerdings sehr hohe Abweichungen zwischen der Implementierung nach CIE 117 und den angegebenen Werten entdeckt. Die Werte von LCI waren nicht vorhanden und konnten somit nicht getestet werden.

### 5.2.2 Vergleich der LDT - Dateien von direkt strahlenden Leuchten

Bei den direkt strahlenden Leuchten wurden die links aufgelisteten LDT - Dateien getestet. Dabei sind die Ergebnisse der Nr. 20 CIE 117 'Parabolic' bereits vorgestellt worden. Die nächsten Tabellen zeigen die Ergebnisse und den Vergleich von den zwei Implementierungsarten mit den jeweiligen Vergleichsprogrammen für die LDT - Datei Nummer 3. Die Informationen zu dieser Beispielleuchte können aus der genannten Datei ausgelesen werden, die sich auf der Anhangs-CD befindet.

Nr.	Bezeichnung
03	CIE 190 (SHR 0.25)
04	ESYLUX CELINE
12	RZB Planox Tube
20	CIE 117 "Parabolic"

Weiterhin werden die Resultate der Blenbewertung aller direkt strahlenden Leuchtendateien beschrieben. Folgende Vergleichstabelle wurde mit der genannten LDT - Datei erzeugt:

Imp. CIE 190 - DIAL						Imp. CIE 190 - LMT						Imp. CIE 190 - Photometrik						Imp. CIE 190 - LCI					
Decke	70	70	50	50	30	Decke	70	70	50	50	30	Decke	70	70	50	50	30	Decke	70	70	50	50	30
Wände	50	30	50	30	30	Wände	50	30	50	30	30	Wände	50	30	50	30	30	Wände	50	30	50	30	30
Boden	20	20	20	20	20	Boden	20	20	20	20	20	Boden	20	20	20	20	20	Boden	20	20	20	20	20
2H 3H	-0,1	0,3	0	0,3	0,4	2H 3H	0	0	0	0	0	2H 3H	0	0	0	0	0	2H 3H	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-0,3
4H 4H	-0,1	0,2	-0,1	0,3	0,3	4H 4H	0	0	-0,1	0	0	4H 4H	0	0	0	0	0	4H 4H	-0,1	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2
8H 4H	0	0,1	0	0,2	0,2	8H 4H	0	0	0	0	0	8H 4H	0,1	0	0	0	-0,1	8H 4H	-0,1	-0,2	-0,1	-0,1	-0,2
12H 6H	-0,1	0,1	-0,1	0,1	0,1	12H 6H	-0,1	0	-0,1	0	0	12H 6H	0	0	0	0	0	12H 6H	-0,2	-0,2	-0,2	-0,1	-0,2
Imp. CIE 117 - DIAL						Imp. CIE 117 - LMT						Imp. CIE 117 - Photometrik						Imp. CIE 117 - LCI					
Decke	70	70	50	50	30	Decke	70	70	50	50	30	Decke	70	70	50	50	30	Decke	70	70	50	50	30
Wände	50	30	50	30	30	Wände	50	30	50	30	30	Wände	50	30	50	30	30	Wände	50	30	50	30	30
Boden	20	20	20	20	20	Boden	20	20	20	20	20	Boden	20	20	20	20	20	Boden	20	20	20	20	20
2H 3H	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	2H 3H	1	0,6	0,9	0,6	0,5	2H 3H	1	0,6	0,9	0,6	0,5	2H 3H	0,9	0,4	0,8	0,4	0,2
4H 4H	0,9	0,9	0,8	0,9	0,8	4H 4H	1	0,7	0,8	0,6	0,5	4H 4H	1	0,7	0,9	0,6	0,5	4H 4H	0,9	0,5	0,7	0,4	0,3
8H 4H	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	8H 4H	0,9	0,8	0,9	0,6	0,6	8H 4H	1	0,8	0,9	0,6	0,5	8H 4H	0,8	0,6	0,8	0,5	0,4
12H 6H	0,8	0,9	0,7	0,7	0,6	12H 6H	0,8	0,8	0,7	0,6	0,5	12H 6H	0,9	0,8	0,8	0,6	0,5	12H 6H	0,7	0,6	0,6	0,5	0,3

Abbildung 5.7: Vergleich der UGR - Tabelle der jeweiligen Implementierungen mit der LDT - Datei Nr. 03

Mit der Implementierung nach der CIE 190-2010 konnten die gleichen Ergebnisse aus den Implementierungen von Photometrik und LMT erreicht werden. Auch die Ergebnisse von LCI konnten für die meisten Räume und Reflexionsgradkombinationen im Toleranzbereich berechnet werden. Der Vergleich dieser Programme mit der Implementierung nach CIE 117-1995 weißt sehr hohe Abweichungen auf. Allerdings haben diese Vergleichsprogramme mit den Normdaten keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielen können.

Bei dem Vergleich der CIE 190 - Implementierung mit den Werten von DIAL konnte erkannt werden, dass einige Räume mit den Reflexionsgradkombinationen 70/50/20 und 50/50/20 gut berechnet werden können. Sobald der Reflexionsgrad der Wände gesenkt wird, entstehen größere Abweichungen.

Die Implementierung nach CIE 117-1995 weißt in jedem Tabellenwert eine hohe Abweichung zu DIAL auf. Allerdings sind diese sehr konstant über die Reflexionsgradkombinationen und Räume.

### 5.2.3 Vergleich der LDT - Dateien von direkt/indirekt strahlenden Leuchten

Bei den direkt/indirekt strahlenden Leuchten wurden deutlich mehr Testdateien verwendet, da diese Leuchtenart große Variationen in dem Aussehen der LVK oder auch in dem generellen Aufbau der jeweiligen Leuchte bietet. Bei der Auswahl wurde darauf geachtet, dass viele unterschiedliche Arten abgedeckt werden.

Nr.	Bezeichnung	Nr.	Bezeichnung
01	BEGA 33549K3	10	RZB Flatliner
06	ESYLUX ALVA	11	RZB Lavano WING
07	BEGA 22439K3	12	RZB Planox Tube
08	BEGA 50557K3	13	RZB Ring of Fire
09	RZB Basic Ball	14	Trilux AcuroAct

Die folgende Tabelle zeigt die Auswertung zu der LDT - Datei Nummer 11. In dem darauf folgenden Abschnitt werden die Ergebnisvergleiche aller Testdateien beschrieben:

Imp. CIE 190 - DIAL						Imp. CIE 190 - LMT						Imp. CIE 190 - Photometrik						Imp. CIE 190 - LCI					
Decke	70	70	50	50	30	Decke	70	70	50	50	30	Decke	70	70	50	50	30	Decke	70	70	50	50	30
Wände	50	30	50	30	30	Wände	50	30	50	30	30	Wände	50	30	50	30	30	Wände	50	30	50	30	30
Boden	20	20	20	20	20	Boden	20	20	20	20	20	Boden	20	20	20	20	20	Boden	20	20	20	20	20
2H 3H	-0,7	-0,6	-0,6	-0,6	-0,5	2H 3H	-0,1	0	-0,1	-0,1	-0,1	2H 3H	0	0	0	0	0	2H 3H	-1	-1	-1	-1,1	-1
4H 4H	-0,4	-0,3	-0,4	-0,3	-0,3	4H 4H	-0,1	0	0	0	0	4H 4H	0	0	0	0	0	4H 4H	-1	-1	-0,9	-1	-1
8H 4H	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	-0,2	8H 4H	0	0	0	0	-0,1	8H 4H	0	0	0	0	0	8H 4H	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9
12H 6H	-0,3	-0,2	-0,3	-0,2	-0,1	12H 6H	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0	12H 6H	0	0	0	0	0	12H 6H	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2
Imp. CIE 117 - DIAL						Imp. CIE 117 - LMT						Imp. CIE 117 - Photometrik						Imp. CIE 117 - LCI					
Decke	70	70	50	50	30	Decke	70	70	50	50	30	Decke	70	70	50	50	30	Decke	70	70	50	50	30
Wände	50	30	50	30	30	Wände	50	30	50	30	30	Wände	50	30	50	30	30	Wände	50	30	50	30	30
Boden	20	20	20	20	20	Boden	20	20	20	20	20	Boden	20	20	20	20	20	Boden	20	20	20	20	20
2H 3H	0,6	0,6	0,6	0,5	0,4	2H 3H	1,2	1,2	1,1	1	0,8	2H 3H	1,3	1,2	1,2	1,1	0,9	2H 3H	0,3	0,2	0,2	0	-0,1
4H 4H	1,2	1,2	1,1	1,1	0,9	4H 4H	1,5	1,5	1,5	1,4	1,2	4H 4H	1,6	1,5	1,5	1,4	1,2	4H 4H	0,6	0,5	0,6	0,4	0,2
8H 4H	1,3	1,2	1,2	1,2	1	8H 4H	1,6	1,5	1,5	1,4	1,1	8H 4H	1,6	1,5	1,5	1,4	1,2	8H 4H	0,7	0,6	0,6	0,5	0,3
12H 6H	2,3	2,3	2,1	2,1	1,9	12H 6H	2,5	2,4	2,3	2,2	2	12H 6H	2,6	2,5	2,4	2,3	2	12H 6H	1,4	1,3	1,2	1,1	0,8

Abbildung 5.8: Vergleich der UGR - Tabelle der jeweiligen Implementierungen mit der LDT Datei Nr. 11

Wie für die direkt strahlenden Leuchten wurden die Ergebnisse von Photometrik und LMT mit der Implementierung nach CIE 190-2010 gut getroffen. Der Vergleich mit LCI ist in den jeweiligen Testdateien sehr unterschiedlich ausgefallen, von sehr hohen Abweichung in jedem Tabellenwert bis hin zu tolerierbaren und kleineren Abweichungen in den meisten berechneten Tabellenfeldern. Der Vergleich mit diesen Programmen und der Implementierung nach CIE 117-1995 fiel wie bei den direkt strahlenden Leuchten mit sehr hohen Abweichungen aus.

Bei dem Vergleich mit der Implementierung nach CIE 190-2010 wurde festgestellt, dass bei den meisten Testdaten nun die Räume mit den niedrigen Reflexionsgraden dichter am Vergleichswert angesiedelt sind. Für die höheren Reflexionsgradkombinationen werden sehr hohe Abweichungen erzeugt.

Mit der Implementierung nach CIE 117-1995 wurden wie bei direkt strahlenden Leuchten eine hohe Abweichungen berechnet. Allerdings sind diese in den jeweiligen Räumen konstanter als bei der Implementierung nach CIE 190-2010, jedoch werden bei den Reflexionskombinationen eines Raumes unterschiedliche Abweichungen erzeugt.

## 5.3 Diskussion der vorgestellten Ergebnisse und Beanstandung am UGR - Verfahren

In den gezeigten Vergleichstabellen aus dem letzten Kapitel 5.2 wurden sehr hohe Abweichungen zwischen den verschiedenen getesteten Implementierungen und Programmen entdeckt. Auch die für die Verifizierung genutzten Programme und Implementierung der unterschiedlichen Firmen widersprechen sich in den entsprechend berechneten Tabellen zur Blendbewertung.

Es wurden mehrere Ursachen zu diesen gezeigten Ergebnissen gefunden, die in dem nachfolgenden Abschnitt näher behandelt werden sollen. Weiterhin wurden weitere erwähnenswerte Themen gefunden, die ebenfalls in diesem Abschnitt behandelt beziehungsweise genannt werden sollen.

### 5.3.1 Berechnung der Hintergrundleuchtdichte verschiedener Normen

Die Berechnungen des UGR - Wertes für einen Raum mit festgelegten Reflexionsgraden wurde sowohl in dem Kapitel 4 als auch von vielen Normen in die Berechnung der Direktblendung und der Hintergrundleuchtdichte unterteilt.

Um den Grund für die entstandenen Abweichungen zwischen den Vergleichsprogrammen und den erstellten Implementierungen zu lokalisieren, wurden diese beiden Berechnungsabschnitte mit einem Zwischenwertsvergleich kontrolliert. Dabei konnte auf Daten von DIAL und Photometrik zurückgegriffen werden. Dieser Zwischenwertvergleich wird nicht veröffentlicht, da es sich um interne Informationen der jeweiligen Firmen handelt. Aus diesen Daten konnte festgestellt werden, dass die Berechnungen der Direktblendung gleich berechnet wurde.

