

huss

Baer, Barfuß, Seifert

Beleuchtungs- technik Grundlagen



Deutsche Lichttechnische
Gesellschaft e.V.

5. Auflage

Beleuchtungstechnik

Grundlagen



**Deutsche Lichttechnische
Gesellschaft e.V.**

Die Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. (LiTG) ist ein eingetragener technisch-wissenschaftlicher Verein. Sie versteht sich als dynamisches Netzwerk und Wissensplattform für alle Licht-Interessierten zur Verbreitung lichttechnischen Fachwissens. Die LiTG verbindet Wissenschaftler aus Forschung und Lehre, Ingenieure und Techniker aus Entwicklung, Fertigung, Projektierung und Vertrieb, Mitarbeiter aus Bundes- und Landesministerien sowie Kommunalverwaltungen, Architekten, Innenarchitekten, Lichtplaner, Elektrofachplaner, Handwerker, Produktdesigner, Mediziner, Künstler und Studierende aus diesen Bereichen. Sie fördert die Lichttechnik in Theorie und Praxis auf regionaler, nationaler und internationaler Ebene. Die LiTG unterstützt sowohl die fachliche Aus- und Weiterbildung als auch die Forschung. Sie bietet ein lokal orientiertes, breitgefächertes Veranstaltungsprogramm aus Vorträgen, Diskussionen, Exkursionen und Besichtigungen, das über innovative lichttechnische Anwendungen, Entwicklungen, Produkte, Dienstleistungen und Forschungsvorhaben informiert und über gültige lichttechnische Vorschriften, Normen und Gesetze aufklärt. Siehe auch <http://www.litg.de>.

Baer, Barfuß, Seifert

Beleuchtungstechnik

Grundlagen

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet
über <http://portal.d-nb.de> abrufbar.

Titelfoto: Foto-Ruhrgebiet/stock.adobe.com

ISBN 978-3-341-01648-0

5. Auflage

© 2020 HUSS-MEDIEN GmbH, Verlag Technik,
Am Friedrichshain 22, 10407 Berlin
Telefon: 030 42151-0, Fax: 030 42151-232
E-Mail: huss.medien@hussberlin.de
Internet: www.huss-shop.de

Eingetragen im Handelsregister Berlin HRB 36260
Geschäftsführer: Christoph Huss, Wolfgang Huss, Thomas Perskowitz

Satz und Einbandgestaltung: HUSS-MEDIEN GmbH
Druck und Bindearbeiten: BELTZ Bad Langensalza GmbH

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieser Publikation darf ohne vorherige schriftliche Genehmigung
des Verlages vervielfältigt, bearbeitet und/oder verbreitet werden.
Unter dieses Verbot fallen insbesondere der Nachdruck, die Aufnahme und Wiedergabe in Online-Diensten,
Internet und Datenbanken sowie die Vervielfältigung auf Datenträgern jeglicher Art.

Alle Angaben in diesem Werk sind sorgfältig zusammengetragen und geprüft.
Dennoch können wir für die Richtigkeit und Vollständigkeit des Inhalts keine Haftung übernehmen.

Vorwort

Die rasante Entwicklung der LED hat die Lichttechnik in den letzten fünfzehn Jahren maßgeblich verändert, sodass ein neues Lehrbuch dringend erforderlich geworden war. Auf Basis des anerkannten Werkes Beleuchtungstechnik – Grundlagen von ROLAND BAER entstand so mit der 4. Auflage ein deutsches Lehrbuch, das von den Lichtlehrenden innerhalb der Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft e.V. (LiTG) auf den aktuellen Stand der Technik gebracht wurde. Insbesondere die Themen LED, LED-Leuchten, Lichtsteuerung, Tageslicht und Lichtberechnungsprogramme wurden z. T. erstmalig in einem deutschen Lehrbuch ausführlich behandelt.

Lichtsteuerungen, Sensorik und vor allem die zentrale tragende Rolle von Leuchten im Internet der Dinge (IoT), werden die Lichtbranche noch einmal grundlegend verändern, so dass die vorliegende 5. Auflage diesen hochaktuellen neuen Themen im Kapitel 4 mehr als 50 Seiten widmet. Alle übrigen Kapitel wurden von den Autoren sorgfältig überarbeitet und auf den neusten Stand gebracht.

Das vorliegende Buch soll Lichtplanern sowie Lehrenden und Studierenden verschiedenster Fachrichtungen in Bachelor-, Master- und Diplom-Studiengängen an Universitäten und Fachhochschulen als Basis für Vorlesungen und Seminare in der Lichttechnik dienen. Auch für die Weiterbildung und in der beruflichen Praxis bietet die vorliegende Auflage ein gutes Rüstzeug.

Besonders stolz sind wir darauf, dass unter der Herausgeberschaft LiTG ein Autorenteam aus Lichtlehrenden und Industriepraktikern gewonnen werden konnte, dem einige der führenden Köpfe der deutschen Lichttechnik angehören. Als Autoren waren unter anderem beteiligt: ROLAND BAER, Prof. Dr. PAOLA BELLONI, Dr. HARTMUT BILLY, Dr. PETER BODROGI, Dr. MICHAEL BÖHNEL, WOLFGANG CORNELIUS, Prof. Dr. PETER FLESCHE, CORNELIA FÜRST, Prof. Dr. ROLAND GREULE, Dr. ARASCH HONARBACHT, Prof. Dr. TRAN QUOC KHANH, Dr. MARTIN KIRSTEN, Dr. RAINER KLING, Prof. WERNER OSTERHAUS, Prof. Dr. HERBERT PLISCHKE, UWE RABENSTEIN, Prof. Dr. ALEXANDER ROSEMANN, Prof. Dr. CHRISTOPH SCHIERZ, HANS-GEORG SCHMIDT, Prof. PAUL W. SCHMITS, Dr. FELIX SERICK, STEFAN SÖLLNER, Dr. ARMIN SPERLING, Dr. CORNELIA VANDAHN und Prof. Dr. STEPHAN VÖLKER. Wir bedanken uns für die ausgesprochen gute Zusammenarbeit.

Wir sind den Autoren der 3. Auflage des Buches Beleuchtungstechnik Grundlagen von 2006 ROLAND BAER, Dr. HARTMUT BILLY, Dr. ULRICH CARARRO, Dr. MARTIN ECKERT, Prof. Dr. DIETRICH GALL und ROLAND SCHNOR sehr dankbar für die gründlichen Vorarbeiten an diesem Fachbuch.

Unser Dank gilt auch dem Verlag, der die reibungslose Zusammenarbeit der 27 Autoren und an der Qualitätssicherung beteiligten wissenschaftlichen Fachlektoren beigetragen hat. Dank auch an TORSTEN ERNST, dessen Beharrlichkeit es zu verdanken ist, dass dieses Buch allen Widrigkeiten zum Trotz tatsächlich entstehen konnte. Ein ganz besonderer Dank gebührt Prof. Dr. CHRISTOPH SCHIERZ für das abschließende wissenschaftliche Fachlektorat des gesamten Werkes.

Unseren Familien sowie auch denen der Autoren und Fachlektoren möchten wir für ihre Unterstützung und ihr Verständnis in den arbeitsreichen Monaten während der Entstehung dieses Buches an dieser Stelle Danke sagen.

Autoren und wissenschaftliches Lektorat

Autor	Wissenschaftliches Lektorat
1.1 Einleitung	
Prof. MEIKE BARFUSS, FH Südwestfalen	Dr.-Ing. MATTHIAS HESSLING, Swarco
Dipl.-Ing. DIRK SEIFERT, Kunsthochschule „Burg Giebichenstein“ Halle, Signify GmbH	
1.2.1 bis 1.2.10 Lichttechnische und optische Grundlagen	
Prof. Dr.-Ing. habil. STEPHAN VÖLKER, TU Berlin	Dr. FELIX SERICK, TU Berlin
1.2.11 Grundbegriffe der Beleuchtungstechnik	
Prof. Dr. rer. nat. PAOLA BELLONI, Hochschule Furtwangen	Dr. FELIX SERICK, TU Berlin
1.3 Grundlagen der Farbmimetrik	
PD Dr.-Ing. habil. PETER BODROGI, TU Darmstadt	Prof. MEIKE BARFUSS, FH Südwestfalen
1.4.1 bis 1.4.4 Physiologische und psychologische Grundlagen	
Prof. Dr. sc. nat. habil. CHRISTOPH SCHIERZ, TU Ilmenau	Dr.-Ing. CORNELIA VANDAHL, TU Ilmenau
1.4.5 Nicht-visuelle Wirkung von Licht und Strahlung	
Prof. Dr. med. Dipl.-Ing. HERBERT PLISCHKE, Hochschule München	Dipl.-Ing. MATTHIAS BOESER
1.4.6 Photobiologische Gefährdung des Auges	
Prof. Dr. sc. nat. habil. CHRISTOPH SCHIERZ, TU Ilmenau	Dr.-Ing. CORNELIA VANDAHL, TU Ilmenau
1.5 Lichttechnische Berechnungen	
Prof. Dr.-Ing. ROLAND GREULE, HAW-Hamburg	Dipl.-Ing. DIRK SEIFERT, Kunsthochschule „Burg Giebichenstein“ Halle, Signify GmbH
1.6.1 bis 1.6.4 Lichttechnische Messungen	
Dr. ARMIN SPERLING, PTB	Prof. Dr.-Ing. HORST RIECHERT, FH Südwestfalen
1.6.5 Messung an Beleuchtungsanlagen	
Dr.-Ing. CORNELIA VANDAHL, TU Ilmenau	Prof. Dr. sc. nat. habil. CHRISTOPH SCHIERZ, TU Ilmenau
2.1 Lampen	
Prof. Dr.-Ing. habil. PETER FLESCH, Osram GmbH	Dr. FELIX SERICK, TU Berlin

