

# **Empfängerbezogene Konzepte zur Beschreibung der Lichtrichtung in Innenräumen**

*Carolin Liedtke, Inga Rothert, (D)  
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik,  
Einsteinufer 19, D-10587 Berlin; carolin.liedtke@tu-berlin.de*

## **Kurzfassung**

Die Lichtrichtung beeinflusst maßgeblich die räumliche Lichtverteilung. Bis heute fehlen jedoch Erkenntnisse, wie Lichtverhältnisse im Raum hinsichtlich der Lichteinfallsrichtung und des Verhältnisses von gerichtetem und diffusem Licht zu quantifizieren sind. Der Artikel zeigt die Grundidee eines empfängerbezogenen Modells zur Charakterisierung der räumlichen Lichtverteilung auf. Es werden zwei Ansätze vorgestellt und ihre Eignung für die Aussage über die Lichteinfallsrichtung und das Verhältnis von diffusem und gerichtetem Licht an einem Raumpunkt gegenübergestellt.

## **1. Einleitung**

Mit dem Wechsel von konventionellen Lampen zu LED und OLED in der Innenbeleuchtung müssen bestehende Beleuchtungskonzepte überarbeitet und so angepasst werden, dass sie das neue Potential dieser Lichtquellen optimal nutzen. Etablierte Gütekriterien müssen dafür sorgfältig auf ihre Anwendbarkeit geprüft und gegebenenfalls neu auf die Beleuchtung mit LED und OLED angepasst werden.

Die Lichtrichtung beinhaltet die Beschreibung der Richtung des Lichteinfalls und der Balance von gerichtetem und diffusem Licht. Als eines der Güte Merkmale der Innenbeleuchtung ist sie in Hinblick auf die neuen Lichtquellen von besonderer Bedeutung. Mit der LED setzt man eine punktförmige Lichtquelle ein, die stark gerichtetes Licht abstrahlt, während die OLED eine völlig diffuse Beleuchtung erzeugt.

Dem überwiegenden Teil der Güte Merkmale wie zum Beispiel dem Beleuchtungsniveau oder der Blendungsbegrenzung liegen quantifizierbare Maßzahlen zu Grunde, anhand derer der Einfluss auf die Beleuchtung berechnet, gemessen und beurteilt werden kann. Im Gegensatz dazu geht die Charakterisierung der Lichtrichtung bis heute nicht über eine qualitative Beschreibung hinaus.

Es muss daher ein neuer Ansatz entwickelt werden, der Parameter enthält, die den Einfluss der Lichteinfalls und des Verhältnisse von gerichtetem und diffusem Licht auf die räumliche Beleuchtung beschreiben.

Der vorliegende Artikel zieht den Vergleich zwischen zwei empfängerbezogenen Modellen, die für die Analyse und Charakterisierung der räumlichen Beleuchtung vorgeschlagen werden.

## **2. Empfängerbezogene Modelle**

Die Bewertung der Beleuchtung im Raum geschieht nach derzeitigem Wissenstand anhand des Helligkeitseindrucks und somit der Leuchtdichteverteilung auf Raumbegrenzungsflächen und Objekten, die in dem Raum vorhanden sind. Die Leuchtdichte enthält die für den Helligkeitseindruck maßgebliche Information über die Menge des an einem Material reflektierten Lichts in Richtung des Beobachters und ihre Verteilung gibt Aufschluss über die komplexe Helligkeitssituation in seinem Gesichtsfeld.

Für die Planung einer Beleuchtungssituation wird außerdem die Beleuchtungsstärke auf Flächen der Sehaufgabe hinzugezogen. Sie gibt den Anteil des Lichtstroms, der auf diese Flächen fällt, wieder. Die Beleuchtungsstärke ist dadurch unabhängig von der Beobachterposition und den Reflexionsgraden der Oberflächen.

Beide Größen beschreiben das Licht in seiner Wirkung anhand einer Oberfläche, die aus einem bestimmten Material besteht. Sie kennzeichnen das ankommende beziehungsweise das reflektierte Licht an der Stelle der Material- und Raumgrenzen. Unberücksichtigt dagegen bleibt der Weg des Lichts von der Lichtquelle durch den Raum bis hin zu denjenigen Flächen, auf denen es mit bisherigen Methoden beschrieben wird. Die Kenntnis der Lichtstärkeverteilung der Lichtquelle einerseits und die Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte auf den Zielflächen andererseits charakterisieren nur punktuell das ausgestrahlte und auftreffende Licht. Dadurch fehlt die Beschreibung des Lichts und seiner Verteilung an allen übrigen Stellen im Raum zwischen Quelle und Fläche(n).