Die Berechnung der Hintergrundleuchtdichte nach der CIE 190-2010 konnte mit den Daten von Photometrik verglichen werden. Diese ist ebenfalls als korrekt anzusehen, da auch die UGR - Tabellen jeder Testdatei in der Wertetoleranz lagen. Auch die Testdatei der CIE 190-2010 konnten in der vorgegebenen Toleranz berechnet werden. Somit wird ein systematischer beziehungsweise ein programmiertechnischer Fehler nach den Berechnungen dieser Norm ausgeschlossen.

Die Verifikation der Hintergrundleuchtdichten-Berechnung nach CIE 117-1995 konnte bislang nicht mit der Firma DIAL verglichen werden, da zurzeit keine Daten für einen solchen Vergleich vorliegen. Wie allerdings in dem Kapitel 4.6 bereits erwähnt wurde, existiert in diesem Berechnungsverfahren von der CIE 52-1982 ein Korrekturwert für den Direkt-Lichtstromanteil, welcher noch nicht berechnet werden konnte. Dieser kann voraussichtlich durch ein Interpolationsverfahren über mehrere Tabellen ermittelt werden, jedoch sind die in der Norm beschriebenen Angaben nicht ausreichend für die Bestimmung dieses Korrekturwertes.

In der Abbildung 5.9 wird ein Ausschnitt von einer der 10 Interpolationstabellen gezeigt, die für die Bestimmung des Korrekturwertes genutzt werden könnten. Aus der Korrespondenz mit der Firma DIAL ging hervor, dass sich dieser Wert mit einigen Parametern berechnen lässt. Die Informationen für die Berechnung dieser Korrekturwerte und der daraus resultierenden Hintergrundleuchtdichte liegen zur Zeit der Fertigstellung dieses Dokumentes nicht vor und können deshalb nicht dokumentiert und implementiert werden.<sup>3</sup>

N I V	PN I V	H--> 2			3			4		
		PM>0.10	0.45	0.80	0.10	0.45	0.80	0.10	0.45	0.80
1	0.81	0.78	1.03	1.19	0.94	1.11	1.21	1.00	1.14	1.22
	0.81	0.78	1.03	1.19	0.94	1.11	1.21	1.00	1.14	1.22
	0.81	0.78	1.03	1.19	0.94	1.11	1.21	1.00	1.14	1.22
2	0.10	0.58	0.75	0.86	0.69	0.81	0.88	0.73	0.82	0.88
	0.30	0.67	0.88	1.01	0.81	0.95	1.03	0.85	0.97	1.04
	0.50	0.74	0.98	1.12	0.89	1.05	1.14	0.94	1.07	1.15
3	0.10	0.65	0.85	0.97	0.77	0.91	0.99	0.82	0.93	1.00
	0.30	0.71	0.93	1.07	0.85	1.00	1.09	0.90	1.02	1.10
	0.50	0.76	1.00	1.14	0.91	1.07	1.17	0.96	1.09	1.17

Abbildung 5.9: Ausschnitt aus der Interpolationstabelle Nr.3 für den Korrekturfaktor<sup>4</sup>

In der CIE 52-1982 wurde bereits eine Auswertung mit den unterschiedlichen Berechnungsvarianten der indirekte Hintergrundbeleuchtungsstärke durchgeführt, die für die Bestimmung der Hintergrundleuchtdichte benötigt wird. Dabei wurden zwei Installationsbeispiele mit unterschiedlichen Methoden berechnet und zusammengetragen. Die Ergebnisse für die indirekten Beleuchtungsstärke der einzelnen Varianten sind in der Tabelle 5.1 und 5.2 zu sehen. Dabei zeigt das erste Beispiel eine gute Näherung zwischen den einzelnen Methoden. Das zweite Beispiel zeigt hingegen größere Varianzen in den Ergebnissen:

Methodenart	$E_1$	$E_3$	$E_4$	Methodenart	$E_1$	$E_3$	$E_4$
CIE Basic Method	104	311	613	CIE Basic Method	121	376	653
CIE Applied Method (V1)	104	305	616	CIE Applied Method (V1)	121	373	655
CIE Applied Method (V2)	104	313	611	CIE Applied Method (V2)	122	382	648
UF Table	-	-	617	UF Table	-	-	732
Reduced UF Table	99	309	617	Reduced UF Table	103	278	732
British Method	104	307	618	British Method	101	263	593
French Method	103	306	617	French Method	119	365	662
German Method	104	302	624	German Method	122	355	733
American Method	-	-	616	American Method	-	-	727

Tabelle 5.1: Ergebnisse Berechnungsbeispiel 1 der Indirekt - Beleuchtungsstärken von den jeweiligen Raumflächen<sup>5</sup>

Tabelle 5.2: Ergebnisse Berechnungsbeispiel 2 der Indirekt - Beleuchtungsstärken von den jeweiligen Raumflächen<sup>5</sup>

Da das Unified Glare Rating keine genauen Angaben zu der Berechnungsart der Hintergrundleuchtdichte vorgibt und somit jedes Verfahren genutzt werden kann, ohne eine Angabe über die genutzte Berechnungsmethode zu machen, existiert eine große Varianz der Tabellenwerte. Zwar wird in der CIE 117-1995 das Verfahren der CIE 52-1982 empfohlen aber nicht vorgeschrieben.

Um die Blendbewertung zu vereinheitlichen, sollte für die einfache Bestimmung der Hintergrundleuchtdichte die Berechnungsmethode vorgegeben werden. Im Falle einer spezifischen Raumberechnung (wie in Kapitel 3.2.1 dargestellt) sollte durchaus komplexere Verfahren für eine genauere Bestimmung der Blendsituation genutzt werden.

<sup>3</sup> DIAL GmbH - E-Mail von Friedrich Wilhelm Bremecker - Business Unit Director, Sales

<sup>4</sup> ent. CIE 52-1982, Calculation for Interior Lighting, Applied Method, 128 Table V. 3

<sup>5</sup> ent. CIE 52-1982, Calculation for Interior Lighting, Applied Method, S. 47

Eine weitere Bemerkung, die hier festgehalten werden soll, ist die Berechnungsart der Hintergrundleuchtdichte über die indirekte Beleuchtungsstärke der Wände  $E_3$ . Bei einer theoretischen Betrachtung wird von dem Beobachter eine größere Fläche des Raumes als Hintergrund wahrgenommen, sodass Teile der Decke und des Boden betrachtet werden müssten. Auch die Betrachtung aller Wandflächen ist unsinnig, da der Beobachter an einer Wandfläche steht und diese somit nicht zur Hintergrundleuchtdichte gezählt werden sollte.

Da eine genauere Kalkulation der Hintergrundleuchtdichte zwangsläufig auf kompliziertere Berechnungsverfahren hinauslaufen wird, wurden diese für das UGR-Verfahren beschränkt. Da allerdings eine Unsicherheit bei der Berechnungsmethodenauswahl für die Hintergrundleuchtdichte existiert, sollte durchaus die Erzeugung eines neuen Berechnungsverfahrens mit einer genaueren theoretischen Betrachtung für die Hintergrundleuchtdichte in Betracht gezogen werden.

### 5.3.2 Bestimmung der UGR - Klasse des Referenzraumes

Wie in Kapitel 3.2.2 erläutert, ist die Angabe der kompletten UGR-Tabelle in dem Datenblatt der Leuchte für den Endanwender beispielsweise nicht empfehlenswert, da diese zu Verwirrung führen kann. Somit wurde sich bei den meisten Herstellern auf die Angabe eines einzelnen Wertes des Referenzraumes 4H/8H mit der Reflexionsgradkombination 70/50/20 geeinigt. In dem oben genannten Kapitel wurde die gängigste Art für die Erzeugung des UGR-Referenzwertes beschrieben. Allerdings existieren einige andere Methoden mit unterschiedlichen Rundungsarten für die Festlegung der UGR-Klasse einer Leuchte.

Aus den vier Werten des Referenzraumes wird beispielsweise statt des Maximalwertes auch der Mittelwert bestimmt. Somit werden kleinere Referenzwerte erzeugt. Weiterhin müssen diese Referenzwerte einer UGR - Klasse zugeordnet werden, die einen Bereich von drei UGR-Punkten abdecken. Hierbei existieren mehrere Systeme, um den Wert in diese Klassen zu sortieren:

#### **Runden auf eine Nachkommastelle:**

Die erste Variante ist das Runden auf eine Nachkommastelle. Sobald der Wert des Referenzraumes um 0,1 UGR-Punkt über dem Grenzwert einer Klasse befindet, muss die darauf folgende UGR - Klasse angegeben werden. Dies ist die genaueste und sorgfältigste Art der Referenzwertbestimmung.

#### **Ganzzahliges Runden:**

Der ermittelte Referenzwert der UGR - Tabelle wird auf ein ganzzahligen Wert gerundet. Somit wird beispielsweise der Referenzwert 19,4 abgerundet auf 19, sodass die UGR-Klasse  $\leq 19$  eingetragen werden kann. Die Überschreitung des Mittelwertes wird dann von 19,5 auf 20 gerundet. Somit muss die nächst höhere Klasse angegeben werden.

#### **Runden nach den UGR-Grenzwerten:**

Da die UGR - Klassen jeweils 3 UGR - Punkte auseinander liegen, wird bei manchen Herstellern zwischen der Hälfte der Klasse gerundet. Beispielsweise wird bei einem Referenzwert von 22,4 auf die UGR - Klasse  $\leq 21$  abgerundet. Dieses Rundungssystem wird nicht empfohlen und ist bei den meisten Herstellern und Prüflaboren verpönt.

Ein einheitliches System für die Bestimmung der UGR - Klassifizierung ist von der CIE oder anderen Normungsgremien zurzeit nicht definiert.

### 5.3.3 Angaben der Leuchtendaten in LDT - Dateien

Das EULUMDAT - Format ist für den Austausch von Leuchtendaten zum Industriestandard in Europa und in vielen anderen Teilen der Welt geworden. Durch ihren einfachen Aufbau kann es allerdings zu einigen Fehlern in der Anwendung führen, die hier festgehalten werden sollen.

Die Abmaße der leuchtenden Fläche ist für die Bestimmung der UGR - Werte von großer Bedeutung. Diese kann allerdings nur für einfache Formen vollständig korrekt angegeben werden. In der Abbildung 5.10 wird eine Leuchte gezeigt, die viele kleinere Lichtaustrittsflächen besitzt und somit nicht mit einer Standardform gleichgesetzt werden kann. Somit muss ein äquivalenter Ersatzwert ermittelt werden, um eine LDT - Datei zu erzeugen. Weiterhin muss entschieden werden, welche Teile zu der leuchtenden Fläche hinzugezählt werden dürfen.

Die Interpretation in der LDT - Datei zeigt jedoch eine Leuchte, dessen Lichtaustrittsfläche stets zentriert in dem Gehäuse positioniert ist. Somit kann die reale sichtbare leuchtende Fläche durch dieses Dateiformat nicht abgebildet werden.

Da die Abmessungen einfach geändert und angepasst werden können, wird bei manchen Herstellern die leuchtende Fläche immer größer ausgelegt, damit sich der UGR-Wert verringert.

Des Weiteren wurden mehrdeutige Licht-Verteilungs-Kurven von einigen Herstellern entdeckt, die von den unterschiedlichen genutzten Berechnungsprogrammen anders interpretiert wurden.

Sobald ein größerer Winkelbereich der C-Ebenen gespeichert wird, als für die jeweilige Symmetrieeigenschaft benötigt, ist die daraus entstehende Licht-Verteilungs-Kurve mehrdeutig. Hierbei kann nun entschieden werden, ob die jeweilige Symmetrieeigenschaft oder die angegebenen C-Ebenen genutzt werden sollen. Falls sich diese C-Ebenen von den dazugehörigen Symmetrieebenen unterscheiden, kann die Licht-Verteilungs-Kurve dieser LDT - Datei nicht mehr eindeutig bestimmt werden.

Das einfachste Beispiel sind rotationssymmetrische Leuchten, welche lediglich eine C-Ebene benötigen ( $C_0$ ). Mit dieser einzelnen C-Ebene können alle anderen C-Ebenen bestimmt werden ( $C_0 = C_{15} = \dots = C_{345}$ ). Werden allerdings zwei C-Ebenen für eine rotationssymmetrische Leuchte angegeben ( $C_0, C_{90}$ ), die ungleich voneinander sind ( $C_0 \neq C_{90}$ ), so tritt die beschriebene Mehrdeutigkeit der LVK auf. Somit kommen bei einigen wenigen LDT - Dateien weitere Abweichungen zustande, die nicht von der Implementierung des UGR - Verfahrens stammen.