Autor	Wissenschaftliches Lektorat
2.2 bis 2.4 Betriebsmittel	
Dipl.-Ing. CORNELIA FÜRST, Ledvance GmbH	Dipl.-Ing. DIRK SEIFERT, Kunsthochschule „Burg Giebichenstein“ Halle, Signify GmbH
2.5 Anorganische und organische Leuchtdioden	
Prof. Dr.-Ing. habil. TRAN QUOC KHANH, TU Darmstadt	Prof. MEIKE BARFUSS, FH Südwestfalen
2.6 Betriebsmittel für Leuchtdioden	
Dr. HARTMUT BILLY, Osram GmbH	Dipl.-Ing. DIRK SEIFERT, Kunsthochschule „Burg Giebichenstein“ Halle, Signify GmbH
3.1 bis 3.5 Leuchten	
Dipl.-Ing. HANS-GEORG SCHMIDT, ice Gateway GmbH, Berlin	Dr. MARTIN KIRSTEN, BÄRO GmbH & Co. KG
3.6 Thermomanagement von LED-Leuchten	
Prof. MEIKE BARFUSS, FH Südwestfalen	Dipl.-Ing. HANS-GEORG SCHMIDT, RZB Rudolf Zimmermann, Bamberg GmbH
3.7 Leuchtenausführung	
Dipl.-Ing. HANS-GEORG SCHMIDT, ice Gateway GmbH, Berlin	Dr. MARTIN KIRSTEN, BÄRO GmbH & Co. KG
4.1 Anwendung und Anforderungen	
Dr.-Ing. RAINER KLING, Karlsruher Institut für Technologie	Dipl.-Ing. FRIEDELHOLD HOLTZ, Insta GmbH
4.2 Steuerung und Regelung/4.3 Analoge drahtgebundene Schnittstellen	
Dipl.-Ing. DIRK SEIFERT, Kunsthochschule „Burg Giebichenstein“ Halle, Signify GmbH	Dipl.-Ing. FRIEDELHOLD HOLTZ, Insta GmbH
4.4 Drahtgebundene Digitale Schnittstellen	
Dipl.-Ing. DIRK SEIFERT, Kunsthochschule „Burg Giebichenstein“ Halle, Signify GmbH	Dipl.-Ing. FRIEDELHOLD HOLTZ, Insta GmbH
Dr.-Ing. RAINER KLING, Karlsruher Institut für Technologie	
4.5 Drahtlose Schnittstellen	
Dr.-Ing. RAINER KLING, Karlsruher Institut für Technologie	Dipl.-Ing. FRIEDELHOLD HOLTZ, Insta GmbH
4.5.1 Bluetooth	
Dr. MICHAEL BÖHNEL, Zumtobel	Dipl.-Ing. FRIEDELHOLD HOLTZ, Insta GmbH
4.5.2 Zigbee/4.5.3 Multi-Protokoll Zigbee 3.0 + Bluetooth Low Energy	
Dr. ARASCH HONARBACHT, Ubisys technologies GmbH	Dipl.-Ing. FRIEDELHOLD HOLTZ, Insta GmbH
4.5.4 W-Lan WiFi/4.5.5 Proprietäre Funkschnittstellen/4.5.6 Optische Kabellose Kommunikation	
Dr.-Ing. RAINER KLING, Karlsruher Institut für Technologie	Dipl.-Ing. FRIEDELHOLD HOLTZ, Insta GmbH

Autor	Wissenschaftliches Lektorat
4.6 Datennetzwerke und Gebäudemanagement	
Dr.-Ing. RAINER KLING, Karlsruher Institut für Technologie	Dipl.-Ing. FRIEDHELM HOLTZ, Insta GmbH
4.6.3 Weitere Netzwerke der Gebäudetechnik	
Dr.-Ing. RAINER KLING, Karlsruher Institut für Technologie	Dipl.-Ing. FRIEDHELM HOLTZ, Insta GmbH
Dipl.-Ing. DIRK SEIFERT, Kunsthochschule „Burg Giebichenstein“ Halle, Signify GmbH	
4.7 Industrial Ethernet, Feldbus und Gebäudemanagement	
Dr.-Ing. RAINER KLING, Karlsruher Institut für Technologie	Dipl.-Ing. FRIEDHELM HOLTZ, Insta GmbH
4.8. Sensorik und Anwendungen	
Dr.-Ing. RAINER KLING, Karlsruher Institut für Technologie	Dipl.-Ing. FRIEDHELM HOLTZ, Insta GmbH
4.9. Konzepte für Steuerungen	
Dipl.-Ing. DIRK SEIFERT, Kunsthochschule „Burg Giebichenstein“ Halle, Signify GmbH	Dipl.-Ing. FRIEDHELM HOLTZ, Insta GmbH
5 Beleuchtung mit Tageslicht	
Prof. Arch. WERNER OSTERHAUS, Aarhus Universität Dänemark	Prof. MATHIAS WAMBSGANNS, Hochschule Rosenheim
Dipl.-Ing. WOLFGANG CORNELIUS, FLVR Dienstleistungs GmbH, Pension	
6 Beleuchtungssysteme im Innenraum	
Prof. Dr. PAUL W. SCHMITS, HAWK Hildesheim	Dr.-Ing. CAROLIN LIEDTKE
Prof. Dr.-Ing. habil. ALEXANDER ROSEMANN, TU Eindhoven	
7 Beleuchtungssysteme im Außenraum	
Dipl.-Ing. UWE RABENSTEIN, Ingenieurbüro für Lichtlösungen Leipzig	Dipl.-Ing. CHRISTOPH HEYEN, freiberufl. Ingenieur für Lichttechnik
8.1 Anhang Formelzeichen	
Prof. Dr.-Ing. habil. STEPHAN VÖLKER, TU Berlin	Dipl.-Ing. DIRK SEIFERT, Kunsthochschule „Burg Giebichenstein“ Halle, Signify GmbH
Dr. FELIX SERICK, TU Berlin	
8.2 bis 8.5 Anhang	
Dipl.-Ing. DIRK SEIFERT, Kunsthochschule „Burg Giebichenstein“ Halle, Signify GmbH	

LED-Lichtbauelement, mit symmetrischer Lichtstärkeverteilung, Schutzart IP 65, Schutzklasse II. Entwickelt für die energieeffiziente Beleuchtung von Außenräumen, überzeugt die Leuchte durch hohe Lichtausbeute, lange Lebensdauer und Wahlmöglichkeit der Farbtemperatur. Besonders geeignet zur Strukturierung und Führung von Personen- und Fahrzeugverkehr. Mehr auf www.bega.com

BEGA



Das gute Licht.
Für die leichtere Orientierung.

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen	17
1.1	Einleitung	17
1.2	Lichttechnische und optische Grundlagen	21
1.2.1	Das Wesen des Lichtes	21
1.2.2	Licht als spektrale und integrale Größe	21
1.2.3	Licht als Welle und Teilchen	24
1.2.4	Ausbreitung des Lichtes	25
1.2.5	Die vier Grundgrößen der Lichttechnik	28
1.2.5.1	Lichtstrom	28
1.2.5.2	Lichtstärke	29
1.2.5.3	Beleuchtungsstärke	31
1.2.5.4	Leuchtdichte	32
1.2.6	Ergänzende Grundgrößen der Lichttechnik	33
1.2.6.1	Pupillenlichtstärke	33
1.2.6.2	Zylindrische, halbzyklindrische und sphärische Beleuchtungsstärke	34
1.2.6.3	Lichtmenge Q	35
1.2.6.4	Spezifische Lichtausstrahlung M	35
1.2.6.5	Lichteinfallstärke J	35
1.2.6.6	Belichtung und Leitzahl	35
1.2.7	Strahlungsphysikalische Größen	36
1.2.8	Abgeleitete Größen	36
1.2.8.1	Stoffkennzahlen	36
1.2.8.2	Ergänzende Stoffkennzahlen	37
1.2.8.3	Wirkungsgrade	40
1.2.9	Beziehungen zwischen den Grundgrößen	41
1.2.10	Berechnung einfacher Elementarstrahler	44
1.2.10.1	Zusammenhang zwischen Lichtstärke im Maximum der Ausstrahlung und dem Lichtstrom	44
1.2.10.2	Anwendung des Raumwinkelprojektionsgesetzes auf Lambertstrahler	45
1.2.10.3	Anwendung des Raumwinkelprojektionsgesetzes für Sekundär- und Primärstrahler	45
1.2.10.4	Berechnung der Beleuchtungsstärke mittels zonalem Lichtstromverfahren	46
1.2.11	Grundbegriffe der Beleuchtungsoptik	48
1.2.11.1	Geometrische Optik	49
1.2.11.2	Wellenoptik	51
1.2.11.3	Nichtabbildende Optik – Beleuchtungsoptik	55
1.3	Grundlagen der Farbmetrik	61
1.3.1	Farbreiz, CIE-Normvalenzsystem, CIE-Normfarbtafel, MACADAM-Ellipsen, Farbmischung	61
1.3.2	Farberscheinung, Farbumstimmung, Farb Räume, Farbdifferenzformeln	67
1.3.3	Farbwiedergabe, Farbwiedergabeindex und dessen semantische Deutung	72
1.3.4	Wahrnehmung und Präferenz der Weißpunkte	76
1.3.5	Zusammenfassung und Ausblick	77
1.4	Physiologische und psychologische Grundlagen	78
1.4.1	Aufbau des Auges	78
1.4.1.1	Optische Abbildung	78
1.4.1.2	Streulicht im Auge	79
1.4.1.3	Retina (Netzhaut)	79
1.4.2	Anpassung des Auges an die visuellen Bedingungen	82
1.4.2.1	Pupillenweite	82
1.4.2.2	Akkommodation	82

1.4.2.3	Adaptation des Auges	83
1.4.2.4	Augenbewegungen	84
1.4.3	Von der Beleuchtung beeinflusste Sehfunktionen	84
1.4.3.1	Kontrastwahrnehmung	85
1.4.3.2	Sehschärfe	91
1.4.3.3	Wahrnehmungsgeschwindigkeit	93
1.4.3.4	Hellempfindung	94
1.4.3.5	Sehfunktionen bei komplizierten Sehobjekt- und Umfeldstrukturen	95
1.4.4	Störgrößen der Beleuchtung	96
1.4.4.1	Physiologische Blendung	97
1.4.4.2	Psychologische Blendung	97
1.4.4.3	Wahrnehmen von Flimmern	99
1.4.4.4	Stroboskopeffekt	101
1.4.5	Nicht-visuelle Wirkungen von Licht	101
1.4.5.1	Anatomische Strukturen der visuellen Bahnen und Hellempfindlichkeit für Tagessehen	101
1.4.5.2	Entdeckung der intrinsisch fotosensitiven retinalen Ganglienzellen	102
1.4.5.3	Anatomische Strukturen der nicht-visuellen Bahnen und melanopische Wirkungen	103
1.4.5.4	α -opische und melanopische Bewertung von Strahlungsgrößen	103
1.4.5.5	Einfluss des Lebensalters auf die nicht-visuellen Wirkungen des Lichtes	106
1.4.5.6	Bedeutung der nicht-visuellen Wirkungen für die Beleuchtungstechnik	107
1.4.6	Fotobiologische Gefährdung des Auges	108
1.4.6.1	Schädigung durch UV-Strahlung	108
1.4.6.2	Schädigung durch IR-Strahlung	108
1.4.6.3	Blaulichtschädigung (BLH)	108
1.4.6.4	Altersbedingte Makuladegeneration (AMD)	109
1.5	Lichttechnische Berechnungen	110
1.5.1	Berechnung der ebenen Beleuchtungsstärke	110
1.5.1.1	Lichtstrommethode	111
1.5.1.2	Lichtstärkemethode	117
1.5.2	Berechnung von Raumbeleuchtungsstärken	128
1.5.2.1	Mittlere räumliche Beleuchtungsstärke (sphärische Beleuchtungsstärke) E_s	128
1.5.2.2	Halbsphärische Beleuchtungsstärke E_{hs}	128
1.5.2.3	Raumbeleuchtungsstärke E_0	128
1.5.2.4	Zylindrische Beleuchtungsstärke E_z	129
1.5.2.5	Halbzylindrische Beleuchtungsstärke E_{hz}	130
1.5.3	Berechnung der Leuchtdichte	131
1.5.3.1	Leuchtdichteberechnung der Raumbegrenzungsflächen im Innenraum	131
1.5.3.2	Leuchtdichte bei der Blendungsberechnung im Innenraum	131
1.5.3.3	Leuchtdichte in der Außenbeleuchtung	132
1.5.3.4	Gegenüberstellung von Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichteberechnung	133
1.5.3.5	Festlegungen zur Beobachtungsgeometrie	134
1.5.3.6	Ermittlung und Darstellung der Leuchtdichtekoeffizienten	137
1.5.3.7	Kennzeichnung und Klassifizierung des Leuchtdichtequotienten für Straßendeckschichten	139
1.5.3.8	Bestimmung der Leuchtdichtekoeffizienten	144
1.5.3.9	Punktleuchtdichten	144
1.5.3.10	Mittlere Leuchtdichte	145
1.5.3.11	Leuchtdichtegleichmäßigkeit	145
1.5.3.12	Leuchtdichteberechnungen bei Lichtimmissionen	146
1.5.4	Lichtberechnungsprogramme	147
1.5.4.1	Rechenalgorithmen	148
1.5.4.2	Wirkungsgradmethode	149
1.5.4.3	Punkt-zu-Punkt-Verfahren	151
1.5.4.4	Rechengenauigkeiten und Toleranzen	151
1.5.4.5	Darstellung der Berechnungsergebnisse in Innenraumbereich	153
1.5.4.6	Darstellung der Berechnungsergebnisse in Außenraumbereich	155
1.5.4.7	Raytracing-Verfahren	156
1.5.4.8	Lichtplanungsprogramme: Relux Desktop, DIALux evo, sowie weitere Programme	157
1.5.4.9	Echtzeit-Lichtsimulationsprogramme	159
1.5.4.10	Virtual Reality	160
1.5.4.11	Building Information Modelling	161