Eine Quantifizierung des Lichts an einem Empfänger an Punkten eines räumlichen Gitters würde die Wissenslücke schließen und das Licht am Auge des Beobachters an allen relevanten Positionen beschreiben. Zudem würden sich Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte(-verteilung) aus der räumlichen Lichtverteilung berechnen lassen. Sie ist somit eine vollständigere und absolute Beschreibung des Lichts im Raum und charakterisiert dadurch die Ursache für die Lichtwirkung auf Oberflächen und Materialien. Die Beschreibung der Verteilung des Lichts im Raum kann demnach nicht nur Grundlage für die Helligkeitsverteilung sein, sondern auch die Lichtrichtung kennzeichnen. Sie enthält die Information, wie und an welchen Stellen das Licht in den Raum einfällt und ebenso das Verhältnis von gerichtetem und diffusem Licht an jeder beliebigen Stelle des Raums.

Die Idee einer empfängerbezogenen Bewertung der Beleuchtung ist bereits früh in der Lichtforschung in mehreren Ansätzen beschrieben worden. Arndt (Arndt, 1928) definierte die Menge des auf einen Messpunkt auftreffenden Lichtstroms als *Raumhelligkeit* und schlug erstmals die Bewertung in einem räumlichen Gitter vor.

Zeitgleich entwickelte Lingenfelder (Lingenfelder, 1928) den Beleuchtungsstärkeverteilungskörper, mit dem der eintreffende Lichtstrom auf einen Messpunkt winkelaufgelöst mit Hilfe eines in alle Richtungen geneigten Beleuchtungsstärkeempfängers beschrieben wird.

Cuttle verglich in (Cuttle, 1971) einen Beleuchtungsstärkekörper (*illumination solid*) mit einem Leuchtdichtekörper (*luminance solid*) auf Eignung zur Darstellung der Lichtverhältnisse an einem Punkt. Letzterer wurde erstmalig von Geršun in (Geršun, 1936) vorgeschlagen, um winkelaufgelöst die Leuchtdichte, die von einem Beobachter in alle Richtungen „gesehen“ werden kann, zu beschreiben. Cuttle entschied sich jedoch, den Beleuchtungsstärkeansatz für die Beschreibung von Modelling an Objekten weiter auszuarbeiten (Cuttle, 1997). Für die Charakterisierung der räumlichen Lichtverteilung haben alle genannten Ansätze jedoch bisher keine Verbreitung gefunden.

Zwei Modelle, der Beleuchtungsstärkeverteilungskörper nach Lingenfelder und ein neu entwickelter Ansatz auf Basis der Lichteinfallsstärke, sollen zur Beschreibung der räumlichen Lichtverteilung gegenübergestellt und ihre Anwendung diskutiert werden.

## 2.1. Beleuchtungsstärkeverteilungskörper

Der Beleuchtungsstärkeverteilungskörper (kurz: BVK) wurde erstmals 1928 durch Lingenfelder beschrieben (Lingenfelder, 1928), um die Beleuchtungsverhältnisse an einem Raumpunkt detailliert betrachten zu können. Dabei werden Beleuchtungsstärken von einem Flächenelement, welches in verschiedenen Winkeln geneigt wird, aufgenommen und der Betrag in räumlichen Bezug zum Punkt aufgetragen. Das Ergebnis ist ein dreidimensionaler Körper aus Beleuchtungsstärkewerten, ähnlich einem Lichtstärkeverteilungskörper, nur dass der BVK nicht quellen- sondern empfängerbezogen ist. Der BVK soll somit Aufschluss über die Art und Beschaffenheit der Beleuchtung in einem betrachteten Raumpunkt geben.

Der BVK in einem Raumpunkt P ist folgendermaßen definiert: Ein Flächenelement in diesem Raumpunkt P werde so gedreht, dass seine Flächennormale in alle möglichen Richtungen im Raum zeigt. Der jeweils auftreffende Lichtstrom wird als Lichtstrom pro Flächeneinheit radial in Richtung der Flächennormalen aufgetragen. Die Endpunkte dieser Beleuchtungsstärkewerte werden durch eine Fläche verbunden, welche den entstandenen Beleuchtungsstärkeverteilungskörper umhüllt (Lingenfelder, 1928).

Die einfachste Form des BVK ergibt sich, wenn er durch eine punktförmige Lichtquelle hervorgerufen wird. Die horizontale Beleuchtungsstärke  $E_N$  auf einem Flächenelement im Punkt P beträgt dann nach dem quadratischen Entfernungsgesetz:  $E_N = \frac{I}{r^2}$ . Wird dieses Flächenelement um den Winkel  $\varepsilon$  geneigt, so nimmt die Beleuchtungsstärke nach  $E(\varepsilon) = E_N \cdot \cos(\varepsilon)$  ab. Die Beleuchtungsstärken der in beliebige Richtungen gedrehten Flächenelemente werden nun entlang der Winkel aufgetragen. Daher ergibt sich der BVK zu einer Kugel mit Durchmesser  $E_N$ , die die Ebene durch den Punkt P tangiert, welche senkrecht zum Lichteinfall liegt, siehe Abbildung 1 (links und Mitte).

