

Gütekriterien zur Bewertung der Lichtqualität in Innenräumen

*Dipl.-Ing. Carolin Liedtke, TU Berlin, Fachgebiet Lichttechnik,
Einsteinufer 19, D-10587 Berlin; carolin.liedtke@tu-berlin.de (D)*

KURZFASSUNG

Die Umsetzung von Lichtqualität bei der Beleuchtung von Innenräumen ist nur möglich, wenn Gütemerkmale der Beleuchtung ganzheitlich für den spezifischen Beleuchtungszweck beachtet werden. Die Berücksichtigung der Empfehlungen zu den Kennzahlen, die die quantifizierbaren Kriterien, wie z.B. Beleuchtungsniveau und Blendungsbegrenzung, abbilden, suggeriert jedoch die Sicherheit, Lichtqualität berechnen bzw. messen zu können. Nicht quantifizierbare Merkmale, wie die Lichtrichtung, sind jedoch deutlich schwieriger einzuschätzen, da Kennzahlen dazu bisher noch fehlen oder eine Abbildung des Kriteriums in Kennzahlen nicht zweckmäßig ist. Auf Basis dieser Überlegungen entsteht die Anforderung an den Grundlagen der Kennzahlen für die eindeutige Beschreibung weiter zu forschen, um Lichtqualität gezielter bewerten und erreichen zu können.

ZIEL DES FORSCHUNGSVORHABENS

Ziel des Forschungsvorhabens im Bereich der Lichtqualität am Fachgebiet Lichttechnik in Berlin ist es, eine Beschreibung und Bewertung für das Gütemerkmal Lichtrichtung bezogen auf die den Lichteinfall und die Balance zwischen gerichteter und diffuser Beleuchtung im Raum zu erarbeiten. Dazu werden bisher bekannte Ansätze zur vektoriellen Beschreibung der Lichtrichtung aufgenommen und im aktuellen Kontext im Hinblick auf die räumliche Lichtverteilung neu evaluiert. Die Ergebnisse werden anschließend durch die Implementierung in eine Simulationssoftware für die Anwendung in der Lichtplanung zugänglich.

FORSCHUNGSHYPOTHESEN

Die folgenden Hypothesen wurden auf Grundlage theoretischer Ansätze zur skalaren und vektoriellen Beschreibung des Lichts von Anfang bis Mitte des 20. Jahrhunderts, Ergebnissen von Untersuchungen zu den Themen Lichtrichtung, Schattigkeit und Modelling in den 1970er Jahren und der Kenntnis der aktuellen Diskussion zur Beschreibung von Lichtqualität erarbeitet. Sie bilden damit den Rahmen für die Untersuchungen zur Lichtrichtung im Kontext der Lichtqualität in Innenräumen.

1. *Das Gütemerkmal Lichtrichtung ist ein Kriterium, dass nicht flächenbezogen, sondern richtungsbezogen die Lichtverteilung im Raum beschreibt. Es charakterisiert somit wesentliche Eigenschaften der Beleuchtung, ohne deren Kenntnis sich der Raumeindruck nur unvollständig beschreiben lässt.*
2. *Das Gütemerkmal Lichtrichtung ist das einzige in der Normung für Innenbeleuchtung etablierte Kriterium, das nicht über Kennzahlen quantifizierbar ist. Dies erschwert dessen Berücksichtigung in der Planungspraxis, da die Kenntnis über eine geeignete Lichtrichtung für einen spezifischen Beleuchtungszweck bisher fehlt.*
3. *Die Einführung einer, möglicherweise mehrerer Kennzahl(en) für das Kriterium Lichtrichtung bildet die Grundlage für eine Messbarkeit und Bewertung, dass heißt für ein quantitatives Gütemerkmal und unterstützt so die Umsetzung von Lichtqualität.*
4. *Erst die Einführung einer, möglicherweise mehrerer Kennzahl(en) für das Kriterium Lichtrichtung ermöglicht, die Lichtqualität in Innenräumen durch Tageslicht und künstlicher Beleuchtung ganzheitlich zu bewerten.*
5. *Die Ergebnisse der Untersuchungen werden nur Einzug in die Planungspraxis finden, wenn sich diese in aktuelle Lichtberechnungssoftware implementieren und für den Planer komfortabel anwenden lässt.*

FORSCHUNGSHINTERGRUND

Die nachfolgenden Ausführungen zu theoretischen Beschreibungen des Lichts im Raum sowie exemplarisch ausgewählte Untersuchungen zur Bewertung der Lichtrichtung zeigen den aktuellen Stand der Forschung diesbezüglich auf.

Theoretische Beschreibung des Lichts im Raum

Skalarer Ansatz: Die Raumhelligkeit nach Arndt

Arndt^{1,2,3,4} begann 1928, den Begriff der *Raumhelligkeit* als skalare Größe zur Charakterisierung der räumlichen Verteilung des Lichts einzuführen. In der Motivation, eine die Raumbeleuchtung besser beschreibende Größe als die der ebenen Beleuchtungsstärke zu finden, legte er den Grundstein zur Verbreitung der heute als *Raumbeleuchtungsstärke* E_0 bekannten Maßzahl. Er beschrieb den Eintrag des Lichts auf einen kugelförmigen Messkörper aus Opalglas in der Einheit Lumen/ccm und normierte diese Einheit auf *Grad Raumhelligkeit* (10^{-4} Lumen/ccm \triangleq 1 Grad Raumhelligkeit). Für die Beschreibung der „Lichtdurchflutung“ eines Raums maß er die Raumhelligkeit in einem räumlichen Raster und begann, die Beleuchtung anhand verschiedener Situationen und Lichtquellen zu untersuchen.