1.6	Lichttechnische Messungen	163
1.6.1	Messung fotometrischer Größen	163
1.6.1.1	Grundlagen	163
1.6.1.2	Messprinzipien und Geräte	174
1.6.2	Messungen an Lampen und Leuchten	187
1.6.3	Messung an LED-Leuchten	189
1.6.3.1	Grundlegendes	189
1.6.3.2	Einflussgrößen bei der Messung	190
1.6.3.3	Richtlinien für die Messtechnik an LED-Quellen	191
1.6.4	Messunsicherheiten	191
1.6.5	Messung an Beleuchtungsanlagen	195
1.6.5.1	Innenraumbelichtung	196
1.6.5.2	Außenbeleuchtung	199
2	Lichtquellen und Zubehör	205
2.1	Lampen	205
2.1.1	Übersicht zur Lichterzeugung	205
2.1.2	Glühlampen	207
2.1.3	Halogenglühlampen	210
2.1.4	Leuchtstofflampen	212
2.1.4.1	Leuchtstofflampen mit den Durchmessern 38 mm (T12) und 26 mm (T8)	213
2.1.4.2	Leuchtstofflampen mit 16 mm Durchmesser (T5)	216
2.1.4.3	Leuchtstofflampen mit 7 mm Durchmesser (T2)	217
2.1.5	Kompaktleuchtstofflampen	217
2.1.5.1	Kompaktleuchtstofflampen mit Stecksockel	219
2.1.5.2	Kompaktleuchtstofflampen mit Schraubsockel	220
2.1.6	Induktionslampen	221
2.1.7	Natriumdampf-Niederdrucklampen	221
2.1.8	Hochdruck-Entladungslampen	222
2.1.8.1	Quecksilberdampf-Hochdrucklampen	222
2.1.8.2	Natriumdampf-Hochdrucklampen	224
2.1.8.3	Halogen-Metaldampflampen	226
2.1.9	LED-Lampen (Retrofitlampen)	230
2.1.10	Allgemeine Eigenschaften und Kennwerte von Lampen	234
2.1.10.1	Brennstellung	234
2.1.10.2	Lebensdauer	234
2.1.10.3	Farbeigenschaften	237
2.1.10.4	Ausbleichen von Materialien	238
2.1.10.5	Energiebilanz	241
2.1.10.6	Lampenbezeichnungssysteme	241
2.1.11	Richtlinien der EU	243
2.1.11.1	Richtlinien und Verordnungen zum Ökodesign	243
2.1.11.2	Elektro- und Elektronik-Altgeräte (WEEE)	244
2.1.11.3	Stoffverbotsrichtlinie (RoHS)	245
2.2	Betriebsmittel für Niedervolt-Halogenglühlampen	245
2.2.1	Elektromagnetische Transformatoren	245
2.2.2	Elektronische Transformatoren	247
2.3	Betriebsmittel für Entladungslampen	250
2.3.1	Elektromagnetische Vorschaltgeräte	250
2.3.1.1	Aufbau	250
2.3.1.2	Effizienzanforderungen an Vorschaltgeräte für Leuchtstofflampen	253
2.3.2	Starter	254
2.3.3	Elektromagnetische Vorschaltgeräte für die Leistungsreduzierung	255
2.3.4	Zündgeräte	256
2.3.5	Kondensatoren für die Parallelkompensation	258
2.4	Elektronische Vorschaltgeräte	258
2.4.1	Allgemeine Merkmale und Eigenschaften	259
2.4.2	Nicht dimmbare EVGs	260

2.4.2.1	Nicht dimmbare EVGs für Leuchtstofflampen und Kompaktleuchtstofflampen	260
2.4.2.2	Nicht dimmbare EVGs für Hochdruck-Entladungslampen	263
2.4.3	Dimmbare EVGs	264
2.4.3.1	Dimmbare EVGs für Leuchtstofflampen und Kompaktleuchtstofflampen	264
2.4.3.2	Dimmbare EVGs für Hochdruck-Entladungslampen	270
2.4.4	Normen für EVGs	270
2.5	Anorganische und organische Leuchtdioden	270
2.5.1	Physikalisches Prinzip, Bändermodell	271
2.5.2	Farbiges und weißes LED-Licht, Spektren	274
2.5.3	Packaging, thermische Aspekte des LED-Aufbaus	278
2.5.4	Elektrisches und thermisches Betriebsverhalten	281
2.5.4.1	Erfassung der Änderung der fotometrischen und elektrischen Kenngrößen weißer LEDs	282
2.5.4.2	Erfassung der Änderung der farbmetrischen Kenngrößen weißer LEDs	284
2.5.5	Spektrale und farbmetrische Eigenschaften	287
2.5.5.1	Weißer LEDs von 2700 K bis 3000 K	288
2.5.5.2	Weißer LEDs von 4000 K bis 4800 K	291
2.5.5.3	Melanopische Wirksamkeit weißer LEDs von 2700 K bis 6500 K	292
2.5.6	Alterung, Lebensdauer	293
2.5.6.1	Alterungsaufbau und LED-Auswahl	293
2.5.6.2	Datenauswertung und Ergebnisse	293
2.5.6.3	Fehlermechanismen und Analyse	295
2.5.7	Dimmverfahren für anorganische Leuchtdioden und lichttechnische Aspekte	297
2.5.8	Physikalische Erzeugungsprinzipien von organischen Leuchtdioden	300
2.5.9	Lichttechnische und elektrische Eigenschaften von organischen Leuchtdioden	302
2.6	Betriebsmittel für Leuchtdioden	305
2.6.1	Betriebsgeräte	306
2.6.2	Steuergeräte	310
3	Leuchten	311
3.1	Lichttechnische Anforderungen an Leuchten	311
3.1.1	Leuchtenanforderungen	311
3.1.2	Lichttechnische Leuchteneinteilung und -kennziffern	313
3.1.3	Ermittlung des Leuchtenlichtstroms für Leuchten mit Lampen- oder LED-Bestückung	315
3.2	Lebensdauer von Leuchten	315
3.2.1	Lebensdauer von Leuchten mit konventioneller Bestückung	316
3.2.2	Lebensdauer von Leuchten mit LED-Bestückung	316
3.2.2.1	Spezielle Einflussfaktoren auf die wirtschaftliche Nutzlebensdauer von LED-Leuchten	317
3.2.2.2	Lebensdauerdefinition von LED-Leuchten (LxBy, LxCy etc.)	318
3.3	Elemente der Lichtlenkung	319
3.3.1	Reflektoren	321
3.3.1.1	Reflektoren mit spiegelnder Reflexion	321
3.3.1.2	Spiegelreflektoren für LED	325
3.3.1.3	Reflektoren mit diffuser Reflexion	326
3.3.2	Transmittoren aus klaren Materialien (Refraktoren)	328
3.3.2.1	LED-Linsen	328
3.3.2.2	Miniaturisierte Optik	329
3.3.2.3	Mikrooptik	330
3.3.3	Schatter	330
3.3.4	Transmittoren mit diffuser Transmission	331
3.3.5	Kombinationen von spiegelnden Reflektoren und klaren Transmittoren (Hybridoptik)	333
3.3.6	Kombinationen von diffusen Reflektoren und Transmittoren	333
3.3.7	Wellenoptische Elemente der Lichtmodellierung	334
3.3.8	Lichtleiter	335
3.4	Prinzipien des Leuchtaufbaus	337
3.4.1	Innen- und Außenleuchten mit konventioneller Bestückung	337
3.4.1.1	Scheinwerfer	337
3.4.1.2	Konzentratoren	338

3.4.1.3	Projektoren	338
3.4.1.4	Mikroskopbeleuchtung	339
3.4.1.5	Lichtsignale	340
3.4.1.6	Konventionelle Leuchten mit LED-Retrofit-Lampen	341
3.4.2	Innen- und Außenleuchten mit integrierter LED Bestückung	342
3.5	Mechanische und elektrische Ausführung von Leuchten	343
3.5.1	Schutzklassen	343
3.5.2	Schutzarten	343
3.5.3	Brandschutzkennzeichnung an Leuchten	345
3.5.4	Kennzeichnung der elektromagnetischen Verträglichkeit an Leuchten	346
3.5.5	Weitere Kennzeichnungen an Leuchten	346
3.6	Thermomanagement von LED-Leuchten	347
3.6.1	Wärmeübertragung	347
3.6.2	Wärmepfad durch die Leuchte	351
3.7	Leuchtausführungen	354
3.7.1	Leuchten für den Innenraum	354
3.7.1.1	Lineare und Flächenleuchten	355
3.7.1.2	Downlights	362
3.7.1.3	Arbeitsplatzleuchten	363
3.7.1.4	Strahlerleuchten	363
3.7.1.5	Hochleistungsleuchten	365
3.7.1.6	Funktionale Lichtlinien	366
3.7.1.7	Sicherheitsleuchten	367
3.7.1.8	Leuchten mit Lichtleitertechnik	367
3.7.2	Leuchten für den Außenraum	370
3.7.2.1	Straßenleuchten	370
3.7.2.2	Scheinwerfer	372
4	Lichtsteuerung, Regelung und Management	375
4.1	Anforderungen und Anwendungen	375
4.2	Steuerung und Regelung	376
4.2.1	Datennetzwerke	378
4.3	Analoge drahtgebundene Schnittstellen	383
4.3.1	Schnittstelle Schalter, Taster, Relais und Schütz	383
4.3.1.1	Schnittstelle Dimmer	384
4.3.2	Analoge Schnittstelle 1–10V und 0–10V (Drahtgebunden)	386
4.3.3	Touch-and-Dim-Schnittstelle	387
4.4	Drahtgebundene Digitale Schnittstellen	388
4.4.1	Digitale Schnittstelle DSI, DALI und DALI 2	388
4.4.2	Digitale Schnittstelle DMX 512	391
4.4.3	Digitale Schnittstelle Powerline	393
4.4.4	Digitale Schnittstelle Ethernet und Power Over Ethernet PoE	394
4.5	Drahtlose Schnittstellen	396
4.5.1	Bluetooth	401
4.5.2	Zigbee	409
4.5.3	Multi-Protokoll Zigbee 3.0 + Bluetooth Low Energy	416
4.5.4	W-LAN/Wi-Fi	417
4.5.5	Proprietäre Funkschnittstellen	423
4.6	Optische drahtlose Kommunikation	425
4.7	Industrial Ethernet, Feldbus und Gebäudemanagement	432
4.7.1	KNX in der Gebäudetechnik	437
4.7.2	Weitere Netzwerke der Gebäudetechnik	438
4.8	Sensorik und Anwendungen	439
4.9	Konzepte für Steuerungen	442