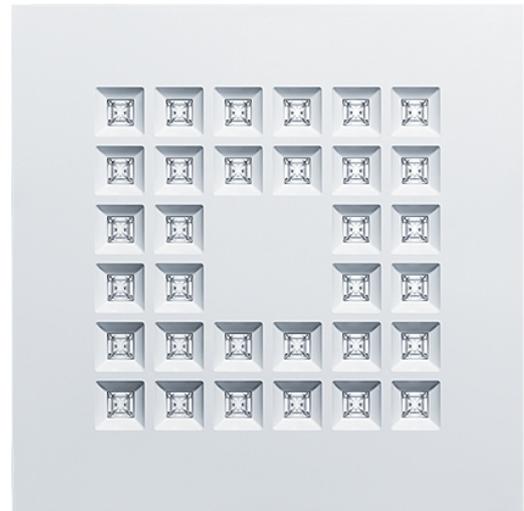


Abbildung 5.10: Beispielleuchte mit kleinen Lichtaustrittsflächen<sup>6</sup>

<sup>6</sup>ent. Zumtobel, *Leuchte MIREL EVOLUTION*

### 5.3.4 Zusammenfassung der Kritikpunkte und Empfehlung für eine Verbesserung des UGR - Blendbewertungssystems

In diesem Kapitel wurden nun mehrere Kritikpunkte an dem verwendeten Berechnungssystem zur Blendbewertung genannt, die hier nochmal zusammengefasst werden sollen. Auch eine Empfehlung zu diesen Kritikpunkten für eine etwaige Verbesserung dieses Berechnungsstandards sollen genannt werden.

In der Abbildung 5.11 werden die möglichen Methoden gezeigt, um die UGR - Werte in der Tabellenmethode und somit auch die entsprechenden Referenzwerte der Leuchte zu bestimmen.

Bislang wurde für die Implementierung des UGR - Verfahrens verschiedene Wirkungsgradverfahren wie aus den unterschiedlichen CIE und LiTG Normen programmiert und getestet. Im Abschnitt 5.3.1 wurden weitere Wirkungsgradverfahren gezeigt und dessen Ergebnisvarianz dargestellt.

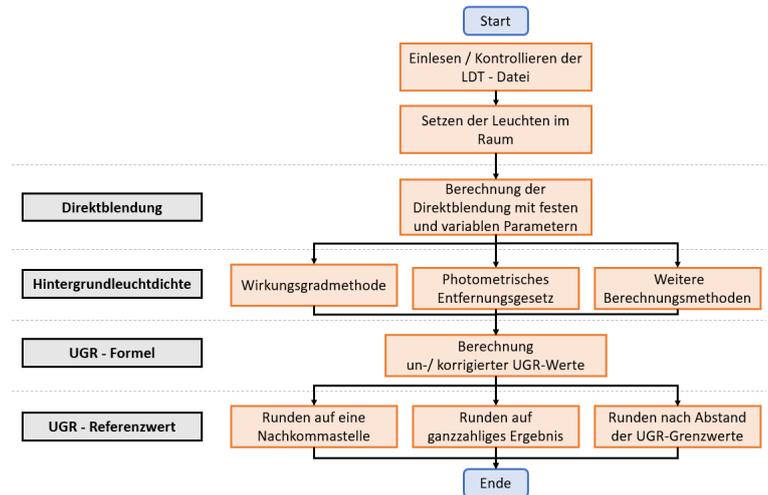


Abbildung 5.11: Übersicht der UGR - Berechnung

Eine weitere Möglichkeit für die Bestimmung der Hintergrundleuchtdichte wäre die Verwendung des Photometrischen Entfernungsgesetzes für die genaue Bestimmung der Beleuchtungsstärke der Wände. Allerdings sind diese Berechnungen sehr aufwändig, sodass die Bestimmung der Hintergrundleuchtdichte für jeden Standardraum mit den unterschiedlichen Reflexionsgraden zeitintensiv ist. Es existieren noch weitere Verfahren für die Bestimmung dieses Wertes, die allerdings hier nicht weiter aufgeführt werden sollen.

Weiterhin existieren die unterschiedlichen Rundungssysteme für die Berechnung des UGR - Referenzwertes des Raumes mit den Abmessungen 4H/8H beziehungsweise 8H/4H.

In dem folgenden Abschnitt sind nun die Verbesserungsempfehlungen aufgeführt, die für eine Vereinheitlichung des Unified - Glare Rating benötigt werden:

## **Berechnung der Hintergrundleuchtdichte**

Durch die verschiedenen Verfahren zur Bestimmung der Hintergrundleuchtdichte existieren viele unterschiedliche Ansichten für die Bestimmung von UGR - Werten. Somit ist das UGR - Blendverfahren nicht einheitlich und kann nur unter bestimmten Voraussetzungen als Vergleichsmittel zwischen Leuchtenherstellern verwendet werden. Da die Arbeitsstättenverordnung sowie die *DIN EN 12464-1* Grenzwerte für bestimmte Arbeitsstätten vorsieht, wird ein einheitliches Berechnungssystem benötigt.

Somit werden Vorgaben für die Berechnung von UGR - Werten benötigt, die ein Verfahren für das Berechnen der Hintergrundleuchtdichte vorschreiben. Weiterhin muss das gewählte Verfahren genau beschrieben werden, da die Normen für diese Bestimmung schon mehr als 30 Jahre alt sind und nicht vollständig dokumentiert sind.

Auch wird die korrekte Berechnung eines vereinheitlichten Verfahrens eher in einer neueren Norm (CIE 190-2010) vermutet als in den ersten Dokumenten der Berechnung. Somit mussten mehrere Normen für die Berechnung der Hintergrundleuchtdichte besorgt und gelesen werden, die weiterhin hohe Anschaffungskosten beinhaltet haben.

## **Rundungssystem für UGR - Referenzwerte**

In diesem Abschnitt wurden drei der typischsten Rundungssysteme vorgestellt und beschrieben, die alle ihre Anwendung bei entsprechenden Herstellern finden. Somit ist die Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Herstellern stark eingeschränkt, sodass ein Endnutzer oder Planer die Blendwirkung der Leuchte nicht einschätzen kann.

Das Runden auf eine Nachkommastelle ist hierbei das genaueste System aber auch ein ganzzahliges Runden wäre akzeptabel. Auch hier wäre eine Festlegung durch eine Norm angebracht.

## **Angaben in der LDT - Datei**

Da die Berechnung der sichtbaren leuchtenden Fläche ausschlaggebend für die UGR - Bestimmung ist, sollte diese sehr genau bestimmbar sein. Allerdings kann dies durch das einfach aufgebaute EULUMDAT - Format nicht für jede Leuchtenform abgebildet werden.

Um eine größere Variation für die Bestimmung der leuchtenden Fläche zu erhalten, wird eine Erweiterung dieses Dateiformates benötigt. Hierbei gibt es viele Methoden und Ideen, die für eine Verbesserung in Betracht gezogen werden können, die allerdings das Dateiformat verkomplizieren.

## 6 Anwendung des Unified Glare Ratings

Die Berechnung der UGR - Tabelle einer LDT - Datei, welche in dem Kapitel 4 ausführlich beschrieben wurde, ist zugleich die wichtigste Anwendung des Unified Glare Ratings für Leuchtenhersteller. Mit dem jeweilig entstandenen Referenzwert kann abgeschätzt werden, ob eine Leuchte für einen bestimmten Arbeitsbereich geeignet oder ungeeignet ist. Für diese Berechnung wird allerdings stets eine LDT - Datei der Leuchte benötigt.

In dem Entwicklungsprozess einer Leuchte ist es deswegen nicht unüblich, dass diese mehrere Male mit unterschiedlichen Optiken (Diffusoren, Reflektorflächen, usw.) und anderen elektrischen oder lichttechnischen Parametern erprobt werden, um einen gewissen Referenzwert für einen bestimmten Arbeitsbereich zu erreichen. Um diesen Entwicklungsprozess zu vereinfachen, wird ein Programm benötigt, welches aus einer simulativen Licht-Verteilungs-Kurve und aus den jeweiligen Leuchten-Parametern die UGR - Tabelle und die Referenzwerte bestimmt. Somit wurde mit MATLAB über mehrere grafische Benutzeroberflächen (engl. GUI's) eine Anwendung erzeugt, welche von dem Benutzer diese Parameter abfragt, um eine Abschätzung des UGR - Referenzwertes der geplanten Leuchte zu erhalten, sodass die Erstellung und das Vermessen von Testmustern für einen Leuchtenhersteller minimiert und somit kostbare Ressourcen gespart werden können.

In der Abbildung 6.1 wird der Abschnitt für die Erzeugung einer neuen Licht-Verteilungs-Kurve gezeigt. Auf der rechten Seite wurden die GUI - Elemente platziert, die für die Bearbeitung der links dargestellten Verteilungskurve benötigt werden.

Mit den Schieberegler werden die Skalierungsfaktoren bearbeitet, die für die Erstellung der LVK genutzt werden. Diese können auch manuell über die Textfelder eingegeben werden.

Mit den Optionsfeldern können zurzeit die Schrittweiten der Schieberegler angepasst werden und zwischen der Bearbeitung der unteren und oberen Lichtverteilung umgeschaltet werden.

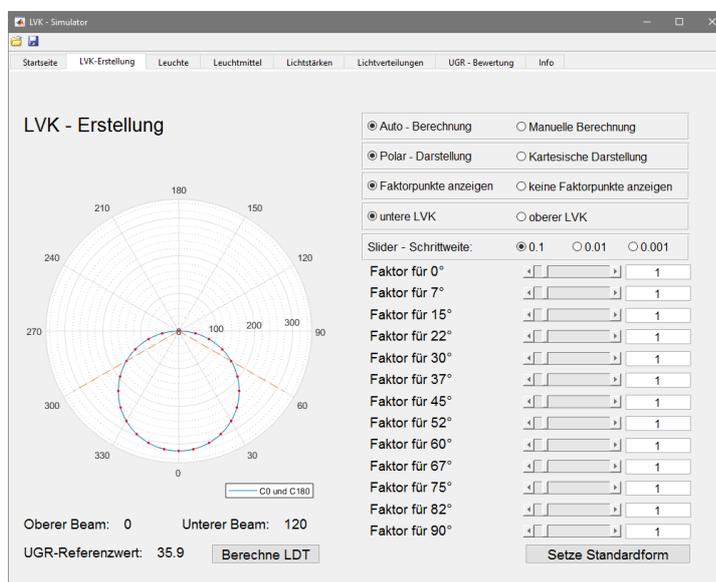


Abbildung 6.1: LVK - Simulator:  
Oberfläche der LVK - Erstellung

Weiterhin wurden auch einige Standardverteilungen hinterlegt, die über der Schaltfläche "Setze Standardform" ausgewählt werden können.

Unter dem Polar-Diagramm der Licht-Verteilungs-Kurve werden die Ergebnisse des Lichtaustrittswinkels für die untere und obere Halbebene angezeigt. Weiterhin wird der jeweilige UGR - Referenzwert dieser Leuchte dort angezeigt.

Die Licht-Verteilungs-Kurve wird mit einer Kosinus-Funktion angenähert, sodass eine C-Ebene mit einem Winkelintervall von  $\Delta\gamma = 1^\circ$  erzeugt wird. Dabei wird diese Funktion mit den Skalierungsfaktor für die unterschiedlichen  $\gamma$ -Winkel gestaucht bzw. gestreckt. Wie in der Abbildung gezeigt, werden 13 Winkelfaktoren für die Interpolation genutzt, dessen Berechnung im folgenden dargestellt ist:

$$I_{C,\gamma} = |F_i \cdot \cos(\gamma_i)|$$

mit  $F_i$  : i-ter Skalierungsfaktor des i-ten  $\gamma$ -Wertes

Da der Benutzer lediglich 13 Faktoren angibt, wird der Skalierungsfaktor zwischen zwei Werten linear interpoliert, sodass die obere und untere Halbebene der Licht-Verteilungs-Kurve vorgegeben werden kann.