¹ ARNDT, Wilhelm: *Raumhelligkeit als neuer Grundbegriff der Beleuchtungstechnik* : Vortrag in der D.B.G. am 5. Januar 1928. In: Licht und Lampe (1928), Nr. 7, S. 247–250

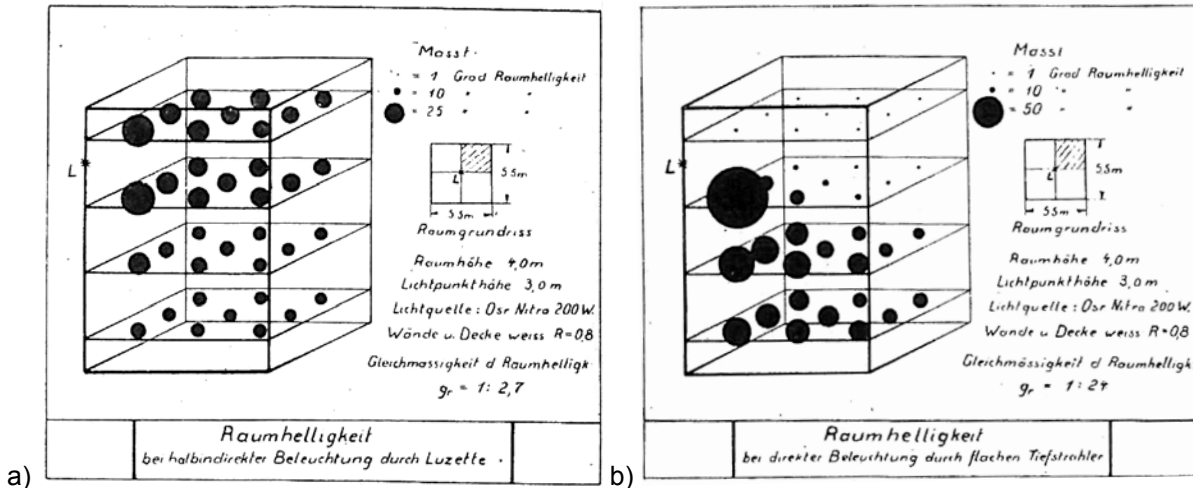
² ARNDT, Wilhelm: *Beleuchtungsstärke oder Raumhelligkeit?* (Aus dem Beleuchtungstechnischen Laboratorium der Technischen Hochschule Berlin). In: Licht und Lampe (1928), Nr. 23, S. 833–836

³ ARNDT, Wilhelm: *Neue Grundzüge der Beleuchtungstechnik* : Vortrag auf der 17. Jahresversammlung der DBG in Wien, am 14. September 1929. (Aus dem Beleuchtungstechnischen Laboratorium der Technischen Hochschule Berlin-Charlottenburg). In: Licht und Lampe (1930), Nr. 10, S. 537–538

⁴ ARNDT, Wilhelm: *Beleuchtungsbewertung mit Hilfe der Raumhelligkeit* : II, b) Praktische Beispiele. Veröffentlichung aus dem Beleuchtungstechnischen Laboratorium der Technischen Hochschule Berlin. (Vorträge, gehalten in der Mitgliederversammlung der Deutschen Beleuchtungstechnischen Gesellschaft am 13. Februar 1930). In: Licht und Lampe (1930), Nr. 22, S. 1092–1095

Er ging sogar soweit, eine Gleichmäßigkeit der Raumhelligkeit zu beschreiben und wies an Beispielen nach, dass diese für die Beschreibung der Beleuchtung geeigneter sei, als die Gleichmäßigkeit der ebenen Beleuchtungsstärke.

Zur Visualisierung seiner Ergebnisse stellte er die gemessenen Werte der Raumhelligkeit in Kugeln dar, deren Durchmesser den Grad Raumhelligkeit repräsentieren.



Die Abbildungen⁵ zeigen die Verteilung der Raumhelligkeit für a) eine „halbindirekte Beleuchtung“ und b) „direkte Beleuchtung durch einen flachen Tiefstrahler“

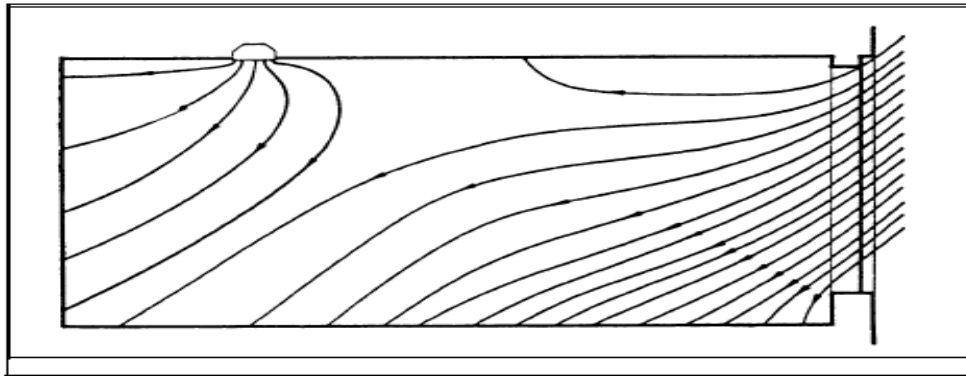
Arndt stieß zu seiner Zeit mit diesem damals neuartigem Konzept vor allem auf viel Kritik, was möglicherweise ein dafür Grund ist, dass die *Raumbeleuchtungsstärke* E_0 zwar eine bis heute bekannte Größe ist, aber nicht mehr im Kontext der räumlichen Verteilung Anwendung findet. Zweifel an dem Ansatz zielten auf:

- die Maßzahl
Ist das Einbeziehen des unteren hemisphärischen Lichtanteils sinnvoll, wenn keine Sehaufgabe aus dieser Richtung existiert?
- deren Anwendbarkeit für die Beschreibung des Helligkeitseindrucks
Was sagt die Raumhelligkeit an einem Raumpunkt aus, an dem es keine Fläche gibt, auf der das Licht auftrifft?
- das raumfüllende Messgitter
Welche Aussage hat eine Raumhelligkeit an einem Punkt, der sich in 2,5 m Höhe inmitten des Raums befindet und bei dessen Nutzung keine Rolle spielt?
- den Aufwand bei der Messung jedes zu beleuchtenden Raumes.
Wie soll diese Größe Anwendung bei der Beurteilung jedes zu beleuchtenden Raums finden, wenn der Messaufwand durch das Messgitter so erheblich ist?