5	Beleuchtung mit Tageslicht	445
5.1	Allgemeine Gesichtspunkte	445
5.2	Meteorologische Grundlagen	447
5.3	Anforderungen an Fenster aus psychologischer Sicht	455
5.4	Anforderungen an die funktionelle Beleuchtung mit Tageslicht	456
5.5	Tageslichttechnische Begriffe	456
5.6	Tageslichttechnische Grundlagen	462
5.7	Berechnung	464
5.7.1	Berechnung des Tageslichtquotienten D bei seitlicher Fensteranordnung	464
5.7.2	Berechnung des mittleren Tageslichtquotienten \bar{D}_{OL} bei Räumen mit Oberlicht	467
5.8	Tageslichtlenksysteme, Sonnen- und Blendschutz	469
5.9	Anmerkungen zur Tageslichtplanung	472
5.10	Kombination von Tageslichtbeleuchtung und Beleuchtung mit elektrischem Licht	474
6	Beleuchtungsanlagen im Innenraum	476
6.1	Anforderungen, Kriterien und Kenngrößen	476
6.1.1	Anforderungen an die Beleuchtungsanlage	477
6.1.2	Kriterien der Beleuchtung	477
6.1.3	Kenngrößen	478
6.1.3.1	Beleuchtungsstärke	478
6.1.3.2	Leuchtdichte	479
6.1.3.3	Blendung	479
6.1.3.4	Farbe	480
6.1.3.5	Lichtrichtung und Schattigkeit	481
6.1.3.6	Flimmern	482
6.1.3.7	Kontrastwiedergabefaktor	483
6.2	Richtlinien	483
6.2.1	Arbeitsplätze im Innenraum	483
6.2.2	Not- und Sicherheitsbeleuchtung	484
6.3	Kombination von Tageslichtbeleuchtung und Beleuchtung mit künstlichem Licht	484
6.4	Planung	486
6.4.1	Planungsablauf	486
6.4.2	Beleuchtungskonzepte	488
6.4.3	Beleuchtungsarten	489
6.4.3.1	Direktbeleuchtung	489
6.4.3.2	Direkt-Indirektbeleuchtung	489
6.4.3.3	Indirekte Allgemeinbeleuchtung	490
6.4.3.4	Weitere Beleuchtungskonzepte	491
6.4.4	Lichtberechnungsmethoden	491
6.4.4.1	Radiosity	491
6.4.4.2	Backward Raytracing	493
6.5	Wirtschaftlichkeit, Umwelt, Energieeffizienz	495
6.5.1	Wirtschaftlichkeit von Beleuchtungsanlagen	495
6.5.1.1	Simple-Payback-Methode	496
6.5.1.2	Life-Cycle-Cost-Methode	496
6.5.1.3	Berechnungsbeispiel	497
6.5.2	Umweltverträglichkeit von Beleuchtungsanlagen	498
6.5.3	Energieeffizienz von Beleuchtungsanlagen	499
6.6	Weitere Gebiete	500
6.6.1	Dynamische Beleuchtung	500
6.6.2	Wahrnehmungsbasierte Planung nach Cuttle	501
6.6.3	Lichtqualität	502

7	Beleuchtungssysteme im Außenraum	504
7.1	Anforderungen, Güteigenschaften und Kenngrößen	504
7.1.1	Güteigenschaften	504
7.1.1.1	Leuchtdichte L_v	504
7.1.1.2	Visibility Level	506
7.1.1.3	Beleuchtungsstärke	507
7.1.1.4	Gleichmäßigkeit	508
7.1.1.5	Randbeleuchtungsstärkeverhältnis EIR	509
7.1.1.6	Blendung f_{TI} , G, D, GR, RG	509
7.1.2	Begriffe und Definitionen	512
7.1.3	Normen und Richtlinien	514
7.1.3.1	Straßenbeleuchtung	514
7.1.3.2	Tunnelbeleuchtung	515
7.1.3.3	Arbeitsplätze im Außenraum	515
7.1.3.4	Nicht überdachte Sportstätten	516
7.1.3.5	Architekturbeleuchtung	516
7.2	Planung	516
7.2.1	Planungsablauf	516
7.2.2	Allgemeines zur Lichtplanung	517
7.2.2.1	Wirkungsgradverfahren zur Lichtstromermittlung	517
7.2.2.2	Fahrbahnbelag	518
7.2.2.3	Optische Führung	519
7.2.2.4	Lichtgestaltung und Modellierung	519
7.2.3	Straßenbeleuchtung	519
7.2.3.1	Auswahl der Beleuchtungsklassen	520
7.2.3.2	M-Klassen	520
7.2.3.3	P-Klassen	520
7.2.3.4	C-Klassen	521
7.2.3.5	Platzierung von Leuchten in der Straßenbeleuchtung	521
7.2.3.6	Fußgängerüberwege und Fußgängerquerungshilfen	524
7.2.4	Tunnelbeleuchtung	525
7.2.4.1	Kurze Tunnel und Unterführungen	525
7.2.4.2	Lange Tunnel	526
7.2.5	Arbeitsplätze im Außenraum	528
7.2.5.1	Besonderheiten	528
7.2.5.2	Beleuchtung von Werksstraßen	530
7.2.5.3	Beleuchtung von Lagerplätzen	530
7.2.5.4	Beleuchtung von Parkplätzen	530
7.2.6	Nicht überdachte Sportstätten	530
7.2.6.1	Fußballplätze	531
7.2.6.2	Tennisplätze	531
7.2.7	Architekturbeleuchtung	533
7.2.7.1	Anstrahlungen	533
7.2.7.2	Masterplan	534
7.3	Nachhaltige Beleuchtung	535
8	Anhang	536
8.1	Anhang Formelzeichen	536
8.2	Messprotoll Beispiel	538
8.3	Lichtströme von Lichtquellen	540
8.4	DMX-Adressen und -Anschluss	541
8.5	Kabelhinweis	543
	Literatur	545
	Autoren	564
	Bildquellen	568
	Register	569

1 Grundlagen

AUTOREN: MEIKE BARFUSS, DIRK SEIFERT

1.1 Einleitung

„Die Beleuchtung, die natürliche wie auch die künstliche, ist so sehr ein Teil unseres täglichen Lebens, dass sie bedauerlicherweise immer als selbstverständlich angesehen wird. Und weil sie so leicht zu benutzen und zu handhaben ist, wird die Verantwortung für ihre Anwendung in der überwiegenden Zahl der Fälle bereitwillig und mit Freuden von denjenigen übernommen, die weder die erforderliche Ausbildung noch die entsprechende Erfahrung haben“ [1.1].

Diese Äußerung eines Lichtberaters unterstreicht die Feststellung, dass auch auf dem Gebiet der Beleuchtungstechnik gute und richtige Lösungen nur von denen erzielt werden können, die über ein solides Fachwissen und eine ausreichende Erfahrung verfügen. Es ist das Anliegen dieses Buches, dieses Fachwissen und diese Erfahrung zu vermitteln.

Künstliches Licht ist für den Menschen heute eine Selbstverständlichkeit. Man kann sich nicht mehr vorstellen, ohne elektrische Lichtquellen auszukommen. Dabei liegt die Zeit noch gar nicht so weit zurück, in der man als einzige künstliche Lichtquelle den Kienspan kannte. Diese frei brennende, infolge der Luftbewegung stets flackernde Lichtquelle konnte nur zu einer Orientierung im Raum dienen. Auch als es gelang, Öle und Fette für Lichtquellen zu benutzen, änderte sich an dieser Situation nichts. Die Begriffe „Beleuchtung“ oder gar „Beleuchtungstechnik“ lassen sich auf diese Zeit nicht anwenden. Die Menschheit hat die letzten Jahrtausende als künstliches Licht das Feuer genutzt. Hochkulturen mit genügend Ölpflanzen und Fetten wie im Altertum die Griechen oder Römer, die Kulturen im arabischen Raum und Hochkulturen in Asien bzw. Mittelamerika konnten sich auch dank der Möglichkeit der Beleuchtung mit entsprechenden Öllampen vor Tausenden von Jahren besser entwickeln. Manufaktuell hergestellte Leuchten aus Keramik oder Metall für Öl mit Dochten aus Pflanzenfasern sind Belege dieser Zeit [1.2]. Desweiteren ist zu bedenken, dass noch in den 1970er Jahren erst ca. ein Drittel der Menschheit elektrische Beleuchtung hatte – und auch heute sind noch immer einige Regionen der Welt ohne elektrisches Licht.



Bild 1.1 Repliken altertümlicher Öllampen im Lichtmuseum Arnsberg und im Landesmuseum für Vorgeschichte in Halle (Saale) – manufaktuell gefertigt – Begleiter über Jahrtausende (Fotos: Seifert)

Als man vor etwa 200 Jahren die Petroleumlampe erfand, die etwas später einen Glaszylinder und einen Runddocht als Brenner erhielt, konnte nur von einer bescheidenen Raumaufhellung gesprochen werden. Für die Tätigkeiten, die zur Befriedigung der noch sehr niedrigen Lebensansprüche der Menschen notwendig waren, reichte das Tageslicht ja auch völlig aus.

Das änderte sich im 19. Jahrhundert, als die ersten Betriebe zu einer industriellen Fertigung übergingen. Die Inhaber dieser Betriebe versuchten den Arbeitstag zu verlängern, um einen möglichst hohen Gewinn zu erzielen. So mussten die Menschen zwölf bis sechzehn Stunden täglich zum Teil bei der völlig unzureichenden Petroleumbeleuchtung arbeiten. Dabei zeigte sich, dass bei dieser Beleuchtung nur grobe Arbeiten möglich waren, und man erkannte bereits damals, dass für Arbeiten mit höheren Sehanforderungen eine größere Helligkeit erforderlich ist.

Die in diese Zeit fallende Nutzbarmachung des Steinkohlengases führte zur Gasbeleuchtung. Nun war es möglich, von einer zentralen Stelle aus eine größere Anzahl Lampen gleichzeitig zu betreiben, jedoch ergaben die flachen Schnittbrenner, auch wenn sie eine Glasglocke als Windschutz trugen, noch eine sehr trübe Beleuchtung und konnten kaum mit der transportablen Petroleumlampe mit Runddocht und Zylinder konkurrieren. Der entscheidende Schritt zu einer wesentlichen Verbesserung des Gaslichtes wurde erst 1886 mit der Erfindung des Glühstrumpfes durch AUER VON WELSBACH getan. Damit begann der Siegeszug des Gaslichtes zur Beleuchtung von Industriebauten, Wohnungen und Straßen.