Somit wird durch das Hinzufügen der Leuchteigenschaften eine LDT - Datei für eine runde Leuchte erzeugt, die für die Berechnung der UGR - Tabelle genutzt werden kann. Diese Eigenschaften können in den weiteren Registerkarten der Anwendung eingesehen und gesetzt werden. Zusätzlich können weitere Lichtverteilungs-Darstellung oder die vollständige UGR - Tabelle angezeigt werden.

Eine weitere Funktionalität ist das Einlesen von LDT - Dateien. Hierbei können die Felder der eingelesenen Datei bearbeitet und eine entsprechende UGR - Tabelle berechnet werden. Die Bearbeitung der Licht-Verteilungs-Kurve der entsprechenden Datei wurde bisher nicht implementiert.

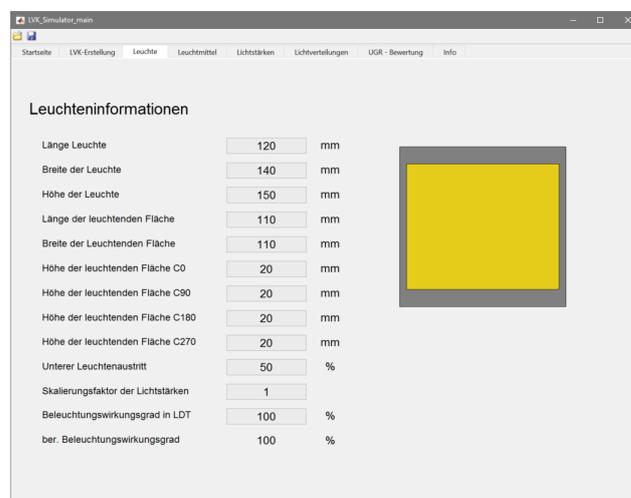


Abbildung 6.2: LVK - Simulator:  
Beispiel Leuchteninformation

Somit sind die folgenden Funktionalitäten in dieser Anwendung bereits implementiert:

- Erstellung von Licht-Verteilungs-Kurven für runde Leuchten
- Laden und Speichern von LDT - Dateien
- Setzen und Bearbeiten der benötigten LDT - Felder einer neuen Leuchte bzw. einer geladenen LDT - Datei
- Lichtverteilungs-Darstellungen (Polar, Kathesisch, Kegel, und 3D)
- Berechnung der UGR - Tabelle von simulierten / eingelesenen LDT - Dateien

Weitere Funktionalitäten und visuelle Anzeigen können aus dem Anwendungsprogramm entnommen werden, welches sich auf der Anhangs-CD befindet. Dieses MATLAB - Programm wurde als *Executable* exportiert, sodass selbst Benutzer ohne eine MATLAB - Lizenz dieses Programm nutzen können.

Allerdings sind noch einige Funktionalitäten geplant, die bislang noch nicht implementiert werden konnten. Diese Features werden im folgenden Absatz aufgelistet und weiter erläutert:

- **Erstellung von rechteckigen Leuchten:**  
Bislang wurden nur runde Leuchten simuliert, da hier nur eine C-Ebene angegeben werden muss. Bei rechteckigen Leuchten müssen mehrere C-Ebenen vorhanden sein, damit die Interpolation der Lichtstärke-Werte in einem möglichst kleinen Bereich gehalten werden können. Das implementierte UGR-Berechnungsprogramm fordert für diese Leuchtenart mindestens 4 C-Ebenen in einem Winkelintervall von  $45^\circ$ . Da die Erstellung von 4 C-Ebenen selbst mit dem erzeugten Erstellungstool viel Arbeit bedeutet, sollte eine Interpolationsfunktion erzeugt werden, welche mit der Angabe von zwei C-Ebenen und den jeweiligen Abmaßen der leuchtenden Fläche alle benötigte C-Ebenen annähert.
- **Mehrere Interpolationsfunktionen für die LVK:**  
Zurzeit werden die simulierten Licht-Verteilungs-Kurven durch eine faktorisierte Kosinus-Funktion erstellt, die somit gestaucht bzw. gestreckt werden kann. Somit können nur direkt/indirekt strahlende Verteilungskurven erstellt werden, da die Kosinusfunktion ihre Nullstelle bei  $90^\circ$  besitzt. Um seitlich strahlende Leuchten zu simulieren wird somit eine Sinus-Funktion benötigt.  
Weiterhin existieren mehrere andere Funktionsarten, die für die Erzeugung von Licht-Verteilungs-Kurven in Frage kommen würden. Interessant wären Kombinationsmöglichkeiten von verschiedenen Funktionen zwischen den jeweiligen Winkelbereichen. Somit werden sinnvolle GUI-Anpassung für die Auswahl der Interpolationsfunktionen sowie die Implementierung der Funktionen benötigt.
- **Bearbeitung der LVKs von eingelesenen Leuchten:**  
Eine weitere wichtige Funktion wäre das Nachbearbeiten der Licht-Verteilungs-Kurven von bereits erstellten bzw. von eingelesenen LDT - Dateien. Somit könnten weitere Anpassungen schneller getätigt werden als mit einem Nachbau der jeweiligen Verteilungskurve.
- **Benutzerdefinierte Standardformen für LVK:**  
Je nach Benutzer können sich, bei Mehrfachbenutzung dieses Programmes, verschiedene neue Standardformen bilden, die mit den jetzigen noch nicht abgebildet werden. Somit wäre das Hinzufügen von neuen Standardformen durch den Benutzer sehr sinnvoll. Um dies zu realisieren, müsse ein Datentyp vorgesehen werden, indem die jeweiligen Parameter für eine automatische Auswahlgenerierung und der jeweiligen Funktionsparameter erzeugt werden. Dies benötigt weitere GUI - Anpassungen sowie weitere Entwicklungszeit für ein praktisches Einlesesystem.
- **Verbesserte Interaktionsmöglichkeiten für LVK Erstellung:**  
Die Interaktionsmöglichkeit durch die Verwendung von Schiebereglern ist für den Benutzer stark eingeschränkt. Für eine benutzerfreundliche Erstellung der Licht-Verteilungs-Kurven werden andere Eingabemöglichkeiten benötigt wie beispielsweise einer drag&drop - Funktion.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden die theoretischen und geschichtlichen Hintergründe von Blendung sowie der psychologischen Blendbewertungsverfahren recherchiert und zusammengefasst. Weiterhin wurde das neuste Blendbewertungsverfahren der CIE, das Unified Glare Rating, allgemein vorgestellt und dessen verschiedene Anwendungen in der Industrie festgehalten.

Das Tabellenverfahren ist hierbei das meistgenutzte Anwendungsverfahren für das Unified Glare Rating und wurde in der Programmiersprache *MATLAB* implementiert. Die dafür benötigten Berechnungen wurden in dieser Arbeit allgemein dokumentiert. Da für die Berechnung der Hintergrundleuchtdichte, einem Parameter der Blendbewertungsformel, mehrere Berechnungsverfahren existieren, wurden zwei unterschiedliche Implementierungsarten erstellt.

Diese Berechnung wurde mit verschiedenen Anwendungen und Programmen von unterschiedlichen Firmen verglichen und analysiert. Hierbei fiel auf, dass sowohl die erstellten Implementierungen als auch die unterschiedlichen Vergleichsprogramme Abweichungen untereinander besitzen.

Eine nähere Analyse ergab, dass die verschiedenen Berechnungsverfahren der Hintergrundleuchtdichte eine hohe Varianz in den Ergebnissen der Blendbewertung erzeugen. Bislang wurde kein Verfahren für die Berechnung der Hintergrundleuchtdichte sowie für das Rundungssystem der UGR - Referenzwerte durch ein Normungsgremium festgelegt. Diese Normung muss für eine Vereinheitlichung der Blendbewertung erfolgen, sodass jeder Hersteller von Lichtprogrammen gleichwertige Ergebnisse erzeugen kann.

Mit der Anwendung für die Simulation von Innenraumleuchten wurde ein nützliches Tool für Leuchtenhersteller erstellt, um den Entwicklungsprozess von Leuchten zu vereinfachen. Diese Anwendung wurde mit *MATLAB* erzeugt, welches mit einfachen Anwendungselementen eine Licht-Verteilungs-Kurve sowie weitere benötigte Parameter von dem Benutzer abfragt, sodass Leuchtendateien erzeugt werden können, die mit der Implementierung des UGR - Tabellenverfahren ausgewertet werden. Somit können Leuchten vor oder während der Entwicklung durch die Angabe der Licht-Verteilungs-Kurve simuliert werden, um etwaige Eigenschaften im Leuchtaufbau oder in der Diffusorauswahl herauszufinden.

Die Realisierung von normgerechten Blendbewertungswerten sowie die genannten Erweiterungen der Anwendung für die Simulation von Licht-Verteilungs-Kurven stehen bislang noch aus und können als Anregung für weitere Untersuchungen in Betracht gezogen werden.

Weiterhin existieren viele weitere Forschungsfelder im Bereich der Blendung, wie beispielsweise der Untersuchung der Blendbewertung von unterschiedlichen Personengruppen.

## 8 Danksagung

An dieser Stelle sollen einige Danksagungen an einige Personen getätigt werden, die mir für das Erreichen des Titels zum Bachelor of Science in Elektrotechnik und Informationstechnik sehr geholfen haben und die für die Mitarbeit an dieser Thesis maßgeblich beteiligt waren.

### **Prof. Dr. rer. nat. Peter Möller**

Die Vorlesungen von Herr Prof. Möller in dem Bereich Physik waren für mich eine der besten und interessantesten Vorlesungen in dem gesamten Studium. Weiterhin durfte ich viele physikalische Experimente, die in diesen Vorlesungen vorgestellt werden, als studentische Hilfskraft aufbauen, kennenlernen und selbst hautnah erleben. Weiterhin hat Herr Möller mir die Möglichkeit gegeben, meine erlernten MATLAB Erfahrungen an neue Studenten als Tutor weiterzugeben, was auch meine Fähigkeiten in dieser Programmiersprache sowie im Leiten von Vorlesungen verstärkt hat.

Und als Prüfer meiner Bachelor-Arbeit möchte ich Herrn Möller für meine Studienzeit sowie für all die erbrachten Leistungen und Möglichkeiten danken, die er erbracht hat.

### **Dr. Claudius Noack**

Die Grundlagen sowie das Erwecken meines Interesses für die Lichttechnik wurde von Dr. Claudius Noack in seinem Wahl-Pflichtmoduls - Vorlesung entfacht. Und als Zweitprüfer und Lichtforscher konnte er mir viele Anregungen und Ideen liefern, die in dieser Arbeit eingeflossen sind.

Somit möchte ich ihm für seine Vorlesung und der Betreuung dieser Bachelor-Arbeit danken.

### **Dipl. Ing. Nils Haferkemper**

Als einer der Firmeninhaber und Entwickler eines Prüfungslabor für das Testen von unterschiedlichen Lichtprodukten hat Herr Nils Haferkemper viel Erfahrung und Wissen in diesem Thema. Trotz seines begrenzten Terminplanes hat Herr Haferkemper sich viel Zeit genommen, mir viele Berechnungen zu erklären und Hintergrundinformationen zu diesem Thema zu vermitteln. Auch nach der Abgabe dieser Arbeit sind weitere Termine für den konstruktiven Informationsaustausch geplant. Ich möchte Herrn Haferkemper sehr für seine Arbeit danken und hoffe weiterhin auf eine gute Zusammenarbeit in diesem und in zukünftigen Themen.

**Dipl. Ing. / Dipl. Wirt. Ing. Friedrich Wilhelm Bremecker**

Durch sehr informativen E-Mail-Austausch konnte mir Herr Friedrich Wilhelm Bremecker einen guten Einblick in die Berechnungen einer der größten Lichtberechnungssoftware geben. Ich danke hiermit Herrn Bremecker sowie der Firma DIAL für die übermittelten Informationen zu diesem Thema und hoffe auf weitere Diskussionen zur Berechnung der Hintergrundleuchtdichte.

**Karin-Maren Zerbig und Hans-Joachim Zerbig**

Ohne die riesige Unterstützung meiner Eltern wäre weder mein Studium noch das Erreichen einer vollendeten Abschlussarbeit für mich möglich gewesen. Als Zinkel und Lotte habt ihr mich auf meinem Weg begleitet und mir diesen so einfach wie möglich gemacht. Somit seid Ihr die besten Eltern, die ich habe!