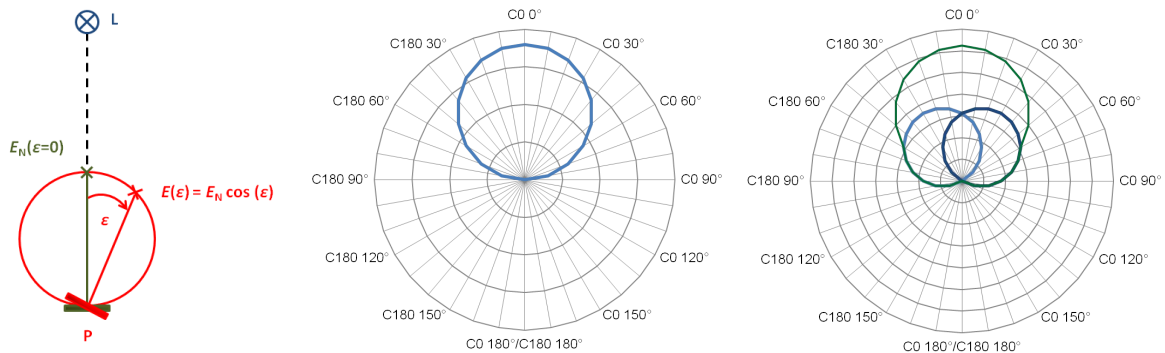


Abbildung 1: (links) Bilden eines von einer Punktlichtquelle L im Raumpunkt P hervorgerufenen Beleuchtungsstärkeverteilungskörpers, (Mitte) Schnittebene durch den entstehenden Beleuchtungsstärkeverteilungskörper, (rechts) Superposition zweier BVK, die durch zwei jeweils um 30° versetzte Lichtquellen hervorgerufen wurden

Befinden sich mehrere Lichtquellen im Einzugsbereich des BVKs, so gilt das Superpositionsprinzip – die jeweils durch eine Lichtquelle hervorgerufenen BVKs addieren sich zu einem Gesamt-BVK (Lingenfelder, 1928), wie in Abbildung 1 (rechts) dargestellt.

## 2.2. Lichteinfallsstärke und ihre Verteilung im Raumpunkt

Die Lichteinfallsstärke  $J$  ist definiert als der Anteil des Lichtstroms  $d\Phi$ , der in einem begrenzten Raumwinkel  $d\Omega_2$  auf den Raumpunkt einfällt. Die Lichteinfallsstärke  $J$  ist damit konträr zur Lichtstärke  $I$ , wie Abbildung 2 verdeutlicht.

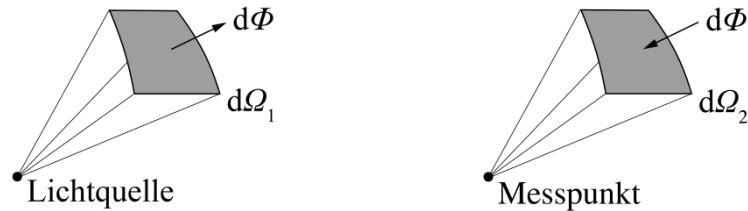


Abbildung 2: (links) graphische Definition der Lichtstärke  $I$ , (rechts) graphische Definition der Lichteinfallsstärke  $J$

Die Lichteinfallsstärke gibt den von jeder Raumrichtung einfallenden Lichtstrom an und kann dadurch Aufschluss über die Beleuchtungsverteilung an einem Raumpunkt geben.

Die Verteilung der Lichteinfallsstärke in einem Raumpunkt kann, ähnlich der Beleuchtungsstärkeverteilung in 2.1, durch Drehen des raumwinkelbegrenzten Messelements um den Raumpunkt gebildet werden, siehe Abbildung 3 (links).

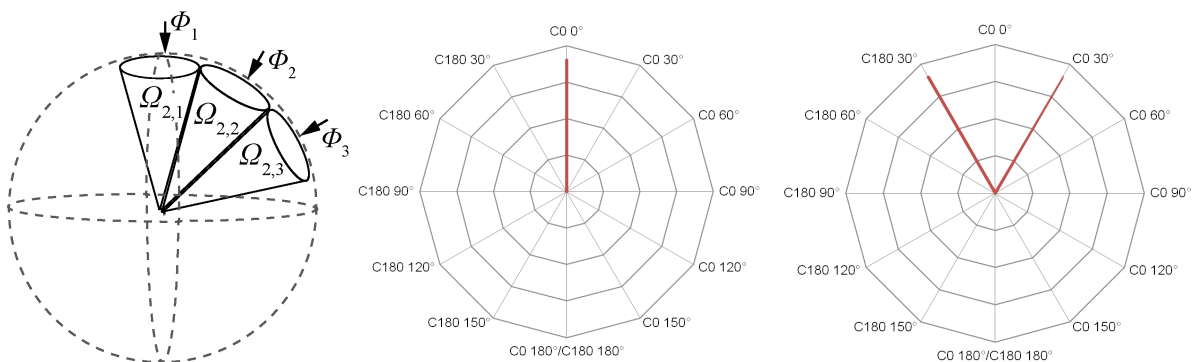


Abbildung 3: Bilden des Verteilungskörpers der Lichteinfallsstärke in einem Raumpunkt, (Mitte) Schnittebene durch den Verteilungskörper, der durch eine Punktlichtquelle hervorgerufen wird, (rechts) Superposition zweier Verteilungskörper, die durch zwei jeweils um  $30^\circ$  versetzte Lichtquellen hervorgerufen werden