In die gleiche Zeit fallen auch zwei Erfindungen der Elektrotechnik, die der Beleuchtungstechnik große Möglichkeiten eröffneten. Ab 1801 gab es Versuche von HUMPHREY DAVY und anderen mit Kohle-Lichtbogen Entladungen, elektrisch erhitzten Platindrähten sowie Kohlestäben an Voltaschen Batterien. Mit der Entdeckung des elektrodynamischen Prinzips um 1860 durch WERNER VON SIEMENS war die Möglichkeit gegeben, Energieerzeugungsanlagen zu bauen und die elektrische Energie von einer Zentrale aus über beliebige Entfernungen zu übertragen. Die zweite Erfindung war die elektrische Glühlampe, wobei sich der Legende nach der Deutsche HEINRICH GOEBEL und der Amerikaner THOMAS ALVA EDISON den Erfinderruhm teilten, obwohl viele andere in dieser Zeit wie A. N. LODYGIN, J. W. SWAN oder I. ADAMS mit dem Prinzip Glühlampe experimentierten. GOEBEL hat zwar als erster einen verkohlten Bambusfaden in ein evakuiertes Glasgefäß eingeschmolzen und durch elektrischen Strom zum Glühen gebracht (1854), aber es war EDISON, der dieses Prinzip so weit vollkommnete, dass es praktisch angewandt werden konnte (1881). Die erste große Anlage errichtete EDISON für die Weltausstellung in Paris im Jahr 1889. Sie fand große Bewunderung und hat viel dazu beigetragen, dass die industrielle Fertigung von Glühlampen aufgenommen wurde, und man bemühte sich, die geringe Lichtausbeute der Glühlampen zu erhöhen. Die Entwicklung unterschiedlicher, zum Teil hocheffizienter Entladungslampen im 19. und 20. Jahrhundert ermöglichte effizienteres Licht. Die erste Nutzung von weißen LED ab ca. 2003, ab 2011 die Experimente zur Raumbelichtung mit OLED oder die Ideen zu einer effizienteren neuen Glühlampe 2015 sind weitere Schritte der technischen Entwicklung.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts machte man auf dem Gebiet der Augenheilkunde große Fortschritte. v. HELMHOLTZ, v. KRIES, KÖNIG und BRODHUN, um nur einige deutsche Forscher zu nennen, untersuchten die Beziehungen zwischen Licht und Gesichtssinn. BRODHUN und KÖNIG fanden damals die Abhängigkeit der Unterschiedsempfindlichkeit des menschlichen Auges von der dargebotenen Leuchtdichte, eine Grundtatsache der wissenschaftlichen Beleuchtungstechnik. Man erkannte, dass es nicht nur auf ein möglichst hohes Lichtniveau ankam, sondern dass man an eine Beleuchtungsanlage komplexere Güteanforderungen stellen muss, um wirklich gut sehen zu können. Damit war klar, dass die Beleuchtungstechnik nicht auf die Lichterzeugungstechnik beschränkt werden kann, sondern dass auch die physiologischen Vorgänge im menschlichen Auge berücksichtigt werden müssen.

Bereits 1926 wies TEICHMÜLLER darauf hin, dass auch diese beiden Wissensgebiete nicht genügen, da die Wahrnehmung der Umwelt ein psychologischer Vorgang ist. So entwickelte sich die Lichttechnik zu einer Wissenschaft, die physikalische, physiologische und psychologische Kenntnisse und deren Zusammenhänge umfasst. Auf der Grundlage dieser Erkenntnisse erkannte REEB bereits in den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts, dass nicht die Beleuchtungsstärke die entscheidende Größe für die Sehbedingungen ist, sondern die Leuchtdichte [1.3], [1.4], [1.5].

Wenn man die Zeitspanne zwischen der Erfindung des Gasglühlichtes und der Erfindung der Gasentladungslampen als die „Zeit der Lichterzeugungstechnik“ charakterisieren würde und den Zeitraum von 1925 bis 1950 als die „Zeit der Beleuchtungsstärketechnik“, so könnte man heute von der „Zeit der Leuchtdichtetechnik“ sprechen, einer Gestaltung der Helligkeiten von Oberflächen im Sichtfeld. Das Zeitalter der LED Technik hat

um 2010 sehr rasant begonnen. Damit ergeben sich heute neue technische und gestalterische Herausforderungen. LED können je nach Bauart farbiges oder weisses Licht sehr effizient abgeben. Lichttechnisch sind es kleine optische Elemente, die eine sinnvolle Optik- und Leuchtengestaltung erfordern. Die verschiedenen Schnittstellen spielen besonders mit moderner LED Beleuchtungstechnik und den dazu gehörenden zum Teil in ihren Funktionalitäten programmierbaren Vorschaltgeräten eine wichtige Rolle. Neue Begriffe – wie NFC (Near Field Communication an Vorschaltgeräten), das IoT (Internet of Things), VLC (Visible Light Communication), OWC (Optical Wireless Communication), IPS (Indoor Positioning System), LiFi (Light Fidelity), PoE (Power over Ethernet, also Stromversorgung über Ethernet), SR (Sensor Ready – Schnittstelle am Vorschaltgerät) zeigen eine deutliche Weiterentwicklung der Lichttechnik. Die Lichtsteuerung und Sensortechnik, die auch in die moderne Lichttechnik integriert werden, ermöglichen interessante Zusatzfunktionen von Leuchten bis hin zur Funktion als „Datensammler“ für die Gebäudetechnik oder die Straßenbeleuchtung. Für die Straßenbeleuchtung hat man einen gangbaren Weg gefunden, die Leuchtdichte unmittelbar als Planungsparameter einzuführen. Die Möglichkeit der direkten Berechnung ist wegen der überschaubaren Anzahl der Parameter und durch die moderne Rechentechnik gegeben. Bei der Innenraumbeleuchtung mit den vielen Varianten der Beleuchtungsmöglichkeiten wird die Leuchtdichte indirekt als Güteparameter eingeführt. Grundlage hierfür ist in erster Linie die Bestimmung der Kontrastverhältnisse am Arbeitsplatz, wofür in jüngster Zeit gangbare Wege der Bewertung ausgearbeitet worden sind. Außerdem ist man bemüht, zusätzliche Gütefaktoren zu definieren, die mit den Leuchtdichteverhältnissen im Gesichtsfeld zusammenhängen, um damit dem Beleuchtungsplaner bessere Möglichkeiten für die Umweltgestaltung in Arbeitsräumen an die Hand zu geben. Die Beziehungen des Menschen zu seiner Umwelt können nicht ausschließlich auf die Sehbedingungen, das Problem Licht – Farbe – Raum, reduziert werden, sondern müssen auch tangierende Faktoren einschließen, wie Raumklima und Lärm. Vor allem müssen in verstärktem Maße psychologische Aspekte beachtet werden. Viele Untersuchungen haben bereits zu einer besseren Kennzeichnung der Güte Merkmale von Beleuchtungsanlagen geführt. Sie brachten auch die Erkenntnis, dass eine gute Beleuchtung ein wesentlicher wirtschaftlicher Faktor ist. Durch gute Beleuchtung am Arbeitsplatz und im Arbeitsraum können die Arbeitsproduktivität gesteigert und die Unfallhäufigkeit verringert werden. Darüber hinaus ist gute Beleuchtung entscheidend für das Wohlbefinden des Menschen in seiner Umgebung und erhöht seine Leistungsbereitschaft, werden doch mehr als drei Viertel aller Empfindungen aus der Umwelt dem Menschen über den Gesichtssinn vermittelt. Mit höheren Beleuchtungsstärkewerten sind aber auch – bei Beibehaltung der Technologie – ein erhöhter Energieaufwand und Mehrkosten für die Errichtung der Beleuchtungsanlage und deren Betrieb verbunden. Deshalb muss eine Arbeitsbeleuchtung sowohl nach den besten Sehbedingungen als auch nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten geplant und ausgeführt werden.

Besonders die dramatische weltweite Energieverknappung Anfang bis Mitte der 70er Jahre des 20. Jahrhunderts und die damit einhergehende drastische Energieverteuerung in den Folgejahren zwangen die Beleuchtungstechniker insofern zum Umdenken, als dass Überlegungen angestellt werden mussten, den Anteil des Energieverbrauchs für die Beleuchtung zu senken bzw. nicht proportional mit der Erhöhung des Gesamtverbrauchs an Energie wachsen zu lassen. Dazu ist der Einsatz von Lampen mit hoher Lichtausbeute ein probates Mittel.

Jahr	Brutto Stromverbrauch in Mrd kWh
1990	550,7
1995	541,6
2000	579,6
2005	614,1
2010	615,4
2015	600,0
2018	599,0

Tabelle 1.1 Brutto Stromverbrauch in Deutschland (Quelle: AGEB)

Der gesamte Stromverbrauch liegt in den letzten Jahren in Deutschland um 600 Mrd kWh pro Jahr. Die Konstanz bzw. geringfügige Absenkung gegenüber den Vorjahren ist durch Einsparmaßnahmen auch bei der Beleuchtung erzielt worden (siehe **Tabelle 1.1**) [1.6a], [1.6b].

Für Beleuchtungszwecke werden in Deutschland ca. 13 % der elektrischen Energie verbraucht. Dies entspricht knapp 3 % des gesamten Verbrauchs an Endenergie, der auch die Energie für Wärme, mechanische Energie, usw. umfasst. Bei der Beleuchtung wird hauptsächlich Elektroenergie eingesetzt.

Die Verteilung der für die Beleuchtung im Jahr 2017 aufgewendeten Elektroenergie auf verschiedene Anwendungsbereiche zeigt als Beispiel **Tabelle 1.2**. In den Jahren davor lag der Anteil der Beleuchtung zum Teil noch deutlich höher.

Bereich	Anteil Elektroenergieverbrauch in %
Industrie	3,9
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	32,4
Haushalte	8,1
Verkehr	5,1

Tabelle 1.2 Struktur des Stromverbrauchs in Deutschland 2017 – Anteil der Energie für Beleuchtung in Prozent des gesamten Elektroenergieverbrauchs des jeweiligen Bereiches (Quelle: AGEB)

Die Energieausnutzung bei den unterschiedlichen Lichtquellen wird beispielhaft in **Tabelle 1.3** gezeigt. Durch den Einsatz wirtschaftlicher Lichtquellen mit hoher Lichtausbeute wie Entladungslampen oder LED werden Energieeinsparungen bei der Beleuchtung erreicht.