**Leon Ladwig:**

Als Orchesterkollege, Ausbildungs- und Studiums-Mitstreiter oder auch als bester Freund

**Regina Wolf:**

Als die beste Tanzpartnerin, die ich je hatte und je haben werde.

**Patrick Beier, Lukas Ostermann, Johannes Petersen, Gido Zimmermann:**

Als Studienkollegen und Praktikumspartner, mit denen das Studieren immer Spaßig war.

**Marvin Thaden, Christian Schröter, Sergej Pereguda, Nils Kornau, Ian Häbel:**

Als Korrekturleser, Ideengeber oder auch als Diskussionspartner.

# 9 Anhang

## 9.1 Pseudocode für das Einlesen von LDT - Dateien

### 9.1.1 Einlesen des EULUMDAT - Formates

```
% Setze Zeile 1 bis 26 in Strukturfelder F1 bis F26 (event. Datentypen von Zeilen anpassen)
LDT.F1 = Line(1); LDT.F2 = Line(2); ...; LDT.F26 = (double) Line(26);
% Setze Alle Lampensets von Zeile 27 bis 32 in die jeweiligen Felder
for ( i = 1 to F26 )
    F27(1,i) = Line( 27 + (i-1)*6 ); F28(1,i) = Line( 28 + (i-1)*6 ); ...
end
% Berechne alle Endzeilen der gesetzten Felder
offset1 = 32 + (F26-1)*6;
offset2 = offset1 + 10;
offset3 = offset2 + F4;
offset4 = offset3 + F6;
% Setze die Felder F33 bis F35 mit den berechneten Endzeilen
LDT.F33 = Line( offset1 + 1 to offset2 )
LDT.F34 = Line( offset2 + 1 to offset3 )
LDT.F35 = Line( offset3 + 1 to offset4 )
% Bestimme die Anzahl der einzulesenden C-Ebenen
switch (LDT.F3)
case(1):
    C_end_value = 1
    break;
case(2):
case(3):
    C_end_value = 1+LDT.F4/2
    break;
case(4):
    C_end_value = 1+LDT.F4/4
    break;
end
% Lese die jeweiligen C-Ebenen ein
for i = [ 1 ] to [ C_end_value ]
    LDT.F36(1 to LDT.F6,i) = Line( [(offset4 + 1)+(i-1)*LDT.F6] to [(offset4 + (i-1)*LDT.
        F6+LDT.F6)] );
end
```

Listing 9.1: Pseudocode für die Korrektur der Lichtstärke-Werte

### 9.1.2 Korrekturberechnung der jeweiligen C-Ebenen

```
% sind die ersten Werte der C-Ebenen ungleich
if( LDT.F36(1,1) != LDT.F36(1,2) != ... )
    % Bestimme Mittelwert mean_I0 aus den ersten Werten der jeweiligen C-Ebenen
    mean_I0 = mean( LDT.F36(1,1), LDT.F36(1,2), ... );
    % Berechne Skalierungsfaktor SF und korrigiere Lichtstaerkewerte aller C-Ebenen
    for ( i = 1 to LDT.F4 )
        SF = mean_I0 / LDT.F36(1,i);
        LDT.F36(1:end, i) = LDT.F36(1:end, i) * SF
    end
end
```

Listing 9.2: Pseudocode für die Korrektur der Lichtstärke-Werte

### 9.1.3 Berechnung der Partiallichtströme und Betriebwirkungsgrade

```

% Berechne die Verschiebung der Gamma Winkel fuer Partiallichtstoerme
Gamma_shifting = LDT.F7 / 2;
% Berechne die jeweiligen Raumwinkelöffnungen fuer die Partiallichtstroeme /
gamma_1 = LDT.F35 - Gamma_shifting;
gamma_2 = LDT.F35 + Gamma_shifting;
gamma_Zonal_Flux = gamma_2;
% Da es keine kleineren/größeren Winkel als 0 / 180 gibt, werden diese Winkel eingesetzt
if(gamma_1(1) < 0)
    gamma_1(1) = 0;
end
if(gamma_2(end) > 180)
    gamma_2(end) = 180;
end
% Berechnung des Raumwinkels Omega aller Teillichtströme
Omega = 2 * pi * ( cos(gamma_1) - cos(gamma_2) );
% Normierung der Lichtstärke - Wert aufheben und
% Summierung der C-Planewerte und Bildung des Mittelwertes
I = (LDT.F36) * (LDT.F29 / 1000);
I_Avg = mean(I(1 to end, 1), I(1 to end,2),...)
% Berechnung der Partiallichtströme der einzelnen Abschnitte
Zonal_Flux_values = I_Avg .* Omega;
% Summierung der Partiallichtstrom-Werte jeweils beginnend von 0
for i = 1 to LDT.F6
    Zonal_Flux(i) = sum(Zonal_Flux_values(1:i));
end
% Berechnung / Interpolation der Zonal-Flux Werte
% Absolutberechnung der zonalen Lichtströme (nicht in 1000 lm)
FCL(1 to 4) = Interpolation_of_Zonal_Flux(gamma_Zonal_Flux, Zonal_Flux, [41.4, 60, 75, 90]);
%% Berechnung der Betriebswirkungsgrade der Leuchte (für das erste Lampenset)
LOR = Zonal_Flux(end) / LDT.F29(1);
DLOR = FCL4 * SF / LDT.F29(1);
ULOR = LOR - DLOR;
%% Berechnung der N - Faktoren aus CIE 52-82
N1 = FCL1 / FCL4;    N2 = FCL2 / FCL4;    N3 = FCL3 / FCL4;    N4 = DLOR / LOR;    N5 = LOR;

```

Listing 9.3: Pseudocode für die Berechnung der Partiallichtströme und Betriebwirkungsgrad

## 9.2 Berechnung der Leuchtenpositionen

```

% Berechne die benötigten Abstände
S = SHR * H;    S2 = S / 2;
% Setze Zählvariable
i = 0;
% Bestimmung der jeweiligen Koordinaten der Leuchten
for (y = S2 over S to Room.Y)
    for (x = -Room.X/H + S2 over S to Room.X/H - S2)
        i = i + 1;
        Luminaire.X(i) = x;
        Luminaire.Y(i) = y;
    end
end
% Setze Leuchtenanzahl
Luminaire.Counter = i;

```

Listing 9.4: Pseudocode für die Bestimmung der Leuchtenpositionen

## 9.3 Berechnung der Direktblendung

### 9.3.1 Berechnung der Distanz / Sichtwinkel zwischen Leuchte und Beobachter

```

% Berechne Abstand jeder Leuchte zum Beobachter
Luminaire.r = sqrt((Luminaire.X)^2 + (Luminaire.Y)^2 + (H)^2);
% Berechne Gamma Winkel / Elevation Winkel jeder Leuchte zum Beobachter
% Für Quer/Längsrichtung gleicher Wert
Luminaire.elevation = acos( H / Luminaire.r );
% Berechnung des C - Winkels für die Querrichtung
Luminaire.azimuth_c = atan( Luminaire.X / Luminaire.Y );
% Bestimme alle Leuchten auf der linken Seite des Beobachters
mask = Luminaire.X < 0;
% Korrigiere den C - Winkel der Leuchten auf der linken Seite
Luminaire.azimuth_c(mask) = Luminaire.azimuth_c(mask) + 360;
% Addition von 90 Grad für alle C - Winkel (andere Seite betrachten)
Luminaire.azimuth_e = 90 + atan( Luminaire.X / Luminaire.Y );

```

Listing 9.5: Pseudocode für die Bestimmung der Leuchtenpositionen

### 9.3.2 Berechnung der sichtbaren Leuchtenfläche

```

% Berechne Mittelwert der Höhe der leuchtenden Fläche
Luminaire_hight = mean(LDT.F18 to LDT.F21);
% Ist die leuchtende Fläche rechteckig?
if(LDT.F13 > 0 && LDT.F14 > 0)
    % Ist die Leuchte ein Cube
    if(Luminaire_hight > 0)
        Leuchten.Ae/Ac = calc_cube_surface();
    else
        Leuchten.Ae/Ac = calc_rectangular_surface();
    end
end
% Ist die leuchtende Fläche rund
if(LDT.F13 > 0 && LDT.F14 == 0)
    % Ist die Leuchte ein Zylinder
    if(Luminaire_hight > 0)
        % Sonderfall: Ist die Leuchte eine Sphere / eine Kugel
        % ist die Höhe des Gehäuses gleich Höhe der leuchtenden Flächen
        if( LDT.F16 == LDT.18 to LDT.F21 )
            Leuchten.Ae/Ac = calc_sphere_surface();
        else
            Leuchten.Ae/Ac = calc_cylinder_surface();
        end
    else
        Leuchten.Ae/Ac = calc_round_surface();
    end
end
end

```

Listing 9.6: Pseudocode für die Bestimmung der sichtbaren Leuchtflächen

## 9.3.3 Berechnung des Positionsindexes

Positionierungsindex Interpolationstabelle

		H/Y																			
X/Y	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	X/Y
0	1	1,26	1,53	1,9	2,35	2,86	3,5	4,2	5	6	7	8,1	9,25	10,35	11,7	13,15	14,7	16,2	inf	inf	0
0,1	1,05	1,22	1,46	1,8	2,2	2,75	3,4	4,1	4,8	5,8	6,8	8	9,1	10,3	11,6	13	14,6	16,1	inf	inf	0,1
0,2	1,12	1,3	1,5	1,8	2,2	2,66	3,18	3,88	4,6	5,5	6,5	7,6	8,75	9,85	11,2	12,7	14	15,7	inf	inf	0,2
0,3	1,22	1,38	1,6	1,97	2,25	2,7	3,25	3,9	4,6	5,45	6,45	7,4	8,4	9,5	10,85	12,1	13,7	15	inf	inf	0,3
0,4	1,32	1,47	1,7	1,96	2,35	2,8	3,3	3,9	4,6	5,4	6,4	7,3	8,3	9,4	10,6	11,9	13,2	14,6	16	inf	0,4
0,5	1,43	1,6	1,82	2,1	2,48	2,91	3,4	3,98	4,7	5,5	6,4	7,3	8,3	9,4	10,5	11,75	13	14,4	15,7	inf	0,5
0,6	1,55	1,72	1,98	2,3	2,65	3,1	3,6	4,1	4,8	5,5	6,4	7,35	8,4	9,4	10,5	11,7	13	14,1	15,4	inf	0,6
0,7	1,7	1,88	2,12	2,48	2,87	3,3	3,78	4,3	4,88	5,6	6,5	7,4	8,5	9,5	10,5	11,7	12,85	14	15,2	inf	0,7
0,8	1,82	2	2,32	2,7	3,08	3,5	3,92	4,5	5,1	5,75	6,6	7,5	8,6	9,5	10,6	11,75	12,8	14	15,1	inf	0,8
0,9	1,96	2,2	2,54	2,9	3,3	3,7	4,2	4,75	5,3	6	6,75	7,7	8,7	9,65	10,75	11,8	12,9	14	15	16	0,9
1	2,11	2,4	2,75	3,1	3,5	3,91	4,4	5	5,6	6,2	7	7,9	8,8	9,75	10,8	11,9	12,95	14	15	16	1
1,1	2,3	2,55	2,92	3,3	3,72	4,2	4,7	5,25	5,8	6,55	7,2	8,15	9	9,9	10,95	12	13	14	15	16	1,1
1,2	2,4	2,75	3,12	3,5	3,9	4,35	4,85	5,5	6,05	6,7	7,5	8,3	9,2	10	11,02	12,1	13,1	14	15	16	1,2
1,3	2,55	2,9	3,3	3,7	4,2	4,65	5,2	5,7	6,3	7	7,7	8,55	9,35	10,2	11,2	12,25	13,2	14	15	16	1,3
1,4	2,7	3,1	3,5	3,9	4,35	4,85	5,35	5,85	6,5	7,25	8	8,7	9,5	10,4	11,4	12,4	13,25	14,05	15	16	1,4
1,5	2,85	3,15	3,65	4,1	4,55	5	5,5	6,2	6,8	7,5	8,2	8,85	9,7	10,55	11,5	12,5	13,3	14,05	15,02	16	1,5
1,6	2,95	3,4	3,8	4,25	4,75	5,2	5,75	6,3	7	7,65	8,4	9	9,8	10,8	11,75	12,6	13,4	14,2	15,1	16	1,6
1,7	3,1	3,55	4	4,5	4,9	5,4	5,95	6,5	7,2	7,8	8,5	9,2	10	10,85	11,85	12,75	13,45	14,2	15,1	16	1,7
1,8	3,25	3,7	4,2	4,65	5,1	5,6	6,1	6,75	7,4	8	8,65	9,35	10,1	11	11,9	12,8	13,5	14,2	15,1	16	1,8
1,9	3,43	3,86	4,3	4,75	5,2	5,7	6,3	6,9	7,5	8,17	8,8	9,5	10,2	11	12	12,82	13,55	14,2	15,1	16	1,9
2,0	3,5	4	4,5	4,9	5,35	5,8	6,4	7,1	7,7	8,3	8,9	9,6	10,4	11,1	12	12,85	13,6	14,3	15,1	16	2
2,1	3,6	4,17	4,65	5,05	5,5	6	6,6	7,2	7,82	8,45	9	9,75	10,5	11,2	12,1	12,9	13,7	14,35	15,1	16	2,1
2,2	3,75	4,25	4,72	5,2	5,6	6,1	6,7	7,35	8	8,55	9,15	9,85	10,6	11,3	12,1	12,9	13,7	14,4	15,15	16	2,2
2,3	3,85	4,35	4,8	5,25	5,7	6,22	6,8	7,4	8,1	8,65	9,3	9,9	10,7	11,4	12,2	12,95	13,7	14,4	15,2	16	2,3
2,4	3,95	4,4	4,9	5,35	5,8	6,3	6,9	7,5	8,2	8,8	9,4	10	10,8	11,5	12,25	13	13,75	14,45	15,2	16	2,4
2,5	4	4,5	4,96	5,4	5,85	6,4	6,95	7,55	8,25	8,85	9,5	10,05	10,85	11,55	12,3	13	13,8	14,5	15,25	16	2,5
2,6	4,07	4,55	5,05	5,47	5,95	6,46	7	7,65	8,35	8,95	9,55	10,1	10,9	11,6	12,32	13	13,8	14,5	15,25	16	2,6
2,7	4,1	4,6	5,1	5,53	6	6,5	7,05	7,7	8,4	9	9,6	10,16	10,92	11,63	12,35	13	13,8	14,5	15,25	16	2,7
2,8	4,15	4,62	5,15	5,56	6,05	6,55	7,08	7,73	8,45	9,05	9,65	10,2	10,95	11,65	12,35	13	13,8	14,5	15,25	16	2,8
2,9	4,2	4,65	5,17	5,6	6,07	6,57	7,12	7,75	8,5	9,1	9,7	10,23	10,95	11,65	12,35	13	13,8	14,5	15,25	16	2,9
3,0	4,22	4,67	5,2	5,65	6,12	6,6	7,15	7,8	8,55	9,12	9,7	10,23	10,95	11,65	12,35	13	13,8	14,5	15,25	16	3