Die entstehende Werteschar der Lichteinfallsstärken in verschiedenen Richtungen kann dann wie bei der Lichtstärkeverteilung in einem Polarkoordinatendiagramm dargestellt werden. Daraus kann direkt die Verteilung der Beleuchtungsverhältnisse an dem entsprechendem Raumpunkt abgelesen werden. Der Verteilungskörper, der durch eine Punktlichtquelle am Raumpunkt entsteht, besteht aus einem Peak in Richtung der Lichtquelle, wie in Abbildung 3 (Mitte) dargestellt. Diese scharfkantige Ausprägung ist Folge des durch den Raumwinkel begrenzten Lichteinfalls, so dass eine Punktlichtquelle unabhängig von der Form ihrer Lichtstärkeverteilung nur einen Lichteinfallsstärkewert in die Richtung hervorruft, die zur Lichtquelle zeigt. Die Superposition der Verteilungskörper ist definiert auf der Grundlage der Superposition einzelner Lichtströme. Der resultierende Verteilungskörper der Lichteinfallsstärke, der durch zwei jeweils um  $30^\circ$  versetzte Lichtquellen hervorgerufen wird, ist in Abbildung 3 (rechts) dargestellt.

### 3. Anwendung zur Charakterisierung der räumlichen Lichtverteilung

Die beiden vorgestellten Modelle des Beleuchtungsstärkeverteilungskörpers (2.1) und der Verteilung der Lichteinfallsstärke (2.2) sollen die Beleuchtungsverhältnisse hinsichtlich der Lichteinfallrichtung und des Verhältnisses von gerichtetem und diffusem Licht wiedergeben.

In den folgenden Ausführungen werden die Ausprägungen beider Modelle anhand von ausgewählten Beleuchtungssituationen hinsichtlich der für die räumliche Beleuchtungsverteilung relevanten Parameter gegenübergestellt.

#### 3.1. Richtung des Lichteinfalls

Für die Charakterisierung der räumlichen Beleuchtung soll die Information über die Richtung des Lichteinfalls an einem empfängerbezogenen Modell ablesbar sein.

Die Ausprägung beider Modelle in einer theoretischen Beleuchtungssituation mit einer oder zwei Punktlichtquellen ohne zusätzliche Raumreflexion sind in Abbildung 1 (Mitte und rechts) für den Beleuchtungsstärkeverteilungskörper und in Abbildung 3 (Mitte und rechts) für die Verteilung der Lichteinfallsstärke bereits dargestellt. Die Beleuchtungsstärkeverteilungskörper zeigen einzeln durch die Ausrichtung der Kugelform anhand der Normalen des Flächenelements in Richtung der Lichtquelle(n). Die Verteilungskörper der Lichteinfallsstärke sind im Gegensatz dazu nicht räumlich ausgedehnt, sondern zeigen jeweils mit einem einzigen Wert exakt die Richtung der Lichtquelle(n) an.

Dieses Merkmal der unterschiedlichen Ausprägung wird deutlicher, wenn zusätzlich Raumreflexionen in die Betrachtung einbezogen werden, wie die Situation in Abbildung 4 (Mitte) zeigt. Es wurde ein weißer Raum in Kugelform ausgewählt, damit reflektierende Raumflächen in konstantem Abstand zum zentralen Messpunkt liegen. Die Situation ruft einen nahezu kugelförmigen BVK am Raumpunkt hervor, der eine leichte Orientierung in Richtung des halben Winkels zwischen beiden Lichtquellen besitzt. Er zeigt, ebenso wie in Abbildung 1 (rechts), nicht die Richtung der beiden einzelnen Lichtquellen, sondern die einer einzelnen, virtuellen an. Der BVK, der durch mehr als eine Lichtquelle hervorgerufen wird, ist nicht eindeutig, da er in dieser Form auch von einer einzelnen Lichtquelle bei einer Position von 45° zum Raumpunkt stammen kann.