Lampentyp	Jahr der Einführung	Lichtausbeute lm/W
Glühlampen		
Allgebrauchslampen	1906	bis 18
Halogenglühlampen	1958	bis 23
Entladungslampen		
Quecksilberdampf-Hochdrucklampen	1932	bis 60
Halogen-Metaldampflampen	1964	bis 120
Natriumdampf-Hochdrucklampen	1965	bis 150
Leuchtstofflampen	1938	bis 104
Kompaktleuchtstofflampen	1980	bis 85
Natriumdampf-Niederdrucklampen	1932	bis 200
Elektrolumineszenz (Systeme)		
Weißer Hochleistungs-LED	2010	bis 180
OLED	2012	bis 80

Tabelle 1.3 Energieausnutzung bei den Lampen nach Lampentyp

Die stärkere Beachtung des ökologischen Aspekts bei der Stromnutzung, aber auch der notwendige Sparzwang bei den Kommunen und anderen Betreibern von Beleuchtungsanlagen führen zwangsläufig zum Einsatz energiesparender Beleuchtungstechnik. Vielfach gibt es ökonomische Ansätze, die Investitionen für energiesparende Beleuchtungsanlagen durch die erzielte Energieeinsparung aufzubringen; in einigen Ländern wird diese Vorgehensweise sogar staatlich gefördert, z. B. in Deutschland oder den Niederlanden.

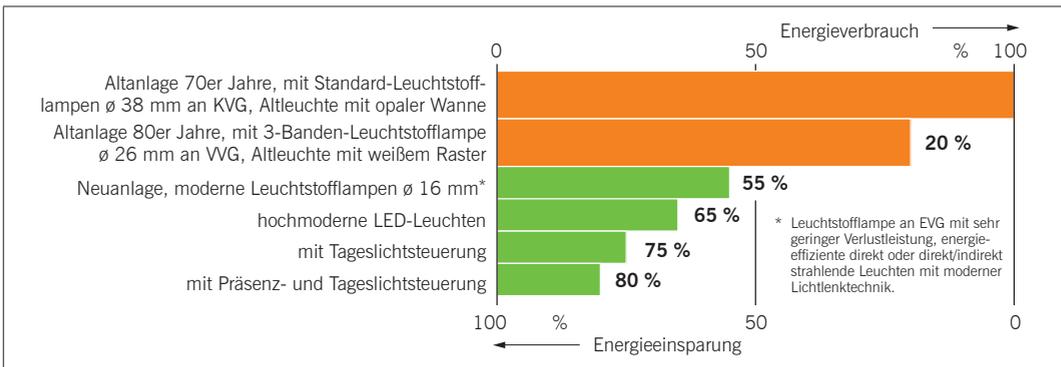


Bild 1.2 Sparpotentiale Innenbeleuchtung (Quelle: Fördergemeinschaft Gutes Licht Licht.de Lichtwissen 20 2014)

Eine energiesparende Beleuchtung ist nicht allein durch den Einsatz von Lampen mit höherer Lichtausbeute zu erreichen. Auch der Einsatz elektronischer Vorschaltgeräte (EVG) und hochwertiger Lichttechnik sowie eine tageslicht- und anwesenheitsabhängige Steuerung der Beleuchtungsanlagen tragen wesentlich dazu bei. Eine mögliche Senkung des Energieaufwands durch die Anwendung moderner Beleuchtungstechnologien zeigt **Bild 1.2**. Wenn man die LED-Technologie einsetzt sowie das System nutzungs- und helligkeitsabhängig steuert, sind heute zusätzliche Reduktionen des Energiebedarfes auf unter 20 % im Vergleich zur herkömmlichen Standard-Leuchtstofflampe mit konventionellen magnetischen Vorschaltgeräten möglich [1.7], [1.8].

1.2 Lichttechnische und optische Grundlagen

AUTOR: STEPHAN VÖLKER

1.2.1 Das Wesen des Lichtes

Beschäftigt man sich mit Licht, stellt sich zunächst die Frage: Was versteht man unter Licht? Im allgemeinen Sprachgebrauch wird das Wort *Licht* mit unterschiedlichen Begriffen in Verbindung gebracht: Energie, Welle, Farbe, Teilchen, Erlösung, Sonne, Erkenntnis, elektromagnetische Strahlung, etc.

Da die Lichttechnik eine Wissenschaftsdisziplin ist, die sowohl physikalische Gesetze als auch physiologische Regeln nutzt, definiert sie Licht wie folgt:

» **Licht ist elektromagnetische Strahlung, die beim Menschen unmittelbar eine visuelle Empfindung oder Wahrnehmung hervorrufen kann.¹**

Mit dieser Definition wird deutlich, dass Licht einerseits physikalischen Ursprungs ist, seine Wirkung aber nur im Zusammenhang mit den Sinneszellen des Auges beschreibbar ist. Der Physiologie ist daher in diesem Buch ein eigenes Kapitel gewidmet. An dieser Stelle soll zunächst auf die physikalische Beschreibung des Lichtes eingegangen werden. Physikalische Strahlungsgrößen werden im Folgenden mit dem Index e gekennzeichnet, die äquivalenten lichttechnischen Größen werden dagegen ohne diesen Index verwendet. (Beispiel: Φ_e = Strahlungsleistung (in Watt), Φ = Lichtstrom (in Lumen))

1.2.2 Licht als spektrale und integrale Größe

In der Regel enthält Licht verschiedene Wellenlängen. Die Verteilung der Strahlung auf die einzelnen Wellenlängengebiete nennt man *Spektrum* (**Bild 1.3**). Man unterscheidet bei dieser Betrachtung integrale und spektrale Größen.

¹ Genauer versteht man in der Lichttechnik unter dem Begriff „Licht“ auch die mit der in Bild 1.5 dargestellten spektralen Hellempfindlichkeit des Menschen $V(\lambda)$ gewichtete elektromagnetische Strahlung (z. B. Lichtstrom, Lichtstärke).

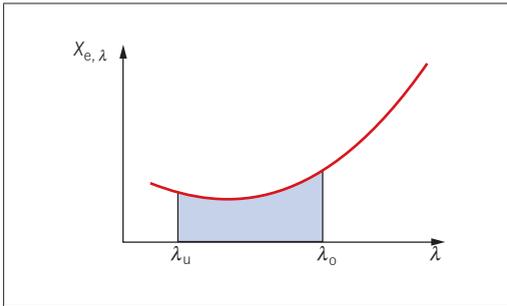


Bild 1.3 Rote Kurve: Spektrale Größen ($X_{e,\lambda}$) und blau unterlegte Fläche: Integrale Größe (X_e) (Quelle: Baer)

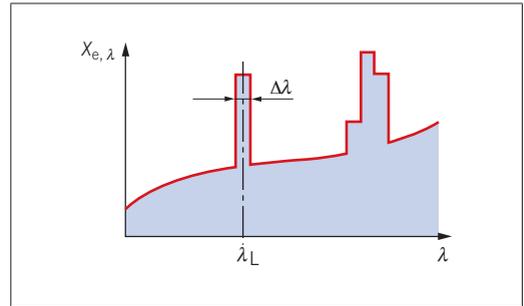


Bild 1.4 Spektrale Darstellung eines kontinuierlichen Spektrums mit überlagerten Spektrallinien (Quelle: Baer)

$\Delta\lambda$ Wellenlängenintervall (nach Vereinbarung);
 λ_L Schwerpunktwellenlänge der Spektrallinie

Unter einer spektralen Strahlungsgröße $X_{e,\lambda}$ (gekennzeichnet durch den Index λ) versteht man den Differentialquotienten

$$X_{e,\lambda} = \frac{dX_e}{d\lambda} . \quad (1.1)$$

Für praktische Belange wird dieser streng mathematische Ausdruck auch durch

$$\frac{\Delta X_e}{\Delta \lambda} \quad (1.2)$$

ersetzt (mit möglichst kleiner Intervallbreite $\Delta\lambda$). Wichtig ist diese Betrachtung u. a. für farbmtrische Aspekte. Durch Integration der spektralen Größe über einen bestimmten Wellenlängenbereich ergibt sich die integrale Größe X_e

$$X_e = \int_{\lambda_u}^{\lambda_o} X_{e,\lambda} \cdot d\lambda \approx \sum X_{e,\lambda} \cdot \Delta\lambda ; \quad (1.3)$$

λ_o obere Wellenlängengrenze,
 λ_u untere Wellenlängengrenze.

Treten in einem Spektrum Kontinua und Spektrallinien auf, so können Spektrallinien unabhängig von ihrem genauen Wellenlängenprofil auch als schmale Rechtecke mit festem Wellenlängenintervall $\Delta\lambda$ (z. B. 5 nm oder 10 nm) dargestellt werden. Entsprechend der Rechteckfläche wird ihnen damit ein integraler Wert zugeordnet. Das Auge bewertet die Strahlung entsprechend der spektralen Hellempfindlichkeit seiner Empfänger, auf welche im Kapitel 1.4.1.3 noch näher eingegangen wird. Um dieses Phänomen zu berücksichtigen, wurde durch die Internationale Beleuchtungskommission (CIE) 1924 eine Gewichtungsfunktion $V(\lambda)$ definiert, die die *spektrale Hellempfindlichkeit* des menschlichen Auges beschreibt, **Bild 1.5**.

Da die spektrale Hellempfindlichkeit von verschiedenen Beobachtungsbedingungen abhängt, finden sich in diesem Bild drei spektrale Hellempfindlichkeitskurven [1.10]. $V(\lambda)$ ist die wichtigste. Sie wurde mittels Flimmer- und Kleinstufenfotometrie für ein 2° großes Gesichtsfeld empirisch aus den Beobachtungsergebnissen vieler Versuchspersonen ermittelt [1.11] und gilt für das helladaptierte Auge (*fotopischer Bereich*, Adaptationsleuchtdichte $> 30 \text{ cd/m}^2$). Die größte Empfindlichkeit liegt im gelbgrünen Spektralbereich bei $\lambda = 555 \text{ nm}$. Ihre heute gültige Version wurde von der CIE in 1-nm-Schritten für den Wellenlängenbereich 360 bis 830 nm veröffentlicht [1.12]. Für ein 10° -Gesichtsfeld (strichpunktierte Kurve) erhöht sich die Empfindlichkeit im blaugrünen Bereich gegenüber der 2° -Kurve.

Wichtet man eine beliebige physikalische Strahlungsgröße $X_{e,\lambda}$ mit der $V(\lambda)$ -Kurve und fasst diese durch Integration zusammen, so ergibt sich die zugehörige lichttechnische Größe X

$$X = K_m \int_0^{\infty} X_{e,\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (1.4)$$

Der Proportionalitätsfaktor K_m ist der Maximalwert des *fotometrischen Strahlungsäquivalents* $K_m = 683 \text{ lm/W}$. In den seit dem 20. 5. 2019 gültigen Festlegungen zum Internationalen Einheitensystem SI wird statt des K_m die Bezeichnung K_{cd} verwendet; mit der Festlegung $K_{cd} = 683 \text{ cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{W}^{-1}$ bei einer Strahlungsfrequenz von 540 THz.

Tauscht man die spektrale Hellempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ in (1.4) gegen die $V'(\lambda)$ -Kurve aus und ersetzt K_m durch K'_m , so erhält man die lichttechnische Größe für das dunkeladaptierte Auge (skotopischer Bereich (Nachtsehen), Adaptationsleuchtdichte $< 0,01 \text{ cd/m}^2$). Diese wurde für ein 10° -Gesichtsfeld (gestrichelte Kurve) ermittelt. Das Maximum der Hellempfindung liegt bei diesen geringen Leuchtdichten im blauen Spektralgebiet bei 507 nm.