⁵ ARNDT, Wilhelm: *Raumhelligkeit als neuer Grundbegriff der Beleuchtungstechnik* : Vortrag in der D.B.G. am 5. Januar 1928. In: *Licht und Lampe* (1928), Nr. 7, S. 248

Vektorieller Ansatz: Der Lichtvektor / Der Beleuchtungsvektor

Die vektorielle Beschreibung des Lichts wurde maßgeblich durch Geršun⁶ initiiert, der bereits in den 1940er Jahren erste Veröffentlichungen⁷ mit der Formulierung des *Lichtvektors* sowie der Gesamtheit dieser Vektoren als *Lichtfeld* eine umfassende Grundlage für diesen Ansatz bildete. Danach wird der Vektor in seiner Richtung durch die Hauptlichteinfallsrichtung beschrieben, während das Lichtfeld ähnlich dem elektromagnetischen Feld in Form von Flusslinien entlang der Richtungen der Vektoren an Punkten im Raum dargestellt wurde. Wie die nachfolgende Abbildung zeigt, ist selbst die Überlagerung von Feldern dazu theoretisch definiert.



Überlagerung eines Lichtfelds von durch ein Fenster eintretendem Himmelslicht mit einem Lichtfeld einer einzelnen Punktlichtquelle⁸

Über die Ermittlung des Betrags des Vektors, ebenso wie über die Lage dessen Fußpunkts herrscht bei darauffolgenden Veröffentlichungen weiterer Autoren wie Moon und Spencer⁹, Helwig¹⁰ und Cuttle^{11,12} Uneinigkeit. Der heute am weitesten verbreitete Ansatz ist der des *Illumination Vector* von Cuttle, dessen Betrag als Differenz zweier ebener entgegengesetzt gerichteter Beleuchtungsstärken beschrieben wird. Ein einfacher Messaufbau in Form eines Würfels, auf dessen sechs Begrenzungsflächen die ebene Beleuchtungsstärke gemessen wird, ist Bestandteil seiner zahlreichen Untersuchungen zur Bewertung der Beschaffenheit der räumlichen Beleuchtung. Nach dieser Methode wird der Beleuchtungsvektor in der Richtung definiert, in der zwei entgegengesetzt gerichtete Beleuchtungsstärken die maximale Differenz aufweisen.

Ebenso wie frühere Autoren beschreibt Cuttle außerdem das Superpositionsprinzip, die vektorielle Addition zweier Beleuchtungsvektoren hervorgerufen durch zwei Lichtquellen, als gültig.

⁶ GERŠUN, A. A.: *Das Lichtfeld*. Kapitel. Moskau : Fizmatgiz, 1958, S. 223–397

⁷ Vgl. HELWIG, H.-J.: *Die Feldtheorie in der Lichttechnik (Einführung)*. In: LICHT-TECHNIK 2 (1950), Nr. 1, S. 14–20

⁸ KOKOSCHKA, Siegfried: *Grundlagen der Lichttechnik*. Script zur Vorlesung (2003)

⁹ MOON, Parry H. ; SPENCER, Domina Eberle: *The photic field*. Cambridge, Mass. : MIT Pr., 1981

¹⁰ HELWIG, H.-J.: *Die Feldtheorie in der Lichttechnik (Einführung)*. In: LICHT-TECHNIK 2 (1950), Nr. 1, S. 14–20

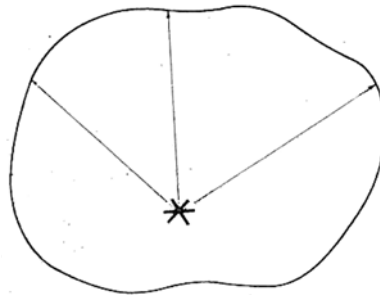
¹¹ CUTTLE, Christopher: *Beyond the working plane*. CIE Proceedings, 1963

¹² CUTTLE, Christopher: *Cubic illumination*. In: Lighting Research and Technology 29 (1997), Nr. 1, S. 1–14

Dieser rein mathematische Umgang in Form von Superposition und Differenzbildung ist zugleich Grundlage zur Kritik an diesem Ansatz. Es wird beschrieben, dass dies nicht der Wahrnehmung übereinstimmt, da „das Auge die Beleuchtungsstärken nicht vektoriell addiert“¹³ und die Differenz zweier Beleuchtungsstärken eine Größe ohne Aussage für die Beschreibung von Helligkeit ist.

Vektorieller Ansatz: Der Beleuchtungsstärkeverteilungskörper nach Lingenfelser

Zeitgleich mit Arndt im Jahr 1928 beschrieb Lingenfelser¹⁴ den Ansatz des Beleuchtungsstärkeverteilungskörpers, der die Gesamtheit aller an einem Punkt in alle Raumrichtungen gemessenen ebenen Beleuchtungsstärken beinhaltet. Dieser entsteht, wenn man die Richtung der Normalen der Messflächen mit dem Betrag der Beleuchtungsstärke ausgehend vom betreffenden Raumpunkt bewertet.