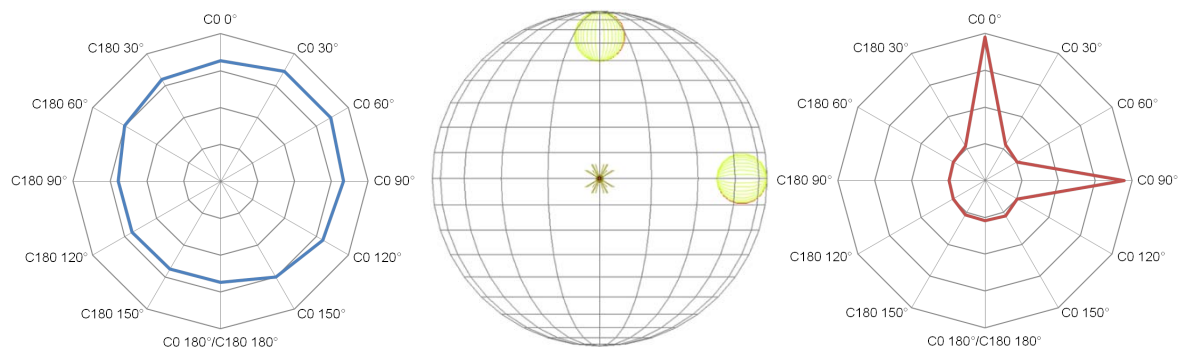


Abbildung 4: Verteilung der Beleuchtungsstärke (links) und der Lichteinfallsstärke (rechts) an einem zentralen Raumpunkt als Ergebnis einer Beleuchtung durch zwei Punktlichtquellen mit Lambertcharakteristik in einem weißen Kugelraum (Mitte)

Im Gegensatz dazu zeigt die Verteilung der Lichteinfallsstärke in Abbildung 4 (rechts) die Positionen der Lichtquellen an. Auch der in der Situation von Abbildung 3 (rechts) fehlende Anteil durch Raumreflexionen, wird in diesem Diagramm über den aus allen

Richtungen gleich großen reflektierten Lichtstromanteil aufgezeigt. Die Verteilung der Lichteinfallstärke ist eineindeutig zu der Beleuchtungssituation, die sie hervorruft. Eine weitere Anordnung soll den ungünstigsten Fall für die Information der Lichteinfallrichtung durch mehrere Lichtquellen aufzeigen. Die Abbildung 5 (Mitte) zeigt die Beleuchtungssituation im gleichen Kugelraum mit sechs Lichtquellen und den resultierenden BVK (Abbildung 5 links) und die Verteilung der Lichteinfallstärke (Abbildung 5 rechts). Im Gegensatz zu letzterem Modell zeigt der BVK eine nahezu gleichförmige Verteilung, die die Positionen der Lichtquellen nicht erkennen lässt.

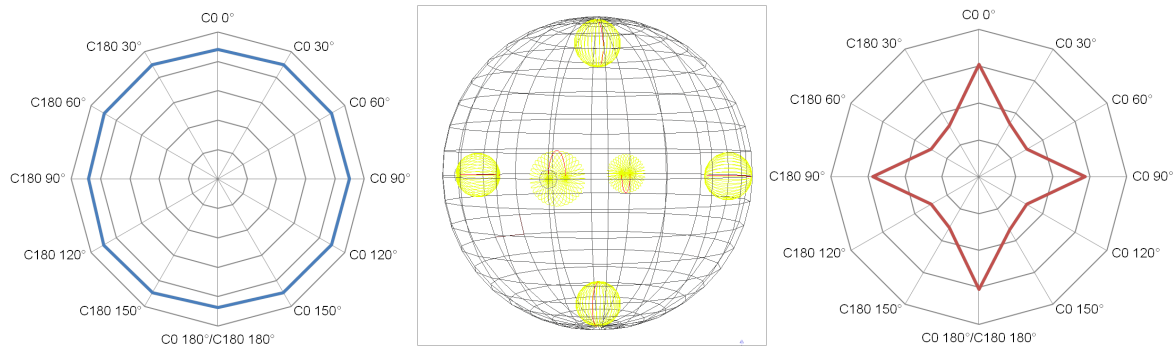


Abbildung 5: Verteilung der Beleuchtungsstärke (links) und der Lichteinfallstärke (rechts) an einem zentralen Raumpunkt als Ergebnis einer Beleuchtung durch sechs Punktlichtquellen mit Lambertcharakteristik in einem weißen Kugelraum (Mitte)

Die vorangegangenen Beispiele zeigen, dass beide Modelle für die Information über die Richtung des Lichteinfalls unterschiedlich gut geeignet sind. Während das Ablesen der Einfallrichtung bei nur einer Lichtquelle in beiden Ansätzen noch möglich ist, ist der BVK im Gegensatz zur Verteilung der Lichteinfallstärke bei praxisrelevanteren Anordnungen mit mehreren Lichtquellen nicht mehr für das Ablesen des Lichteinfalls geeignet.

### 3.2. Verhältnis von gerichtetem und diffusem Licht

Für die Charakterisierung der räumlichen Beleuchtung soll ein empfängerbezogenes Modell Aussagen über den Anteil von gerichtetem und diffusem Licht an einem Raumpunkt ermöglichen.

Lingenfelser schlägt dazu für das Modell des Beleuchtungsstärkeverteilungskörpers das qualitative Zerlegen in drei verschiedene Anteile vor: einen punktförmigen, einen vollkommen diffusen und einen großflächigen Anteil (siehe Abbildung 6).