Abbildung 9.1: Interpolationstabelle für den Positionsindex

Gelb markierter Wert → gefundener Fehler in der Tabelle der CIE 117-1995<sup>1</sup>

```

% Lade / Erzeuge die Positionstabelle von Guth
% Bestimme die Zeilen und Spalten - Vektoren für die jeweiligen Tabellenwerte
P_table = load( 'Positionindex_Table' );
p_rows = 0:0.1:3;    p_collums = 0:0.1:1.9;
% Berechne Tabellen Zeilen / Spalten für die jeweilige Leuchte
X_to_Y = abs( Luminaire.X / Luminaire.Y );    H_to_Y = Luminaire.H / Luminaire.Y;
% Berechne für jede Leuchte den Positionsindex
for i = 1 to Luminaire.Counter
    % Sind die Tabellenwerte nicht vorhanden, dann setze P auf unendlich
    if(X_to_Y(i) > 3 or H_to_Y(i) > 1.9)
        Leuchten.P(i) = inf;
    else
        % finde die Tabellenwerte, die am dichtesten anliegen
        [row(1,2), collum(1,2), Table_values(1 to 4)] = find_right_table_values();
        % Bestimme den Positionsindex mittels Bilinearer Interpolation
        Leuchten.P(i) = bilinear_Interpolation( row(1,2) , collum(1,2),
        Table_values(1 to 4), H_to_Y(i), X_to_Y(i) );
    end
end
end

```

Listing 9.7: Pseudocode für die Bestimmung des Positionsindexes jeder Leuchte

<sup>1</sup>CIE 117-1995, *Discomfort Glare in Interior Lighting*

### 9.3.4 Berechnung der jeweiligen Lichtstärke-Werte der Leuchten

```

for (i = 1 to Luminaire.Counter)
  % Ist der Positionsindex undefiniert / unendlich
  if(Luminaire.P(i) == inf)
    Luminaire.Ie(i) = 0;
    Luminaire.Ic(i) = 0;
  else
    % finde die Gamma-Winkel, die am dichtesten anliegen
    row(1,2) = find_elevation_values(LDT.F35, Luminaire.elevation(i));
    % finde die C-Winkel für Quer und Längsrichtung, die am dichtesten anliegen
    collum_c(1,2) = find_azimuth_values(LDT.F34, Luminaire.azimuth_c(i));
    collum_e(1,2) = find_azimuth_values(LDT.F34, Luminaire.azimuth_e(i));
    % Ermittle die Werte für die Quer- und Längsrichtung aus der Lichtstärke-
      Tabelle
    Value_c(1 to 4) = LDT.F36([row(1,2), collum_c(1,2)]);
    Value_e(1 to 4) = LDT.F36([row(1,2), collum_e(1,2)]);
    % Interpoliere Lichtstärke-Werte für Quer- und Längsrichtung
    Luminaire.Ic(i) = bilineare_Interpolation(row(1,2), collum_c(1,2), Vc(1 to 4)
      , ...
      Luminaire.azimuth_c(i), Luminaire.elevation(i) );
    Luminaire.Ie(i) = bilineare_Interpolation(row(1,2), collum_e(1,2), Ve(1 to 4)
      , ...
      Luminaire.azimuth_e(i), Luminaire.elevation(i) );
  end
end

```

Listing 9.8: Pseudocode für die Bestimmung der jeweiligen Lichtstärke-Werte der Leuchten

## 9.4 Berechnungen für die Hintergrundleuchtdichte

### 9.4.1 Berechnung der Geometric Multiplier und der Direkt-Lichtstromanteil der Nutzoberfläche

#### 1. Aufstellung der DS - Matrix

$$D = \frac{1}{2\pi} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 0 & -2 & -6 & -12 \\ 0 & 0 & 3 & 12 \\ 0 & 0 & 0 & -4 \end{bmatrix} \quad S = \begin{bmatrix} 1/4 & 1/16 & 1/64 & 1/256 \\ 1/2 & 1/4 & 1/8 & 1/16 \\ 3/4 & 9/16 & 27/64 & 81/256 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$DS = D \cdot S^{-1} = \frac{1}{6\pi} \cdot \begin{bmatrix} 1/4 & 1/16 & 1/64 & 1/256 \\ 1/2 & 1/4 & 1/8 & 1/16 \\ 3/4 & 9/16 & 27/64 & 81/256 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

#### 2. Berechnung der G-Faktoren der jeweiligen Teilfläche der k-ten Leuchte mit den jeweiligen Längen/Breiten

$$x = \frac{X_i}{H} \quad y = \frac{Y_i}{H} \quad \text{mit } X_i / Y_i : \text{ Abmessung der Teilflaechen ( I II III VI )}$$

$$G1_i = 1 \cdot \left[ \arctan \left( \frac{x \cdot y}{\sqrt{1+x^2+y^2}} \right) \right]$$

$$G2_i = \frac{1}{2} \cdot \left[ \frac{x}{\sqrt{1+x^2}} \cdot \arctan \left( \frac{y}{\sqrt{1+x^2}} \right) + \frac{y}{\sqrt{1+y^2}} \cdot \arctan \left( \frac{x}{\sqrt{1+y^2}} \right) \right]$$

$$G3_i = \frac{1}{3} \cdot \left[ G1 + \left( \frac{1}{1+x^2} + \frac{1}{1+y^2} \right) \cdot \frac{x \cdot y}{\sqrt{1+x^2+y^2}} \right]$$

$$G4 = \frac{1}{4} \cdot \left[ 2 \cdot G2 + \frac{x}{2 \cdot (\sqrt{1+x^2})^3} \cdot \arctan \left( \frac{y}{\sqrt{1+x^2}} \right) + \dots \right. \\ \left. \frac{y}{2 \cdot (\sqrt{1+y^2})^3} \cdot \arctan \left( \frac{x}{\sqrt{1+y^2}} \right) + \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{1+x^2} + \frac{1}{1+y^2} \right) \cdot \frac{x \cdot y}{1+x^2+y^2} \right]$$

#### 3. Multiplikation der G-Faktoren der jeweiligen Teilfläche mit der DS - Matrix

$$GM_i = [G1_i + G2_i + G3_i + G4_i] \cdot DS \quad GM : \text{ Vektor mit vier Werten}$$

#### 4. Summierung der GM-Faktoren von den jeweiligen Teilflächen der k-ten Leuchte

$$GM_k = GM_I + GM_{II} + GM_{III} + GM_{VI}$$

#### 5. Summierung der GM-Faktoren aller Leuchten für die Geometric Multiplier der Anlage

$$GML = \frac{\sum GM}{C} \quad \text{mit } C : \text{ Anzahl der Leuchten}$$

#### 6. Berechnung des Direkt-Lichtstromanteils zur Nutzoberfläche F4

$$F4 = GML_1 \cdot FCL_1 + GML_2 \cdot FCL_2 + GML_3 \cdot FCL_3 + GML_4 \cdot FCL_4 \\ = GML_1 \cdot N_1 + GML_2 \cdot N_2 + GML_3 \cdot N_3 + GML_4$$

## Pseudocode für die Berechnung der Geometric Multiplier

```

% Aufstellen der DS - Matrix
DS = 1/(6*pi) * ...;
% Berechne die Geometric Multiplier Werte für jede Leuchte
for (i = 1 to Luminaire.Counter)
    % Verschiebung des Koordinatenursprung in die linke untere Ecke des Raumes
    % Berechnung der Längen und Breiten Rauteilflächen
    x(1) = ( Luminaire.X(i) + Room.X/2 ) / H;
    x(2) = ( Room.X - ( Luminaire.X(i) + Room.X/2 ) ) / H;
    y(1) = ( Luminaire.Y(i) ) / H;
    y(2) = ( Room.Y - Luminaire.Y(i) ) / H;
    % Initialisiere Summationsvariable
    Summe = 0;
    % Berechne für jede Rauteilfläche die Geometric Multiplierer - Funktionen
    for (j = 1 to 2)
        for (k = 1 to 2)
            % ist der x(j)-Wert größer als der y(k)-Wert
            if(x(j) > y(k))
                swap(x(j), y(k));
            end
            % Berechne die jeweiligen Geometric Multiplier Werte jeder Leuchte
            G(1 to 4) = calculate_GML_function(x, y);
            % Multiplizierte die G - Werte mit der DS - Matrix
            GM(1 to 4) = G(1 to 4) * DS;
            % Summiere die jeweiligen Ergebnisse
            Summe = Summe + GM(1 to 4);
        end
    end
    % Berechne den jeweiligen Geometric Multiplierer - Wert der Leuchte auf das
    % Endergebnisse
    GML = GML + Summe
end
% Teile die Geometric Multiplier mit der Anzahl der Leuchten
GML = GML / Luminaire.Counter;

```

Listing 9.9: Pseudocode für die Bestimmung der Geometric Multiplier der Leuchtenpositionen

## 9.4.2 Berechnung der Interreflexionsgrade nach LiTG 3.5

### 1. Berechnungsformel des Interreflexionswirkungsgradverfahren der LiTG 3.5:

$$\begin{aligned}
 B &= \frac{X_{Raum}}{H} \\
 C &= \frac{Y_{Raum}}{H} \\
 k &= \frac{X_{Raum} \cdot Y_{Raum}}{H \cdot (X_{Raum} + Y_{Raum})}
 \end{aligned}
 \quad
 \varphi_R = \frac{1}{\pi} \cdot \left[ \frac{1}{B \cdot C} \cdot \log_2 \left( \frac{(1 + B^2) \cdot (1 + C^2)}{1 + B^2 + C^2} \right) - \frac{2}{B} \cdot \arctan(C) - \frac{2}{C} \cdot \arctan(B) + \dots \right.$$

$$\left. \frac{2}{C} \cdot \sqrt{1 + C^2} \cdot \arctan \left( \frac{B}{\sqrt{1 + C^2}} \right) + \frac{2}{B} \cdot \sqrt{1 + B^2} \cdot \arctan \left( \frac{C}{\sqrt{1 + B^2}} \right) \right]$$