*Beleuchtungsstärkeverteilungskörper
an einem Raumpunkt¹⁵*

Lingenfelser war vorrangig daran interessiert, die Güte der Beleuchtung über ihre Beschaffenheit, den Anteil an diffusem und gerichtetem Licht zu beschreiben. Er greift dabei für seine Motivation die Aussagen von Teichmüller auf, wonach „wir für [...] die Beleuchtung des Raumes nicht nur die seiner begrenzenden und sonst in ihm enthaltenen realen Flächen zu verstehen haben (physiologischer Teil der Raumbeleuchtung), sondern [...] außerdem die Beleuchtung auf allen innerhalb dieser Grenzflächen denkbaren, an beliebigen Stellen angeordneten und unter beliebigen Winkeln zur Horizontalen geneigten Fläche in Betracht ziehen müssen (lichtstromlicher Anteil)“.¹⁶ Dies erreicht Lingenfelser als theoretische Beschreibung durch den Beleuchtungsstärkeverteilungskörper, ist sich jedoch gleichzeitig bewusst, dass eine Bewertung eher mit der Leuchtdichtevertellung korreliert. Außerdem sagt er bereits zu diesem Zeitpunkt voraus, dass die Berechnung dieser Körper enormen Aufwand bedeuten würde.

¹³ BAER, Roland: *Beleuchtungstechnik*. 3., vollst. überarb. Aufl. Berlin : Huss-Medien, 2006, S. 77

¹⁴ LINGENFELSER, Heinrich: *Ueber den diffusen Anteil der Beleuchtung und ihre Schattigkeit*. Berlin : Osram, (1928) (Osram-Lichtheft A, 2)

¹⁵ LINGENFELSER, Heinrich: *Ueber den diffusen Anteil der Beleuchtung und ihre Schattigkeit*. Berlin : Osram, (1928) (Osram-Lichtheft A, 2) S. 314

¹⁶ Teichmüller, Strecker: *Hilfsbuch der Elektrotechnik*, 10. Auflage, S. 630

Diskussion

Die drei beschriebenen Ansätze sind sowohl in ihrem Inhalt, als auch durch die an ihr geübte Kritik bedeutsam für aktuelle Fragestellungen zur Lichtrichtung. Während die Raumhelligkeit eine gute Aussage über die Lichtstromverteilung trifft, ist der vektorielle Ansatz zur Beschreibung der Lichteinfallrichtung vor allem auch durch die Beschreibung der Beleuchtung bei Tageslicht und gleichzeitig künstlichem Licht aufschlussreich. Der Beleuchtungsstärkeverteilungskörper bietet ergänzend zur Raumhelligkeit die Verteilung des an einem Punkt einfallenden Lichtstroms.

Für die aktuellen Untersuchungen wird in Betracht gezogen, alle drei Ansätze bei der Entwicklung eines gemeinsamen zu berücksichtigen. Die Leistungsfähigkeit hinsichtlich der visuellen Bewertung wird anschließend anhand von Teiluntersuchungen auf Basis qualitativer Evaluierungsmethoden, als auch im Rahmen umfangreicher experimenteller Studien mit Probanden in einem 1:1 Modellraum überprüft.

Bewertung der Lichteinfallrichtung

Ergebnisse ausgewählter Untersuchungen

Der Einfluss der Lichteinfallrichtung auf das Erscheinungsbild von Gesichtern und Objekten war Gegenstand mehrerer Untersuchungen in den 1960er und 1970er Jahren. Cuttle¹⁷ entwickelte eine Versuchsanordnung zur Bewertung des Modelling von beleuchteten Gesichtern. Dabei ordnete er zwei zur Testperson offene, getrennt schaltbare Leuchtstofflampen-Systeme so an, dass das eine zur diffusen allseitigen Beleuchtung diene, während das zweite aus in gleichen Elevationswinkelschritten angebrachte Leuchtstofflampen bestand, mit denen die Lichteinfallrichtung variiert werden konnte. Die Testpersonen stellten nach einer anfänglich gerichteten Beleuchtung durch das seitliche System die Mischung der Systeme für das optimale und gerade noch akzeptierte Modelling eines Gesichts ein. Diese Einstellungen wurden anschließend im Zusammenhang mit dem Vektor-/Skalar-Verhältnis der Beleuchtungsstärke $|\vec{E}|/E_s$ interpretiert. Fischer^{18,19} erweiterte 1970 die Testanordnung sowohl um ein zusätzliches Beleuchtungssystem mit Glühlampen für stärker gerichtetes Licht, als auch um eine Reihe von Objekten, an denen das Modelling durch eine Apertur und anhand eines Fragebogens in voreingestellten Szenen bewertet wurde. Es ist außerdem bekannt, dass Noguchi *et al*²⁰ ebenfalls eine ähnliche Versuchsanordnung benutzten, um Aussehen und Schattenwurf von Kleidern zu bewerten.

¹⁷ Cuttle, C.; Burt, W. and Valentine, B.: *Beyond the Working Plane*. CIE Washington P-67.12 (1967)

¹⁸ Fischer, D.: The European approach to the integration of lighting and air-conditioning. *Lighting Research and Technology*, vol. 2 p. 150 (1970)

¹⁹ Fischer, D.: Optimale Beleuchtungsniveaus in Arbeitsräumen (Optimal Lighting Levels in Working Interiors). *Lichttechnik*, vol. 22 p. 61, 103 (1970)

²⁰ Noguchi, T.; Ejima, Y.; Nagai, H. and Nakano, T.: Influence of the light direction on appearance of solid object. *Journal of Light & Visual Environment*, vol. 1 No. 1 pp. 64-69 (1977)