Der Leuchtdichtebereich zwischen $0,01$ und 30 cd/m^2 wird *mesopischer Bereich* (Dämmerungssehen) genannt [1.13]. Da sich die spektrale Empfindlichkeit in diesem Bereich mit der Adaptationsleuchtdichte ändert, hat die Internationale Beleuchtungskommission CIE für diesen Bereich ein iteratives Verfahren für deren Berechnung vorgeschlagen [1.14].

Bereich	Adaptationsleuchtdichte in cd/m^2	Wellenlänge der maximalen Empfindlichkeit in nm	Maximales fotometrisches Strahlungsäquivalent
Tagessehen (fotopisch)	> 30	555	$K_m = 683 \text{ lm/W}$
Dämmerungssehen (mesopisch)	$0,01 \dots 30$	$507 < \lambda < 555$	$K_{\text{meq}} = \frac{683}{V_{\text{eq}}(\lambda = 555 \text{ nm})} \frac{\text{lm}}{\text{W}}$
Nachtsehen (skotopisch)	$< 0,01$	507	$K'_m = 1699 \text{ lm/W}$

Tabelle 1.4 Maximale fotometrische Strahlungsäquivalente und zugehörige Wellenlängen

Für das Dämmerungssehen geht die jeweils gültige Hellempfindlichkeitskurve $V_{\text{eq}}(\lambda)$ gleitend von der $V(\lambda)$ -Verteilung in die $V'(\lambda)$ -Verteilung über (*Purkinje-Effekt*). Der zugehörige Maximalwert des fotometrischen Strahlungsäquivalents ergibt sich aus einer Division K_m durch den Wert von $V_{\text{eq}}(\lambda)$ bei 555 nm.

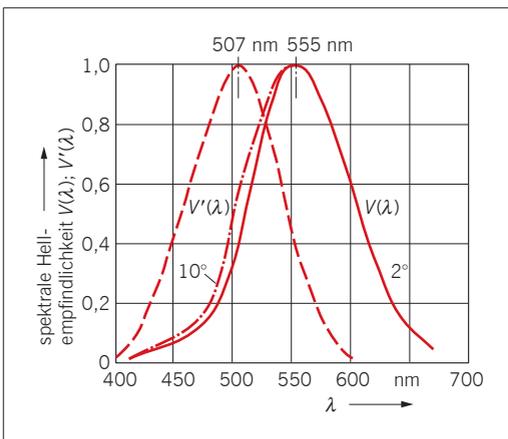


Bild 1.5 Spektrale Hellempfindlichkeitskurven des menschlichen Auges [1.11] (Quelle: Baer)

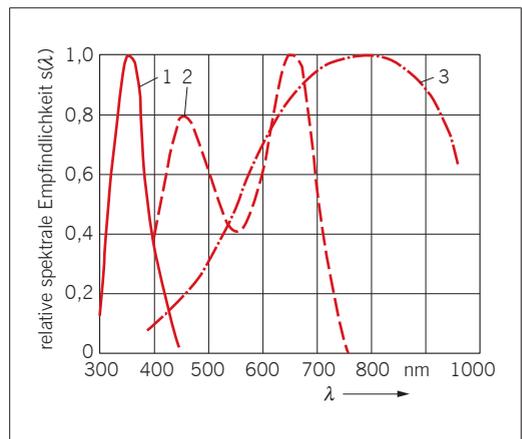


Bild 1.6 Spektrale Empfindlichkeit verschiedener Prozesse (Quelle: Baer)

1 Hautbräunung; 2 Fotosynthese; 3 Fotoeffekt in Silicium

Mehrere Versuche für eine vereinfachte Nutzung, die im **Bild 1.5** dargestellten Kurven durch analytische Ausdrücke zu beschreiben [1.15], [1.16], führten zu Anpassungsfehlern von bis zu 7 %.

Spektrale Empfindlichkeiten lassen sich nicht nur für das Auge sondern auch für jegliche Wechselwirkung von Strahlung mit Materie ermitteln. **Bild 1.6** zeigt drei Beispiele für solche Empfindlichkeitsverläufe.

Durch Austausch der spektralen Hellempfindlichkeitsfunktion $V(\lambda)$ mit der jeweiligen spektralen Wirksamkeit $s(\lambda)$ (*Wirkungskurve, spektrale Empfindlichkeit*) erhält man eine beschreibende Größe für die jeweilige integrale Wirkung der Strahlung (1.2)

$$X_s = \int_0^{\infty} X_{e,\lambda} \cdot s(\lambda) \cdot d\lambda ; \quad (1.5)$$

X_s bewertete Strahlungsgröße.

Dabei wird die spektrale Empfindlichkeit relativ angegeben, wobei man auf die maximale Empfindlichkeit normiert. Je nach spektraler Verteilung sind die einzelnen Strahlungsquellen für die jeweiligen Prozesse unterschiedlich stark wirksam.

1.2.3 Licht als Welle und Teilchen

Es gibt Anwendungen innerhalb der Lichttechnik, die die Kenntnis voraussetzen, dass Licht sowohl die Eigenschaften einer Welle als auch eines Teilchenstromes hat.

Bezeichnung	Bereich	Wellenlänge λ in nm	Photonenenergie q		Bemerkungen
			10^{-19} J	eV	
Ultra-violettstrahlung (UV)	UV-C	100 ... 280	19,8 ... 7,1	12,4 ... 4,4	< 200 nm wird in Luft absorbiert (Vakuum-UV)
	UV-B	280 ... 315	7,1 ... 6,3	4,4 ... 3,9	Vitamin-D-Synthese
	UV-A	315 ... 380	6,3 ... 5,0	3,9 ... 3,3	Hautbräunung
Licht (VIS)	violett	380 ... 420	5,2 ... 4,7	3,3 ... 2,9	555 nm Maximum der Hellempfindung
	blau	420 ... 490	4,7 ... 4,0	2,9 ... 2,5	
	grün	490 ... 560	4,0 ... 3,5	2,5 ... 2,2	
	gelb	560 ... 590	3,5 ... 3,4	2,2 ... 2,1	
	orange	590 ... 620	3,4 ... 3,2	2,1 ... 2,0	
	rot	620 ... 780	3,2 ... 2,5	2,0 ... 1,5	
Infrarotstrahlung (IR)	IR-A	780 ... 1 400	2,5 ... 1,4	1,6 ... 0,88	nahes IR Lacktrocknung Temperaturstrahlung bei Zimmertemperatur ($\lambda \approx 9 \dots 10 \mu\text{m}$)
	IR-B	1 400 ... 3 000	1,4 ... 0,66	0,88 ... 0,41	
	IR-C	$3 \cdot 10^3 \dots 1 \cdot 10^6$	$0,66 \dots 2 \cdot 10^{-3}$	$0,41 \dots 1,2 \cdot 10^{-3}$	

Tabelle 1.5 Wellenlängen und Photonenenergien

a) Licht als Welle. Das Licht breitet sich in einem homogenen Medium als periodische Schwingung geradlinig aus und wird an der Grenzfläche zweier Medien mit unterschiedlichen Brechzahlen gebrochen. Da das Licht eine Transversalwelle darstellt, ist es möglich, aus dem zunächst alle Schwingungsrichtungen enthaltenden Licht einer Strahlungsquelle mit Polarisatoren bestimmte Schwingungsebenen auszufiltern, d. h. das Licht zu polarisieren. Aufgrund der Wellennatur des Lichtes können sich zwei Wellenzüge gegenseitig beeinflussen (Interferenz), z. B. auslöschen oder verstärken, oder das Licht wird an Kanten oder Spalten gebeugt.

b) Licht als Teilchen. Bei Wechselwirkung des Lichtes mit stofflicher Materie unter Energieaustausch (Absorption, Emission) zeigt das Licht Teilchencharakter (Lichtquanten, *Photonen*). Die Lichtquanten haben entsprechend ihrer Frequenz f und der Lichtgeschwindigkeit c die Energie E :

$$E = h \cdot f = h \frac{c}{\lambda}; \quad (1.6)$$

$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$ Planck'sches Wirkungsquantum,

$c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ Vakuum-Lichtgeschwindigkeit,

λ Vakuum-Wellenlänge,

f Frequenz.

Den Zusammenhang zwischen Frequenz und Wellenlänge beschreibt

$$c = \lambda \cdot f. \quad (1.7)$$

In **Tabelle 1.5** sind für die einzelnen Wellenlängenbereiche die Photonenenergien angegeben, wobei die dem Licht benachbarten Bereiche mit aufgeführt sind [1.11].

1.2.4 Ausbreitung des Lichtes

Gehen wir von einer idealen Punktlichtquelle aus, strahlt diese ihr Licht in alle Richtungen des Raumes gleichmäßig ab. Das Licht breitet sich dabei geradlinig aus. Da für viele Anwendungen weniger die Summe des abgestrahlten Lichtes sondern mehr dessen räumliche Ausbreitung von Interesse ist, werden für die Charakterisierung der Lichtverteilung geometrische Größen benötigt. Von besonderer Relevanz ist hier der *Raumwinkel* [1.231], [1.232], [1.233], [1.234].

Ein ebener Winkel wird durch zwei Strahlen begrenzt, die von einem Scheitelpunkt S starten. Um einen Raumwinkel – also ein dreidimensionales Gebilde – aufzuspannen, wird dagegen ein Strahlenbüschel benötigt, das im einfachsten Fall aus drei Strahlen besteht. Für eine Raumwinkelquantifizierung kann nun die in einem bestimmten Scheitelpunkt Abstand eingeschlossene Querausdehnung des Strahlenbüschels herangezogen werden. Während die lineare Querausdehnung direkt proportional zum Abstand ansteigt, wächst die Flächenausdehnung mit dem Quadrat des Abstandes. Da also die Raumwinkelgröße durch die beiden Parameter Querschnittsfläche und zugehöriger Abstand eindeutig bestimmt wird, ergeben sich zum Umgang mit Raumwinkeln folgende Alternativen:

I) Es wird von einer planen, geometrisch häufig simplen Querschnittsfläche ausgegangen, die dann aber lokal unterschiedliche Abstände zum Scheitelpunkt S aufweist.

II) Oder es wird eine gekrümmte, geometrisch kompliziertere Querschnittsfläche mit konstantem Abstand zu einem Punkt S verwendet.

Beide Herangehensweisen haben spezielle Vor- und Nachteile, wobei in Lehrbüchern häufig nur die zweite angesprochen wird.