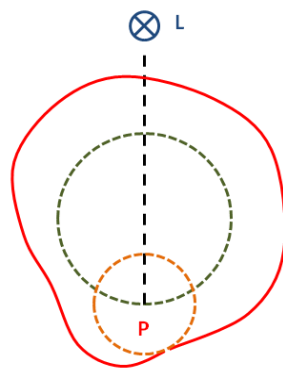


Abbildung 6: Der BVK im Punkt P lässt sich in drei Anteile zerlegen: den punktförmigen Anteil (grün) durch die Punktlichtquelle L, den vollkommen diffusen Anteil (orange) und den großflächigen Anteil, der sich aus dem Rest ergibt. Reproduziert nach Abb. 2 in (Lingenfelser, 1928), S. 314

Ein punktförmiger BVK-Anteil ist eine Kugel, die den Messpunkt P berührt und in Richtung der Lichtquelle ausgerichtet ist. Der vollkommen diffuse Anteil ergibt sich durch Subtrahieren aller punktförmigen Anteile vom BVK. Der kleinste Radius  $E_d$  des verbleibenden BVKs definiert somit den vollkommen diffusen Anteil. Denn dieser Beleuchtungsstärkewert ist in jeder Stellung des Flächenelements im Mindesten vorhanden und demzufolge nicht richtungsabhängig. Es ergibt sich eine Kugel um den Messpunkt mit Radius der diffusen Beleuchtungsstärke  $E_d$ . Der restliche Anteil des BVKs ist der großflächige Anteil. Er besitzt teilweise Richtungscharakter und entsteht vor allem durch Reflexionen an Flächen im Raum.

Der vollkommen diffuse Anteil  $\Phi_d$  des Lichtstroms in Prozent bestimmt sich nach (Lingenfeller, 1928) wie folgt:

$$\Phi_d \text{ in \%} = \frac{\Phi_d}{\Phi_{\text{ges}}} \cdot 100 = \frac{n \cdot E_d}{(E_1 + E_2 + \dots + E_n)} \cdot 100 \quad (1)$$

Die diffuse Beleuchtungsstärke  $E_d$  ist das Minimum aller Beleuchtungsstärken im Raumpunkt. Sie ist in allen Richtungen vorhanden und wird daher mit der Anzahl der Messwerte  $n$  multipliziert. Der gesamte Lichtstrom, der auf den Messpunkt einfällt, wird repräsentiert durch die Summe aller Einzelbeleuchtungsstärken.

Für den Vergleich zur Aussagekraft der Verteilung der Lichteinfallsstärke über den diffusen Lichtanteil, wird die Berechnungsvorschrift analog auf diese angewandt.

Damit ergibt sich der prozentuale vollkommen diffuse Anteil  $\Phi_{d,J}$  zu:

$$\Phi_{d,J} \text{ in \%} = \frac{\Phi_d}{\Phi_{\text{ges}}} \cdot 100 = \frac{n \cdot J_d}{(J_1 + J_2 + \dots + J_n)} \cdot 100 \quad (2)$$

Analog beschreibt  $J_d$  den geringsten Betrag aller an einem Raumpunkt gemessenen Lichteinfallsstärken und wird mit der Anzahl  $n$  an Messpunkten multipliziert. Die Summe aller Lichteinfallsstärken ergibt den Gesamtlichtstrom im Nenner des Bruchs. Der größte Anteil an diffusem Lichtstrom in Bezug zum gesamten einfallenden Lichtstrom des Raums beträgt 100 % und wird in beiden Modellen erreicht, wenn aus allen Richtungen der gleiche Betrag an Lichtstrom einfällt und sich jeweils die Verteilung der Größen  $E$  und  $J$  in Diagrammen in einer Kugelform ausprägt, deren Mittelpunkt der Messpunkt ist.

Den geringsten Anteil an diffusem Licht ergibt sich mit 0 % in beiden Modellen, wenn in einer oder mehreren Richtungen der Wert von  $E$  bzw.  $J$  Null beträgt. Dies ist immer dann der Fall, wenn wie in den Beispielen aus Abbildung 1 und Abbildung 3 Raumreflexionen fehlen, unabhängig von der Anzahl und Lichtstärkeverteilung der Lichtquellen.

Die Ergebnisse der Berechnung eines diffusen Lichtstromanteils größer als Null unterscheiden sich jedoch in beiden Modellen stark voneinander. Für das Beispiel in Abbildung 4 ergibt sich für den Beleuchtungsstärkeverteilungskörper ein Anteil  $\Phi_d$  von 74 %, während dieser Anteil auf Basis der Lichteinfallsstärke  $\Phi_{d,J} = 65$  % beträgt.



Bei der Beleuchtungssituation, die in Abbildung 5 dargestellt ist, beträgt der diffuse Anteil für das Modell des Beleuchtungsstärkeverteilungskörpers  $\Phi_d = 92 \%$  gegenüber  $\Phi_{d,J} = 72 \%$  für die Verteilung der Lichteinfallsstärke. Die folgende Abbildung 7 zeigt für diese Situation für beide Verteilungskörper die Zerlegung in die von Lingenfelder vorgeschlagenen Anteile. Der Beleuchtungsstärkeverteilungskörper (Abbildung 7 links, rot) beinhaltet deutlich die Information des hohen diffusen Lichtstromanteils (orange) und den dazu im Vergleich geringen punktförmigen Anteil (grün), der wiederum aus der Superposition der einzelnen Anteile durch die Lichtquellen zusammengesetzt ist.