Obwohl die genannten Untersuchungen Einstellversuche zum einen und Fragebogenbewertungen zum anderen beinhalteten, ähneln sich die Ergebnisse stark bei den vergleichbaren Beleuchtungssystemen und Untersuchungsgegenständen. Demnach werden Gesichter bei einem Vektor-/Skalar-Verhältnis von ca. 1 bis 1,5 bevorzugt, wobei die Toleranz bei der Lichteinfallrichtung von oben größer ist, als bei seitlichem Lichteinfall. Für ein gutes Modelling von Objekten wird ein größeres Vektor-Skalar-Verhältnis, also mehr Anteil an gerichtetem Licht, und vor allem ein seitlicher Lichteinfall bevorzugt: $|\vec{E}|/E_s$ 1,5 - 3. Hervorzuheben ist das Ergebnis von Fischer, nach dem für die Beleuchtung durch gerichtete Punktlichtquellen ein bei Gesichtern und Objekten gleichmäßigeres Verhältnis ($|\vec{E}|/E_s = 0,5...1$ bzw. $0,8...2$) im Vergleich zur diffuseren Beleuchtung durch Leuchtstofflampen bevorzugt wird. Es wurde vermutet, dass die Ausbildung zu harter Schatten Grund für diese Bewertung sei. Als Anwendung der Ergebnisse für die Praxis wurde beschrieben, dass bei den damals in der Innenbeleuchtung eingesetzten Leuchten mit Leuchtstofflampen diese Werte gut erfüllbar sind, wenn niedrige Reflexionsgrade vor allem auf Böden vermieden würden.

Diskussion

Für das aktuelle Forschungsvorhaben bilden die beschriebenen Untersuchungen eine gute Grundlage für die Versuchsmethodik. Sie lassen jedoch auch den Transfer zu den aktuellen Forschungsfragen bezüglich der Wahl der Lichtquellen und Untersuchungsgegenstände zu.

Der Einsatz von zwei Leuchtstofflampen-Systemen ließ nicht die gezielte Variation zwischen gerichteter und diffuser Beleuchtung zu, so dass das Vektor-/Skalar-Verhältnis nur in begrenztem Maß untersucht werden konnte. Dass die Ergebnisse außerdem bei der Beleuchtung mit dem Glühlampensystem abweichen, lässt den Einfluss der Ausdehnung der Lichtquelle, also des Grads der Diffusität der Beleuchtung, erkennen. Nicht nur der Rückgang von Glühlampen in der Innenbeleuchtung, sondern auch die Entwicklung und Verbreitung kleinere Lichtquellen, führt direkt zu der Forderung, LED-Beleuchtung bezüglich der Lichtrichtung eingehend zu untersuchen.

Den zweiten Ansatzpunkt an die Untersuchungen bilden die bisher eingesetzten Untersuchungsobjekte. Die Bewertung des Erscheinungsbilds von Gesichtern, Personen und Objekten in variierten Lichtszenen ist Gegenstand vieler Untersuchungen. Die Ergebnisse sind aus heutiger Sicht immer noch gültig und nicht in Frage zu stellen. Dennoch haben sich Kennzahlen zu Modelling und Schattigkeit nur in geringem, unzureichendem Maß in der Planungspraxis etabliert, auch wenn sich das Bewusstsein um die Bedeutung dessen aufrecht erhalten hat. Ein Grund dafür könnte sein, dass Personen und Objekte erst bei der Nutzung des Raums relevant und bestimmbar werden, wohingegen im Planungsstadium für die Beleuchtung oft noch nicht die Einrichtung des Raums feststeht. Um beispielsweise eine geeignete Beleuchtung eines Konferenzraums zu erreichen, müsste sowohl die Ausstattung des Raums als auch die

Kommunikationsanordnung bekannt sein. Erst dadurch ließen sich die oben genannten Ergebnisse für ein optimales Modelling berücksichtigen.

Der fehlenden Kenntnis um die Personen und Objekte im Raum geht jedoch das fehlende Wissen um die Ursache für das Entstehen von Schatten und Modelling in diesem Raum, die Lichtrichtung, voraus. Die Kenntnis der Diffusität der Beleuchtung und der möglicherweise zeitlich und örtlich variierenden Lichteinfallrichtung (z.B. durch Tageslicht) an wichtigen Punkten im Raum, würde die Planung vorerst unabhängiger von der Nutzung ermöglichen. Eine Untersuchung zur raumbezogenen Bewertung dieser Parameter ist deshalb ebenfalls im Fokus der aktuellen Untersuchung.

FORSCHUNGSGEGENSTAND

Auf Grundlage des dargestellten Forschungshintergrundes und den durch die Hypothesen aufgespannten inhaltlichen Rahmen sind folgende Aspekte Gegenstand des Forschungsvorhabens:

- der Raumeindruck in Bezug auf Lichtqualität
- die Verteilung der Lichtrichtung an einzelnen Punkten und im Raum allgemein
- das Verhältnis zwischen diffuser und gerichteter Beleuchtung an einzelnen Punkten und im Raum allgemein

Die Herangehensweise gliedert sich dazu wie folgt:

1. Simulation
 - Analyse aktueller Beleuchtungsansätze auf Basis der theoretischen Ansätze zur Beschreibung des Lichts im Raum
→ Ermitteln von Unterscheidungskriterien bezüglich der Untersuchungsaspekte
2. Messung
 - Entwickeln einer Messanordnung zur Erfassung der relevanten Größen
3. Bewertung der Kriterien
 - Entwicklung und Aufbau eines Mock-up Raums
→ Probandenversuche zur Bewertung
 - Entwicklung eines Beschreibungsmodells anhand der Ergebnisse
4. Simulation
 - Implementierung des neuen Beschreibungsmodells in ein Software

Nachfolgend werden exemplarisch Inhalte zum ersten Bearbeitungsschritt, der Analyse von aktuellen Beleuchtungssituationen auf Basis von Simulationen, dargestellt. Weitere Untersuchungsschritte sind derzeit in Bearbeitung.