### 2. Definitionen der Werte in der inversen Matrix:

$$\begin{aligned}
 \rho_C &= \text{Reflexionsgrad der Decke} & \varphi_{14} &= \varphi_{41} = \varphi_R & \varphi_{31} &= \varphi_{34} = \varphi_{13} \cdot \frac{k}{2} \\
 \rho_W &= \text{Reflexionsgrad der Wände} & \varphi_{13} &= \varphi_{43} = 1 - \varphi_{14} & \varphi_{33} &= 1 - 2 \cdot \varphi_{31} \\
 \rho_F &= \text{Reflexionsgrad des Bodens}
 \end{aligned}$$

### 3. Aufstellen der Interreflexionsmatrix und dessen inverse Matrix:

$$F = \begin{bmatrix} 1 & -\varphi_{31}\rho_W & -\varphi_{41}\rho_F \\ -\varphi_{13}\rho_C & 1 & -\varphi_{33}\rho_W \\ -\varphi_{14}\rho_C & -\varphi_{34}\rho_W & 1 \end{bmatrix}
 \quad
 TF = E = F^{-1} = \begin{bmatrix} \eta_{11} & \eta_{13} & \eta_{14} \\ \eta_{31} & \eta_{33} & \eta_{34} \\ \eta_{41} & \eta_{43} & \eta_{44} \end{bmatrix}$$

Parameter	Bez.	Ergebnis	Bez.
- Raumdimension	Room.X/Y	- Interreflexionswirkungsgrade	TF
- Höhe H	H	(Transfer Factor)	
- Reflexionsgrad der Raumflächen	$\rho$		

#### *% Berechnung des Raumindexes*

```
k = Room.X * Room.Y / (H * (Room.X + Room.Y));
```

#### *% Berechnung von spezifischen Raumgrößenwerten für die Berechnung*

```
B = Room.X/H; C = Room.Y/H;
```

#### *% Berechne Phi\_r*

```
Phi_r = 1/pi * ...;
```

#### *% Berechnung aller weiteren Matrixwerte*

```
phi14 = Phi_r; phi13 = 1-phi14; phi31 = phi13 * k/2;
```

```
phi41 = Phi_r; phi43 = 1-phi14; phi34 = phi13 * k/2;
```

```
phi33 = 1 - (2 * phi31);
```

#### *% Setze die Ergebnisse in die RM Matrix*

```
RM = [ 1 -phi31*Rho_W -phi41*Rho_F; ...
```

```
-phi13*Rho_C, 1-(phi33*Rho_W) -phi43*Rho_F; ...
```

```
-phi14*Rho_C, -phi34*Rho_W 1 ];
```

#### *% Berechne die Interreflexionswirkungsgrade ( Transfer Factors )*

```
TF = RM^-1;
```

Listing 9.10: Pseudocode für die Berechnung der Interreflexionsgrade der LiTG 3.5

### 9.4.3 Berechnung der Interreflexionsgrade nach CIE 40

#### 1. Berechnungsformel des Interreflexionswirkungsgradverfahren der CIE 40:

$$\begin{aligned}
 A &= X_{\text{Raum}} \\
 B &= Y_{\text{Raum}} \\
 k &= \frac{X_{\text{Raum}} \cdot Y_{\text{Raum}}}{H \cdot (X_{\text{Raum}} + Y_{\text{Raum}})}
 \end{aligned}
 \quad
 g_{i,j} = \frac{2 \cdot AB}{\pi} \cdot \left[ \frac{\sqrt{B^2 + H^2}}{B} \cdot \arctan\left(\frac{A}{\sqrt{B^2 + H^2}}\right) + \frac{\sqrt{A^2 + H^2}}{A} \cdot \arctan\left(\frac{B}{\sqrt{A^2 + H^2}}\right) - \dots \right.$$

$$\left. \frac{H}{B} \cdot \arctan\left(\frac{A}{H}\right) - \frac{H}{A} \cdot \arctan\left(\frac{B}{H}\right) + \frac{H^2}{2 \cdot A \cdot B} \cdot \log_2\left(\frac{(A^2 + H^2) \cdot (B^2 + H^2)}{(A^2 + B^2 + H^2) \cdot H^2}\right) \right]$$

#### 2. Definitionen der Werte in der inversen Matrix:

$$\begin{aligned}
 \rho_C &= \text{Reflexionsgrad der Decke} & g_{14} &= g_{41} = g_{i,j} & g_{13} &= g_{31} = g_{34} = g_{43} = (A \cdot B - g_{14}) \\
 \rho_W &= \text{Reflexionsgrad der Waende} & g_{11} &= g_{44} = 0 & g_{33} &= 2 \cdot \left( \frac{A \cdot B}{K} - A \cdot B + g_{14} \right) \\
 \rho_F &= \text{Reflexionsgrad des Bodens}
 \end{aligned}$$

#### 3. Berechnung der inverse Matrix:

$$MR = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \left( \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/K & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \frac{1}{A \cdot B} \cdot \begin{bmatrix} g_{11} & g_{13} & g_{14} \\ g_{31} & g_{33} & g_{34} \\ g_{41} & g_{43} & g_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \rho_C & 0 & 0 \\ 0 & \rho_W & 0 \\ 0 & 0 & \rho_F \end{bmatrix} \right)$$

#### 4. Aufstellen der Interreflexionsmatrix:

$$TF = RM = MR^{-1} = \begin{bmatrix} TF_{11} & TF_{11} & TF_{11} \\ TF_{11} & TF_{33} & TF_{44} \\ TF_{41} & TF_{43} & TF_{44} \end{bmatrix}$$

Parameter	Bez.	Ergebnis	Bez.
- Raumdimension	Room.X/Y	- Interreflexionwirkungsgrade	TF
- Höhe H	H	(Transfer Factor)	
- Reflexionsgrad der Raumflächen	$\rho$		

```

% Berechnung des Raumindex
K = Room.X * Room.Y / (H * (Room.X + Room.Y) );
% Berechnung der Interreflexionsfunktion für die ersten Matrizen - Werte
g(1,4) = (2*A*B)/pi * ( ...
% Berechne die weiteren Matrizen-Werte
g(4,1) = g(1,4);          g(1,1) = 0;          g(3,3) = 2*((A*B)/(K) - (A*B) + g(1,4));
g(3,1) = g(1,3);          g(4,4) = 0;          g(1,3) = A*B - g(1,4);
g(3,4) = g(1,3);          g(4,3) = g(3,4);
% Stelle benötigte Matrizen auf
one = [1,1,1 ; 0,1,1 ; 0,0,1]; C = [1,0,0 ; 0,(2/K),0 ; 0,0,1];
g_matrix = 1/(A*B) * [ ... ]; Rho_matrix = [ Rho_C,0,0 ; 0,Rho_W,0 ; 0,0,Rho_F ];
% Berechne MR - Matrix
MR = one * ( C - ( g_matrix * Rho_matrix ) );
% Berechne inverse
TF = MR^-1;

```

Listing 9.11: Pseudocode für die Berechnung der Interreflexionsgrade der CIE 40

### 9.4.4 Berechnung der Hintergrundleuchtdichte nach CIE 190-2010

#### 1. Berechnung des Direkt-Lichtstromanteils der Nutzoberfläche

$$DLF = F4 = FCL_1 \cdot GML_1 + FCL_2 \cdot GML_2 + FCL_3 \cdot GML_3 + FCL_4 \cdot GML_4$$

#### 2. Bestimmung des Lichtstrom-Verteilungs-Faktoren zu den jeweiligen Raumflächen

$$DF_F = \frac{DFL}{1000} \quad DF_W = DLOR - DF_F \quad DF_C = ULOR$$

#### 3. Berechnung des Raumwirkungsgrades der Wände

Mit den Interreflexionswirkungsgraden der LiTG 3.5 die zu den Wänden gerichtet sind

$$UF_W = DF_F \cdot \eta_{23} + DF_W \cdot \eta_{22} + DF_C \cdot \eta_{21}$$

#### 4. Berechnung des Hintergrundbeleuchtungsstärke der Wände und der entsprechenden Hintergrundleuchtstärke

$$E_{Walls} = UF \cdot \frac{1000 \text{ lm} \cdot \text{Anzahl\_Leuchten}}{A_{Walls}}$$

$$L_b \approx \frac{E_{Walls}}{\pi}$$

Parameter	Bez.	Ergebnis	Bez.
- Zonal-Flux Werte	FCL	- Hintergrundleuchtdichte	Lb
- Betriebswirkungsgrade der Leuchte	LOR		
	DLOR, ULOR		
- Interreflexionswirkungsgrade	TF		
- Anzahl der Leuchten	Luminaire.Counter		
- Raumdimension	Room.X/Y		
- Höhe H	H		

```

% Normiere alle Zonal-Flux - Werte auf 1000 lm
FCL = FCL * 1000/LDT.F29;
% Berechne Direkt - Lichtstromanteil zur Nutzoberfläche
DLF = FCL(1) * GML(1,1) + FCL(2) * GML(1,2) + FCL(3) * GML(1,3) + FCL(4) * GML(1,4);
% Berechne die Lichtstrom-Verteilungsfaktoren
DF_F = ( DLF / 1000 );
DF_W = ( DLOR - DF_F );
DF_C = ( ULOR );
% Berechnung der Interreflexionswirkungsgrade
[TF, ~] = calc_transfer_Factors_LiTG_3_5(X, Y, H, Rho_C, Rho_W, Rho_F);
% Berechnung des Raumwirkungsgrades für die Wände
UF = (DF_F * eta(2,3)) + (DF_W * (eta(2,2) - 1)) + (DF_C * eta(2,1));
% Bestimmung der Wandfläche
A_Walls = 2 * (X*H) + 2 * (Y*H);
% Berechnung der Hintergrundbeleuchtungsstärke
E_i = UF1 * (1000 * Luminaire.Counter)/A_Walls;
% Berechnung der Hintergrundleuchtdichte
Lb = E_i / pi

```

Listing 9.12: Pseudocode für die Bestimmung der jeweiligen Lichtstärke-Werte der Leuchten

## 9.4.5 Berechnung der Hintergrundleuchtdichte nach CIE 117-1995 / CIE 52-1982

### 1. Berechnung des Direkt-Lichtstromanteils der Nutzoberfläche

$$DRR = F4 = N_1 \cdot GML_1 + N_2 \cdot GML_2 + N_3 \cdot GML_3 + GML_4$$

$$DR = DRR \cdot CORR$$

$$DR = DRR \quad (\text{mit } CORR = 1)$$

### 2. Berechnung der Raumwirkungsgrade der Wände

Berechnung des tatsächlichen Raumwirkungsgrades  $RU$  mit den Interreflexionsgraden  $TF$  der vorgegebenen Reflexionsgrade der Decke / Wände / Boden und des direkten Raumwirkungsgrades  $RU_d$  mit den Interreflexionsgraden  $TF_d$  der Reflexionsgrade 0 / 0 / 0.