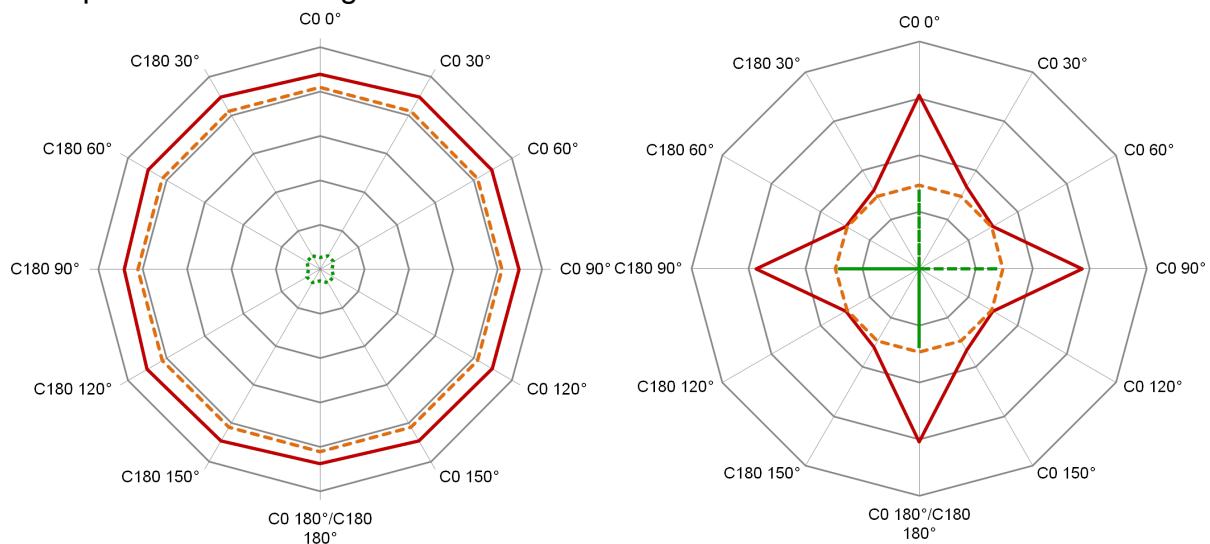


Abbildung 7: Zerlegung des Beleuchtungsstärkeverteilungskörpers (links) und des Verteilungskörpers der Lichteinfallsstärke (rechts) in die einzelnen Anteile nach Lingenfelder; Rot: Resultierende Verteilung der Situation (s. Abbildung 5 Mitte) bei maximaler Raumreflexion, Orange: Diffuser Lichtstromanteil, Grün: punktförmiger Anteil durch die Lichtquellen ohne Raumreflexion

Die Abbildung 7 (rechts) zeigt durch die Zerlegung der Verteilung der Lichteinfallsstärke erkennbar die Trennung zwischen dem direkten Lichteinfall durch die Lichtquellen (grün) und dem diffusen Anteil durch die Raumreflexionen (orange). Auffällig dabei ist, dass der diffuse Anteil die Gesamtverteilung (rot) tangiert. Dies lässt im vorliegenden Beispiel sofort intuitiv die Verteilung der Lichteinfallsstärke in den Anteil des diffusen Lichtstroms und einen reflektierten Anteil ohne Berechnung zerlegen, was mit dem Beleuchtungsstärkeverteilungskörper nicht möglich ist.

Dieser Unterschied zwischen beiden Modellen ist begründet im Aufbau des Beleuchtungsstärkeverteilungskörpers. Beim Drehen des Flächenelements in kleinen Schrittwinkeln, kommt es zu einer Mehrfachbewertung von Lichtstromanteilen, die mit dem Kosinus gewichtet auf dem nächsten Beleuchtungsstärkewert mit eingehen. Dies ist der Grund, warum sich einerseits die Richtung der Lichtquellen nicht scharf in der Form des BVKs abbilden und sich andererseits durch die höhere Gleichmäßigkeit ein höherer diffuser Lichtstromanteil ergibt.

Die Verteilung der Lichteinfallsstärke hat demgegenüber den Vorteil, als dass sie weder seitliche Lichtstromanteile aufnimmt, noch dass sich die Winkelbereiche des Lichteinfalls überlappen. Dadurch kommt es zu einer einfach winkelaufgelösten Erfassung des einfallenden Lichts.

Für beide Modelle wurde die Berechnung des diffusen Anteils dargestellt und diskutiert. Für den Verteilungskörper der Lichteinfallsstärke an einem Raumpunkt wurde die Berechnung an diejenige von Lingenfelder für den BVK angelehnt. In theoretischen Beleuchtungssituationen ohne Raumreflexionen ergeben die



Berechnungen von  $\Phi_d$  bzw.  $\Phi_{d,j}$  für beide Modelle einen Wert von Null, während sie sich für Situationen mit Raumreflexionen deutlich voneinander unterscheiden. Durch die Mehrfachbewertung von Lichtstromanteilen bei der Bildung des BVK, ist der berechnete diffuse Lichtstromanteil zu hoch und die Eignung für die Aussage des Verhältnisses von gerichtetem und diffusem Licht im Gegensatz zur Verteilung der Lichteinfallstärke fraglich.