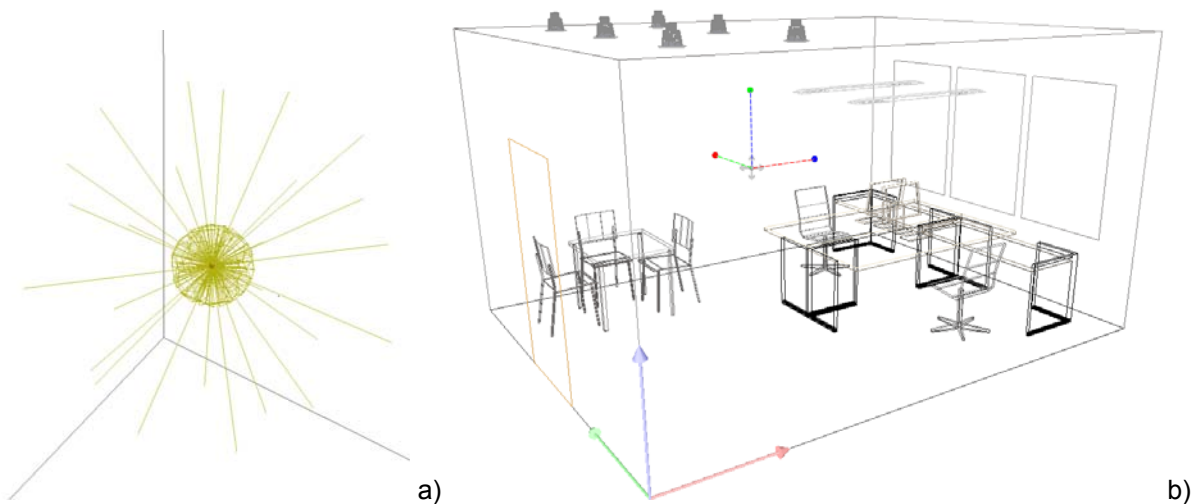
ANALYSE AKTUELLER BELEUCHTUNGSANSÄTZE

Beleuchtungsstärkeverteilungskörper in der Büroumgebung

Die dargestellten, theoretischen Ansätze zur Beschreibung der Lichtrichtung und Raumhelligkeit sind, wie erläutert, jeweils allein nicht ausreichend für die Beschreibung des Themas. Sie können jedoch für die Bearbeitung der Fragestellungen der Untersuchung kombiniert werden, so dass für jeden Punkt im Raum die räumliche Beleuchtungsstärke und die Beleuchtungsvektoren aus allen Richtungen gemessen und bewertet werden kann. Damit geht dieser Ansatz über den von Cuttle, Fischer und Noguchi untersuchten hinaus, indem vor allem die Haupteinfallsrichtung des Lichts und das Vektor-/Skalarverhältnis an diesem Raumpunkt bewertet wurde. Vielmehr wird eine Erfassung und Bewertung aller Einfallsrichtungen in einem Punkt, sowie die Verteilung der „Punktergebnisse“ in Relation zu anderen Punkten im Raum gebracht.

Ausgangsgröße für diesen Ansatz ist der Beleuchtungsstärkeverteilungskörper, anhand dessen sich verschiedene Beleuchtungskonzepte vergleichen lassen. Im Folgenden werden exemplarisch drei durch Verwendung von Lichtplanungsprogrammen (DIALux 4.9, ReluxPro - 2010.2.4) ermittelten Verteilungskörper an einem Raumpunkt in einem Dreischsüro in zwei Vergleichen diskutiert.

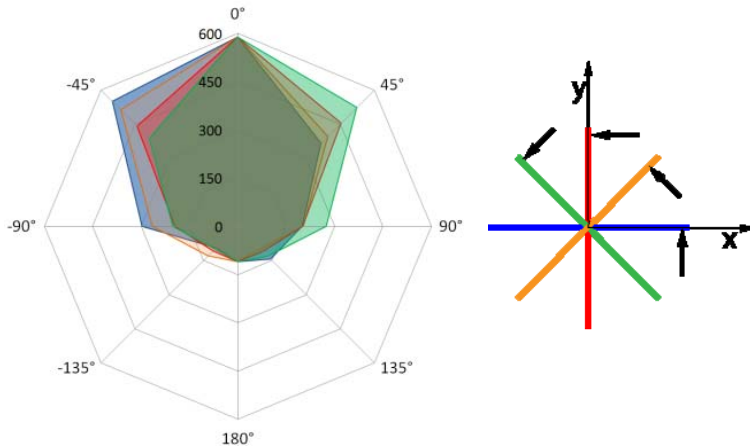
Die nachfolgenden Abbildungen zeigen das Simulations-Set-up anhand der virtuellen Messanordnung und den Raum, in welchem die Beleuchtungssituationen untersucht wurden.



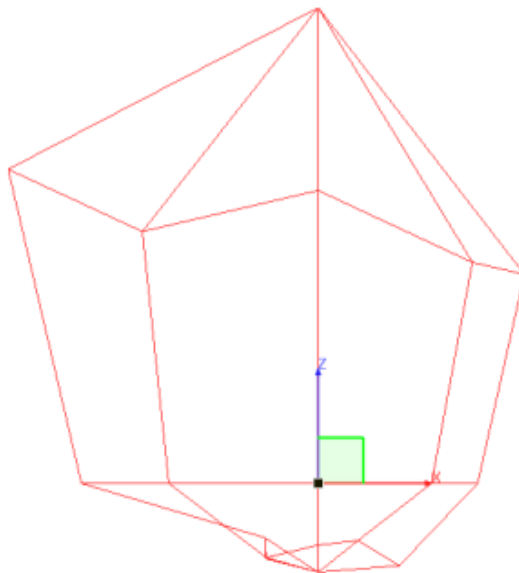
a) Virtuelle Messanordnung zur Ermittlung von 26 ebenen Beleuchtungsstärken (φ, ϑ variiert in 45° Schritten) in einem Punkt, die kugelförmige Anordnung in der Mitte entsteht darstellungsbedingt durch die Dichte der Pfeilspitzen am Punkt; b) Dreischsüro mit Doppelschreibtischanordnung und kleinem seitlichen Besprechungsbereich. Die Lage des räumlichen Messpunkts ist durch das kleine Koordinatensystem im Raum gekennzeichnet.