Berechnung der Interreflexionsgrade nach CIE 40:

$$RU = TF_{21} \cdot (1 - N_4) + (TF_{21} + TF_{22} + TF_{23} \cdot DR) \cdot N_4$$

$$RU_d = TF_{d,21} \cdot (1 - N_4) + (TF_{d,21} + TF_{d,22} + TF_{d,23} \cdot DR) \cdot N_4$$

### 3. Bestimmung der Standard-Hintergrundleuchtdichte

$$SHR = 0.25 \rightarrow 4000 \frac{lm}{m^2} \rightarrow L_0 = \frac{4000}{10 \cdot \pi} \approx 127.324 \text{ cd}$$

$$SHR = 1 \rightarrow 250 \frac{lm}{m^2} \rightarrow L_0 = \frac{250}{10 \cdot \pi} \approx 7.9577 \text{ cd}$$

### 4. Berechnung der tatsächlichen Hintergrundleuchtdichte

$$L_r = 6 \cdot RU - 5 \cdot RU_d$$

$$L_d = L_0 + L_r$$

Parameter	Bez.	Ergebnis	Bez.
- Raumdimension	Room.X/Y	- Direct Ratio	DR
- Höhe H	H	- Interreflexionswirkungsgrade	TF
- Reflexionsgrad der Raumflächen	$\rho$	(Transfer Factor)	

```

% Berechne Direkt-Lichtstromanteil der Nutzoberfläche
DR = (N(1) * GML(1,1) + N(2) * GML(1,2) + N(3) * GML(1,3) + GML(1,4) );
% Transfer Faktoren
TF = calc_transfer_CIE_40(X, Y, H, Rho_C, Rho_W, Rho_F);
TFd = calc_transfer_CIE_40(X, Y, H, 0, 0, 0);
% Berechne wirkungsgrad und Lr
RU = TF(2,1) * ( 1 - N(4) ) + (TF(2,1) + TF(2,2) + TF(2,3) * DR ) * N(4);
RU_d = TFd(2,1) * ( 1 - N(4) ) + (TFd(2,1) + TFd(2,2) + TFd(2,3) * DR ) * N(4);
% Berechnung des Korrekturwertes
Lr = 6 * RU - 5 * RU_d;
% Berechnung der tatsächlichen Hintergrundleuchtdichte je nach SHR
if(SHR == 0.25)
    Ld = 400/pi + Lr
end
if(SHR == 1)
    Ld = 25/pi + Lr
end

```

Listing 9.13: Pseudocode für die Bestimmung der jeweiligen Lichtstärke-Werte der Leuchten

## 9.5 Berechnung des UGR Wertes für die UGR - Tabelle

```

% Lese LDT - Datei ein und berechne die spezifischen Werte
[LDT, LOR, DLOR, ULOR, FCL, N] = get_LDT_Data();
% Festlegung von H und SHR
H = 2;          SHR = 0.25;
% Festlegung aller Standardraum - Kombinationen und Reflexionsgrad - Kombinationen
X_Rooms = [2 2 2 2 2 2, 4 4 4 4 4 4, 8 8 8 8, 12 12 12] * H;
Y_Rooms = [2 3 4 6 8 12, 2 3 4 6 8 12, 4 6 8 12, 6 8 12] * H;
Reflexion_values = [0.7,0.5,0.2 ; 0.7,0.3,0.2 ; 0.5,0.5,0.2 ; 0.5,0.3,0.2 ; 0.3,0.3,0.2];
% Berechnung aller Raume
for (i = 1 to 19)
    % Berechne die Leuchtenpositionen
    Luminaire = get_Luminaire_Positions( H, SHR, X_Rooms(i),Y_Rooms(i));
    % Berechne die benötigten
    Luminaire = calc_direkt_values(LDT, Luminaire, X_Rooms(i),Y_Rooms(i));
    % Berechne für alle Reflexionsgrade ...
    for (j = 1 to 5)
        % ... die Hintergrundleuchtdichte
        Lb = calc_indirekt_values( LDT, Luminaire, Reflexion_values(j,1-3) );
        % ... und die UGR - Werte in unkorrigierter und korrigierter Form
        UGR_uncorr(i, [j, j+5]) = [ 8*log10(0.25*sum( Ic^2 / (Ac*r^2*P^2) )) , ...
            8*log10(0.25*sum( Ie^2 / (Ae*r^2*P^2) )) ];
        UGR_corr(i, [j, j+5]) = UGR_uncorr(i, [j, j+5]) + ( LDT.F29 / 1000 );
    end
end

```

Listing 9.14: Pseudocode für die Bestimmung der jeweiligen Lichtstärke-Werte der Leuchten

# Tabellenverzeichnis

2.1	Exponenten für die Berechnung des Blendungsgrads . . . . .	12
3.1	Definition der Blendungsgrade nach Söllner . . . . .	20
3.2	Einteilung der jeweiligen UGR-Grenzwerte zu den Blendungsgraden . . . . .	20
4.1	Beschreibung der Berechnungsabschnitte mit den benötigten Zwischenwerten . . . . .	30
4.2	Aufbau des EULUMDAT - Dateiformates . . . . .	34
4.3	MATLAB - Datentypen in der Struktur <i>LDT</i> . . . . .	37
4.4	Geforderte C-Ebenen von Leuchtensymmetrien nach <i>DIN EN 13032-2</i> . . . . .	38
4.5	Geforderte $\gamma$ -Ebenen von Leuchtentypen nach <i>DIN EN 13032-2</i> . . . . .	38
4.6	Benötigte Raumwinkel - / $\gamma$ -Winkel - Werte für die Zonal-Flux - Werte . . . . .	41
5.1	Berechnungsbeispiel 1 der Indirekt - Beleuchtungsstärken . . . . .	63
5.2	Berechnungsbeispiel 2 der Indirekt - Beleuchtungsstärken . . . . .	63

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Beispielhafte Unterscheidung der Direkt- und Reflexblendung . . . . .	7
2.2	Streuung des einfallenden Lichtes im Auge . . . . .	8
3.1	Beispielbild einer Gebäudesimulation aus DIALux . . . . .	22
3.2	Aufbau einer standardisierten korrigierten UGR - Tabelle . . . . .	23
3.3	Variation der Leuchtenanordnung und Beobachterposition . . . . .	24
3.4	Veränderung des UGR-Wertes bei Variation des Beobachtetes . . . . .	25
3.5	Diagramm II des UGR Grenzkurvenverfahrens . . . . .	26
4.1	Berechnungsabschnitte der UGR-Berechnung . . . . .	30
4.2	Flussdiagramm für die Berechnung der UGR - Tabelle . . . . .	31
4.3	Lichtmessungsaufbau mittels 2-Achsen Goniometer . . . . .	32
4.4	Darstellung einer LVK . . . . .	33
4.5	Verzerrte Licht - Verteilungs - Kurve (modifiziertes Beispiel) <sup>2</sup> . . . . .	39
4.6	Bestimmung des Lichtstromes unter dem Winkel $\gamma_m$ . . . . .	40
4.7	Verlauf des Partiallichtstromes einer Direkt-Indirekt- strahlenden Leuchte . . . . .	41
4.8	Berechnete Lichtverteilungskurve . . . . .	41
4.9	Bestimmung der Leuchtenpositionen im Standardraum . . . . .	43
4.10	Distanz- und Winkel-Berechnung von Leuchte zum Beobachter . . . . .	44
4.11	Sichtbare leuchtende Flächen bei quaderförmigen Leuchten . . . . .	46
4.12	Sichtbare leuchtende Flächen bei zylinderförmigen Leuchten . . . . .	46
4.13	Werteverteilung des Positionsindex im Raum <i>12H/12H</i> . . . . .	48
4.14	Bestimmung der Lichtstärke der k-ten Leuchte . . . . .	49
4.15	Berechnungsverfahren für die Geometric Multiplier . . . . .	51
4.16	Aufteilung der vier Raumflächen . . . . .	53

5.1	Aufbau der Matrix zur Berechnung der Direktblendung (Vollansicht)	56
5.2	Vergrößerte Ansicht (Beispiel für 4H6H)	56
5.3	Vergleichstabelle der Berechnungsprogramme	57
5.4	Vergleich der UGR - Tabelle - "Parabolic" - Leuchte	58
5.5	Vergleich der UGR - Tabelle - "Sphere" - Leuchte	58
5.6	Vergleich der UGR - Tabelle der jeweiligen Implementierungen mit den Ergebnissen und Vergleich aus der CIE 190	59
5.7	Vergleich der UGR - Tabelle der jeweiligen Implementierungen mit der LDT - Datei Nr. 03	60
5.8	Vergleich der UGR - Tabelle der jeweiligen Implementierungen mit der LDT Datei Nr. 11	61
5.9	Ausschnitt aus der Interpolationstabelle Nr.3 für den Korrekturfaktor	63
5.10	Beispielbeleuchte mit kleinen Lichtaustrittsflächen	65
5.11	Übersicht der UGR - Berechnung	66
6.1	LVK - Simulator: Oberfläche der LVK - Erstellung	68
6.2	LVK - Simulator: Beispiel Leuchteninformation	69
9.1	Interpolationstabelle für den Positionsindex	77

## Literaturverzeichnis

- [1] Wikipedia. *Blendung (Überbelichtung)*. 2018. URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Blendung\\_\(%C3%9Cberbelichtung\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Blendung_(%C3%9Cberbelichtung)) (siehe S. 7).
- [2] Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. LiTG. *Das UGR - Verfahren zur Bewertung der Direktblendung der künstlichen Beleuchtung in Innenräumen*. Techreport. LiTG Publikation 20, 2003 (siehe S. 7–9, 11–21, 24, 26–28).
- [3] Institut für Arbeitsschutz der Deutschen gesetzlichen Unfallversicherung IFA. *Blendung - Theoretischer Hintergrund*. 2010. URL: [https://www.dguv.de/medien/ifa/de/fac/strahl/pdf/blendung\\_theorie.pdf](https://www.dguv.de/medien/ifa/de/fac/strahl/pdf/blendung_theorie.pdf) (siehe S. 8–10).
- [4] Carsten Funke - Universitätsverlag Ilmenau, Hrsg. *Blendungsbewertung von LED-Leuchten in Innenräumen* (siehe S. 8, 14).
- [5] [www.licht.de](http://www.licht.de). *Lichtlexikon - UGR*. URL: <https://www.licht.de/de/trends-wissen/wissen-kompakt/lichtlexikon/details-lichtlexikon/ugr/> (siehe S. 16).
- [6] International Commission on Illumination CIE 117-1995. *Discomfort Glare in Interior Lighting*. Technical Report. International Commission on Illumination, 1995 (siehe S. 16, 19, 25–27, 48, 58, 77).
- [7] International Commission on Illumination CIE 190-2010. *Calculation and Presentation of Unified Glare Rating Tables for Indoor Lighting Luminaires*. Technical Report. International Commission on Illumination, 2010 (siehe S. 17, 43, 44, 46).

- [8] licht.de. *Leitfaden zur DIN EN 12464-1*. URL: [https://www.licht.de/fileadmin/Publikationen\\_Downloads/130307\\_Leitfaden\\_DIN\\_2\\_Web.pdf](https://www.licht.de/fileadmin/Publikationen_Downloads/130307_Leitfaden_DIN_2_Web.pdf) (siehe S. 21).
- [9] www.dial.de. *DIALux - Professionelle Lichtplanungssoftware*. URL: <https://www.dial.de/de/dialux-desktop/> (siehe S. 22).
- [10] LDT-Editor. *entnommen aus dem LDT - EDITOR von DIAL* (siehe S. 23, 33, 39).
- [11] Trilux. *Die neue Trilux Beleuchtungspraxis*. URL: <https://www.trilux.com/de/beleuchtungspraxis/innenraumbeleuchtung/guetemerkmale-der-beleuchtung/begrenzung-der-blendung/ugr-tabellenmethode/> (siehe S. 24).
- [12] optronik.de. *Beschreibung der Goniometertypen*. URL: <http://www.optronik.de/produkte/goniophotometer/goniometertypen-abc/> (siehe S. 32).
- [13] DIAL. *Wissensdatenbank DIALux 4*. URL: <http://dialux4.support-de.dial.de/support/> (siehe S. 34).
- [14] DIN EN 13032-2. *Messung und Darstellung photometrischer Daten von Lampen und Leuchten - Teil 2*. Technical Report. EN, 2004 (siehe S. 38).
- [15] Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. LiTG. *Projektierung von Beleuchtungsanlagen nach dem Wirkungsgradverfahren*. Techreport. LiTG Publikation 3.5, 1988 (siehe S. 40).
- [16] International Commission on Illumination CIE 52-1982. *Calculation for Interior Lighting, Applied Method*. Technical Report. International Commission on Illumination, 1982 (siehe S. 42, 51, 63).
- [17] DIAL GmbH - E-Mail von Friedrich Wilhelm Bremecker - Business Unit Director, Sales (siehe S. 47, 56, 63).
- [18] International Commission on Illumination CIE 40-1978. *Calculation for Interior Lighting, Basic Method*. Technical Report. International Commission on Illumination, 1978 (siehe S. 52).
- [19] Zumtobel. *Leuchte MIREL EVOLUTION*. URL: <https://www.zumtobel.com> (siehe S. 65).

# Versicherung über die Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §16(5) APSO-TI-BM ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, 15. Oktober 2018

Ort, Datum

Unterschrift