#### 4. Fazit und Ausblick

Die Quantifizierung des Lichts allein anhand von Oberflächen ist eine unvollständige Charakterisierung der Lichtverhältnisse im Raum. Deshalb muss die Beschreibung der räumlichen Lichtverteilung, auf die die Lichtrichtung maßgeblichen Einfluss hat, anhand eines empfängerbezogenen Modells, das in einem räumlichen Gitter angewandt wird, erfolgen.

Zwei empfängerbezogene Modelle wurden vorgestellt und hinsichtlich ihrer Aussagen über die Richtung des Lichteinfalls und das Verhältnis von gerichtetem und diffusem Licht an einem Raumpunkt gegenübergestellt.

Der Beleuchtungsstärkeverteilungskörper nach Lingenfelser zeigt nur die Richtung des Lichteinfalls an, wenn das Licht vorzugsweise aus einer Richtung durch eine oder mehrere Lichtquellen auf den Messpunkt einstrahlt und zusätzlich dazu der Einfluss von Raumreflexionen gering bleibt. Sind diese Voraussetzungen z.B. bei mehreren von einander stark abweichenden Lichtrichtungen nicht gegeben, zeigt der BVK eine durch Superposition resultierende virtuelle Richtung der Lichtquelle oder – wie im Beispiel von Abbildung 5 mit hohem Raumreflexionsanteil – gar keine Information darüber an. Dies wirkt sich auch auf die zweite, für den Vergleich herangezogene Größe – die Aussagefähigkeit über das Verhältnis von gerichtetem und diffusem Licht – aus. Durch die Mehrfachbewertung von Lichtstromanteilen aufgrund der Beleuchtungsstärke werden direkter Lichtstrom von Lichtquellen und reflektierter Lichtstrom von Raumoberflächen zu hoch bewertet. Dadurch wird das Verhältnis von gerichtetem und diffusem Licht nicht richtig über den nach Lingenfelser zu berechnenden diffusen Lichtstromanteil wiedergegeben.

Das zweite Modell auf Basis der neu definierten Größe der Lichteinfallstärke kann die Richtung des Lichteinfalls besser aufzeigen. Sowohl in Situationen ohne, als auch mit Raumreflexionen, zeigt die Form der Verteilung der Lichteinfallstärke die Richtung(en) des Hauptlichteinfalls an. Bei Anwendung der Berechnungsvorschrift für den diffusen Lichtstromanteil nach Lingenfelser auf die Lichteinfallstärke ( $\Phi_{d,j}$ ) werden durch die raumwinkelbegrenzte, einfache Lichtstrombewertung nur die reflektierten Anteile für die Diffusität wiedergegeben.

Dennoch wird bei Berechnung des diffusen Lichtstromanteils in beiden Modellen nicht der gerichtete Anteil der Beleuchtung an einem Raumpunkt ermittelt. Wie in der Zerlegung des Beleuchtungsstärkeverteilungskörpers in Abbildung 6 gezeigt, ergeben sich neben dem direkten, punktförmigen Anteil und dem vollkommen diffusen Anteil auch ein dritter, großflächiger Anteil. Dieser ist in seiner Ausprägung keinem der beiden anderen Anteile zuzuordnen. Daher ist allein die Berechnung des vollkommen diffusen Lichtanteils  $\Phi_d$  bzw.  $\Phi_{d,j}$  in realen Situationen nicht vollständig für die Quantifizierung des Verhältnisses von gerichtetem und diffusem Licht.

Desweiteren wurden für den Vergleich beider empfängerbezogener Modelle jeweils ihre Ausprägung an nur einem Raumpunkt betrachtet und bewertet. Die Erweiterung auf mehrere Punkte in einem räumlichen Gitter und das Ableiten von Aussagen über die Beschaffenheit und Verteilung der räumlichen Beleuchtung bilden die nächsten Arbeitsschritte dieser Untersuchung.

## Literatur

ARNDT, W. Beleuchtungsstärke oder Raumhelligkeit? *Licht und Lampe* 17 (1928), 23, 833-836

CUTTLE, C. Lighting patterns and the flow of light. *Lighting Research and Technology* 3 (1971), 171–189

CUTTLE, C. Cubic illumination. *Lighting Research and Technology* 29 (1997), 1, 1–14

GERŠUN, A. A. 1936. *The Light Field*. Svetoe Pole. Moscow. English translation by Moon, P. and Timoshenko, G. *Journal of Mathematics and Physics* XVIII, MIT, 1936, 51-151

LINGENFELSER, H. Ueber den diffusen Anteil der Beleuchtung und ihre Schattigkeit. *Licht und Lampe* 17 (1928), 9, 313-318