Darstellung des Beleuchtungsstärkeverteilungskörpers

Für die richtige Interpretation der Simulationsergebnisse wird die Darstellung dieser nachfolgend vereinbart.



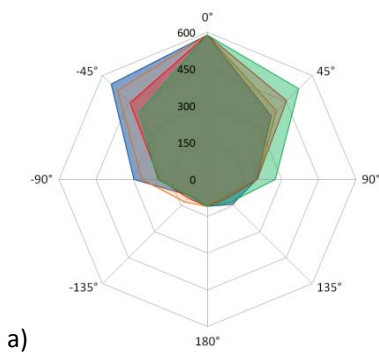
Das Netzdiagramm zeigt für vier senkrechte Schnittebenen (Variation von φ um 45°) jeweils die ebenen Beleuchtungsstärken (in lx) senkrecht zu acht Einfallsrichtungen (Variation von ϑ um 45°).



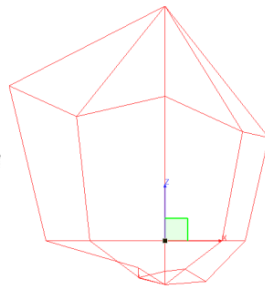
Die dreidimensionale Gitterdarstellung veranschaulicht die Ausbildung des Verteilungskörpers. Das eingezeichnete Koordinatensystem zeigt den virtuellen Messpunkt.

Für beide Darstellungen gilt, dass die Verbindungslinien zwischen den Beleuchtungsstärkebeträgen nur als Darstellungsmittel dienen. Es wird keine Interpolation zwischen den ermittelten Werten durchgeführt, da dies zu falschen Ergebnissen führt.

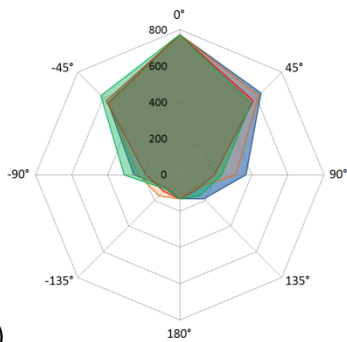
A Vergleich der Direkt-Indirektbeleuchtung mit Leuchtstofflampen und LED



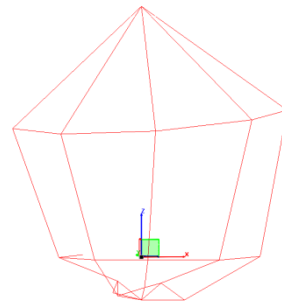
a)



a) *Beleuchtungsstärkeverteilung am Messpunkt durch Direkt-Indirektbeleuchtung über dem Doppelschreibtisch mit jeweils einer achsparallelen Leuchte mit T5-Leuchtstoff-lampen und Direktbeleuchtung in der Raumtiefe über Downlights mit Kompaktleuchtstofflampen*



b)

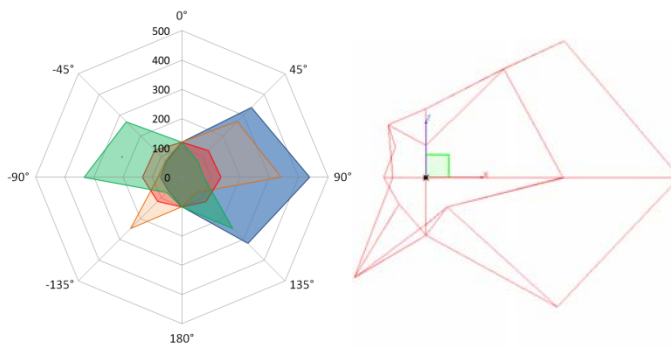


b) *Beleuchtungsstärkeverteilung am Messpunkt durch Direkt-Indirektbeleuchtung über dem Doppelschreibtisch mit jeweils einer achsparallelen Leuchte mit LED und Direktbeleuchtung in der Raumtiefe über LED-Downlight*

Beide Beleuchtungslösungen erfüllen gleichermaßen die Anforderungen an die Beleuchtung von Arbeitsbereichen gemäß prEN 12464-1:2009 bezüglich des Beleuchtungsniveaus, respektive der ebenen Beleuchtungsstärken im Bereich horizontaler und vertikaler Sehaufgaben, sowie auf Wänden und Decke. Dennoch lassen sich beim Vergleich der beiden Beleuchtungsstärkeverteilungskörper Gemeinsamkeiten und Unterschiede beschreiben, die auf die räumlichen Beleuchtungssituationen zurückzuführen sind. Sofort erkennbar ist der Schwerpunktunterschied zwischen beiden räumlichen Verteilungskörpern. Beim anschließenden Vergleich der Ebenendarstellung zeigt sich, dass einerseits die Verteilung durch die Beleuchtung mit Leuchtstofflampen stärker zwischen den Ebenen differiert, zugleich aber auch die unter dem Einfallswinkel ϑ von -45° bis 45° ermittelten Beleuchtungsstärken weniger stark verschieden sind, als bei der LED-Beleuchtung. Deren Verteilungskörper am Messpunkt ist homogener im Vergleich der Ebenen zueinander und insgesamt schlanker in der Ausbildung bei zugleich höherer direkter Beleuchtungsstärke von oben ($\vartheta = 0^\circ$). Als Grund hierfür ist ein geringerer Anteil an diffuser Beleuchtung am Messpunkt, hervorgerufen durch das stärker gerichtete Licht der LED.

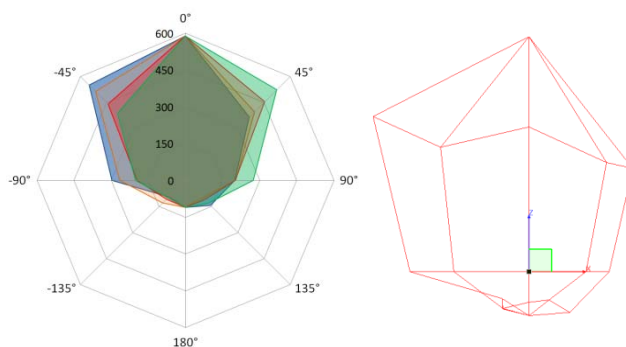
Beiden ist jedoch prinzipiell eine ähnliche Form zuzuschreiben, vor allem in der Beschreibung der Anteile ober- und unterhalb der horizontalen Ebene, in der sich der Messpunkt befindet. Die Asymmetrien beider Verteilungen vor allem im Bereich unterhalb der gedachten Ebene sind bei der zur Achse „Tür – Fenster“ (auf der sich der Messpunkt befindet) symmetrischen Beleuchtungsanlage, vor allem auf die Reflexionen durch die Sitzgruppe zurückzuführen.

B Vergleich der Beleuchtung durch Tageslicht mit Direkt-Indirektbeleuchtung mit Leuchtstofflampen



a) *Beleuchtungsstärkeverteilung am Messpunkt bei Tageslicht, simuliert für den 21.06., 12:00 Uhr (Bedeckter Himmel).*

a)



b) *Beleuchtungsstärkeverteilung am Messpunkt durch Direkt-Indirektbeleuchtung über dem Doppelschreibtisch mit jeweils einer achsparallelen Leuchte mit T5-Leuchtstofflampen und Direktbeleuchtung in der Raumtiefe über Downlights mit Kompaktleuchtstofflampen*

b)

Allein aus der Seherfahrung wird sich jeder Nutzer ohne Schwierigkeiten der unterschiedlichen Qualität der Beleuchtung durch Tageslicht und Leuchtstofflampen bewusst sein. Nicht das einzige, aber dennoch ein elementares Merkmal des Tageslichts ist die starke Richtung des Lichts bei direktem Einfall und unbedecktem Himmel. Der oben dargestellte Beleuchtungsstärkeverteilungskörper wurde jedoch in einer Simulation für den Bedeckten Himmel nach CIE ermittelt. Die dennoch deutliche Orientierung des Körpers in Richtung des Fensters lässt vermuten, dass die Beleuchtungsstärke mit der Ausrichtung der Flächennormalen zum Fenster im Vergleich zu den in anderen Richtungen so hoch ist, weil der Anteil des direkt auftreffenden Lichts deutlich größer ist, als der durch die Reflexionen im Raum hervorgerufene.

Im Vergleich der Tageslichtsituation mit der der Beleuchtung durch Leuchtstofflampen, weist der Beleuchtungsstärkeverteilungskörper letzterer eine deutlich größere Gleichmäßigkeit in den Ebenen auf. Hervorzuheben ist auch, dass nicht nur die Orientierung der größten Beleuchtungsstärke in der Tageslichtsituation natürlicherweise seitlich zu ermitteln ist, sondern vor allem auch die ausgeprägteren Anteile im unteren Teil des Körpers, die auf Reflexionen des Bodens und der Wand gegenüber der Fenster zurückzuführen sein müssten.

Durch den Vergleich dieser beiden Beleuchtungssituationen lässt sich für die Dimension der Einfallsrichtung des Lichts und die Diffusität der Beleuchtung erraten, welche Unterschiede diese in der Beleuchtung und Wirkung eines Raums verursachen. Die Planung von Beleuchtung in Innenräumen integriert jedoch selten beide Szenen, obwohl sie durchaus, z.B. im Büro sogar innerhalb eines Tag relevant sein können.

Beide Vergleiche (A und B) zeigen Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen drei Beleuchtungssituationen bezüglich der räumlichen Beleuchtungsstärkeverteilung an einem Punkt auf. Sie sind als exemplarisch zu betrachten, da weder ein Parameter systematisch bei gleichbleibenden weiteren Bedingungen variiert wurde und außerdem die durch Simulation ermittelten Beleuchtungsstärkewerte absolut und relativ fehlerbehaftet sind. Die Fehlerquellen für letzteres liegen zum einen im Berechnungsverfahren Radiosity begründet, dass den verwendeten Lichtplanungsprogrammen zugrunde liegt und nur von diffus reflektierenden Oberflächen ausgeht. Je gerichteter eine Lichtquelle ist und umso weniger reale Gegenstände im Raum optimal diffus reflektieren, umso größer ist die Abweichung des direkten und reflektierten Lichts als simulierte Beleuchtungsstärke in einer Richtung an einem Raumpunkt im Vergleich zu einer real gemessenen. Zum anderen wurde die Beleuchtungsstärke nur in Schrittwinkelweiten von φ und ϑ von 45° und nur an einem Punkt im Raum ermittelt. Ohne eine umfangreichere vergleichende Simulation mit einerseits einer größeren Anzahl von Messrichtungen und Raumpunkten lässt sich daher die Leistungsfähigkeit eines Ansatzes wie Radiosity nicht abschätzen. Dies, sowie weitere Simulationsstudien mit auf Raytracing basierender Software wird weiterer Bestandteil der Arbeit sein, um die Grundlage für eine spätere Implementierung in Lichtberechnungsprogramme zu schaffen.