Zum Fall II: Die Querschnittsfläche ist dann Teil der Oberfläche einer Kugel. Gesamtkugeloberflächen berechnen sich als Produkt aus dem Quadrat des Radius r und dem Faktor 4π . Analog zur Festlegung des ebenen Vollwinkels im Bogenmaß bietet sich daher als Raumwinkel Ω der Gesamtkugel der Wert 4π an, dem als Einheit der Steradian, abgekürzt sr angefügt wird. Für eine beliebig berandete Teilfläche A auf der Kugeloberfläche ergibt sich dann der Raumwinkel Ω nach der Formel:

$$d\Omega = \frac{dA}{r^2} \cdot \Omega_0 \text{ bzw. } \Omega = \frac{A}{r^2} \cdot \Omega_0. \quad (1.8)$$

Ω_0 ist der Einheitsraumwinkel 1 sr. Wie aus dieser Definitionsformel hervorgeht, ist der Raumwinkel eine dimensionslose Größe. In polarer Darstellung (**Bild 1.7**) kann man den Raumwinkel aus dem Meridianwinkel φ und dem Breitenwinkel γ berechnen:

$$\Omega = \Omega_0 \cdot \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \sin \gamma \cdot d\gamma \cdot d\varphi . \tag{1.9}$$

Für spezielle Raumwinkel (**Bild 1.8**) ergeben sich daraus folgende Beziehungen:

Kugelabschnitt (**Bild 1.8 a**), zugehörig zu dem in einer Halbkugel liegenden Kreiskegel mit dem halben Öffnungswinkel γ :

$$\Omega = 2\pi \cdot (1 - \cos \gamma) \cdot \Omega_0 , \tag{1.10}$$

Kugelschicht (**Bild 1.8 b**):

$$\Omega = 2\pi \cdot (\cos \gamma_1 - \cos \gamma_2) \cdot \Omega_0 , \tag{1.11}$$

Kugelzweieck (**Bild 1.8 c**), Winkel in rad:

$$\Omega = 2\Delta\gamma \cdot \Omega_0 = 2 \cdot (\gamma_2 - \gamma_1) \cdot \Omega_0 . \tag{1.12}$$

Kugeldreieck mit den Innenwinkeln α, β, γ in rad (**Bild 1.8 d**):

$$\Omega = (\alpha + \beta + \gamma - \pi) \cdot \Omega_0 . \tag{1.13}$$

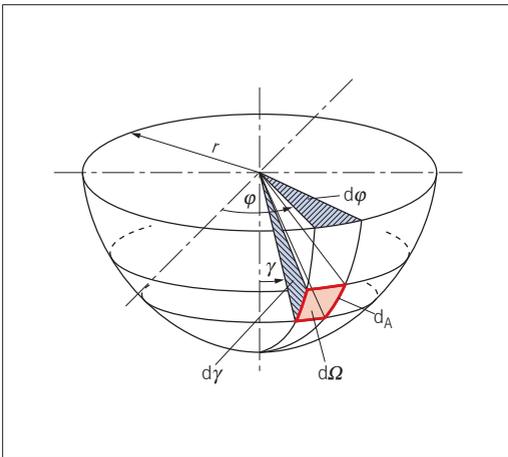


Bild 1.7 Darstellung zum Raumwinkel (Quelle: Baer)

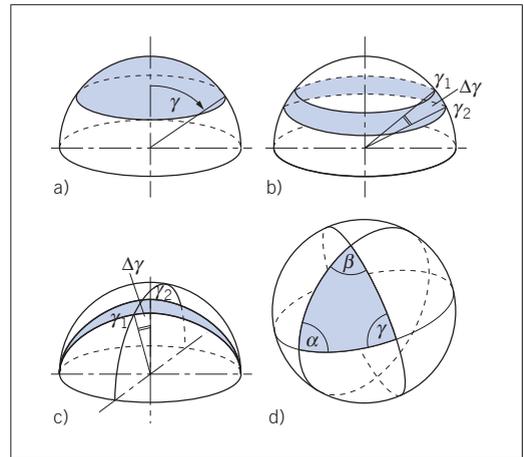


Bild 1.8 Spezielle Raumwinkel (Quelle: Baer/Serick)

a) Kugelabschnitt; b) Kugelschicht; c) Kugelzweieck; d) Kugeldreieck

Zum Fall I: Als Beispiel für plane Abschlussflächen dient eine gerade rechteckige Pyramide (**Bild 1.9**) mit den Seiten x und y , der Höhe h , sowie den Innenwinkeln φ, γ :

Der Raumwinkel vom Scheitelpunkt S kann entweder aus den drei Längen x, y, h oder den beiden Winkeln φ, γ berechnet werden:

$$\Omega = 4 \arctan \frac{x \cdot y}{2h\sqrt{4h^2 + x^2 + y^2}} \Omega_0 , \tag{1.14}$$

$$\Omega = 4 \arcsin(\sin \varphi \cdot \sin \gamma) \Omega_0 . \tag{1.15}$$

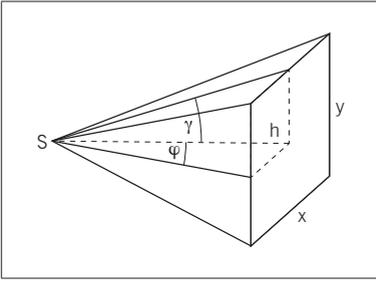


Bild 1.9 Raumwinkel einer Pyramide mit rechteckigem Umriss (Quelle: Serick)

Raumwinkelprojektion:

Während sich der normale Raumwinkel von einem Fixpunkt aus z. B. auf eine im Raum definierte Fläche bezieht, geht es in der Praxis häufig um den Strahlungsaustausch zwischen zwei Flächen. Für den Spezialfall, dass sich diesen Flächen eine Flächennormale zuordnen lässt und ihre richtungsabhängige Emission (bzw. Absorption) dem Kosinus des Winkels γ gegenüber der Flächennormalen folgt (Lambertstrahler bzw. Lambertabsorber), ist folgender Formalismus anwendbar:

In zunächst infinitesimaler Vorgehensweise betrachten wir ein emittierendes Flächenelement dA_1 , orthogonal zur Verbindungslinie zum bestrahlten Flächenelement dA_2 im Abstand r (**Bild 1.10**).

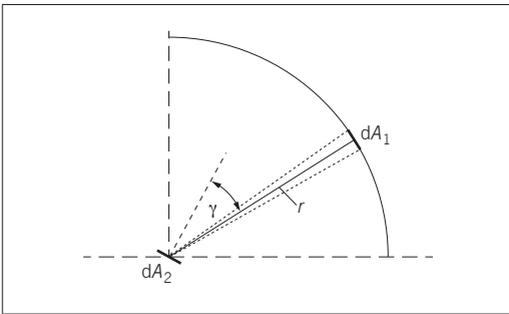


Bild 1.10 Raumwinkelprojektion auf das Flächenelement dA_2 (Quelle: Serick)

Neben dem von dA_2 aus gesehenen Raumwinkel $d\Omega$ des Elementes dA_1 kommt es nun auch auf die Orientierung von dA_2 zur Verbindungslinie dA_2 – dA_1 an. Bildet die Flächennormale von dA_2 mit der Verbindungslinie den Winkel $\gamma \neq 0$, so reduziert sich das auf dA_2 wirkende Raumwinkelelement $d\Omega$ auf das „Projizierte Raumwinkelelement $d\Omega_p$ “. Es berechnet sich nach der Beziehung:

$$d\Omega_p = d\Omega \cdot \cos\gamma \text{ mit } d\Omega = \frac{dA_1}{r^2} . \quad (1.16)$$

Für ausgedehnte Flächen A_1 ist dann eine Integration über den gesamten wirksamen Raumwinkel Ω mit lokal angepasstem γ auszuführen, um die Raumwinkelprojektion Ω_p zu erhalten:

$$\Omega_p = \int_{\Omega} \cos\gamma d\Omega . \quad (1.17)$$

Durch die richtungsabhängig unterschiedliche Wirkung eines jeden infinitesimalen Flächenelementes dA_1 auf das bestrahlte Flächenelement dA_2 , also die Wichtung mit dem $\cos\gamma$, sind die Raumwinkelprojektionen Ω_p ausgedehnter strahlender Flächen A_1 z. T. erheblich kleiner als die ursprünglichen Raumwinkel Ω .

Nach Auflösung in die beiden ebenen Winkelkoordinaten γ und φ geht (1.17) über in:

$$\Omega_p = \int_{\gamma} \int_{\varphi} \cos\gamma \sin\gamma d\varphi d\gamma . \quad (1.18)$$

Als Beispiel für eine reale Raumwinkelprojektion betrachten wir die komplette gewölbte Fläche einer Halbkugel $2\pi r^2$ auf ein in der Innenkreisflächenebene zentral liegendes Flächenelement dA_2 . Durch die Einbindung des $\cos\gamma$ wird aus dem Halbkugelraumwinkel 2π sr die zugehörige Raumwinkelprojektion

$$\Omega_p = \pi \text{ sr.}$$

In einer zweiten – nach DIN 5031-3 [1.11] gleichberechtigten – Auslegung wird der Begriff Raumwinkelprojektion auch für folgenden Fall verwendet: Die Flächennormale des bestrahlten Flächenelementes dA_2 liegt in der Verbindungslinie dA_2-dA_1 während die Flächennormale des emittierenden Flächenstrahlerelementes dA_1 mit der Verbindungslinie den Winkel $\varepsilon \neq 0$ bildet. Auch hier erhält man durch Integration nach (1.17) und Substitution von γ durch ε die Raumwinkelprojektion.

Zu den im **Bild 1.8** dargestellten Kugelteilflächen ergeben sich für eine infinitesimale Fläche dA_1 im Kugelmittelpunkt mit vertikaler Flächennormale folgende Raumwinkelprojektionen Ω_p :

Kugelabschnitt (Bild 1.8 a):

$$\Omega_p = \pi \cdot \sin^2 \gamma \cdot \Omega_0 \quad (1.19)$$

Kugelschicht (Bild 1.8 b):

$$\Omega_p = \pi \cdot (\sin^2 \gamma_2 - \sin^2 \gamma_1) \cdot \Omega_0 \quad (1.20)$$

Kugelzweieck (Bild 1.8 c):

$$\Omega_p = \frac{\pi}{2} \cdot (\sin \gamma_2 - \sin \gamma_1) \cdot \Omega_0 \quad (1.21)$$

1.2.5 Die vier Grundgrößen der Lichttechnik

Zur quantitativen Charakterisierung der Lichtausbreitung und Lichtwirkung (in Form der Helligkeit bzw. Helligkeitsverteilung) verwendet die Lichttechnik vier Grundgrößen. Dabei ist es sinnvoll, zwischen Größen zu unterscheiden, die die Strahlungsemission betreffen – gekennzeichnet durch den Index 1 – und solchen, die sich auf den Strahlungsempfang beziehen – gekennzeichnet durch den Index 2.

1.2.5.1 Lichtstrom

Betrachtet man die im **Bild 1.11** von einem Strahler in den gesamten Raum abgegebene Strahlungsleistung (Strahlungsfluss) und bezieht sie auf die Wellenlänge, so erhält man nach (1.1) den spektralen Strahlungsfluss $\Phi_{e,\lambda}$ dieses Strahlers. Da für beleuchtungstechnische Belange nicht die Strahlungsleistung direkt interessiert, sondern der Helligkeitseindruck, den sie hervorruft, definiert man als lichttechnische Größe die mit der spektralen Hellempfindlichkeit $V(\lambda)$ bewertete spektrale Strahlungsleistung als *Lichtstrom* Φ des Strahlers:

$$\Phi = K_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} V(\lambda) \cdot \Phi_{e,\lambda} \cdot d\lambda ; \quad (1.22)$$

$K_m = 683 \text{ lm/W}$ Maximalwert des fotometrischen Strahlungsäquivalents [1.11],

$\Phi_{e,\lambda}$ spektraler Strahlungsfluss.

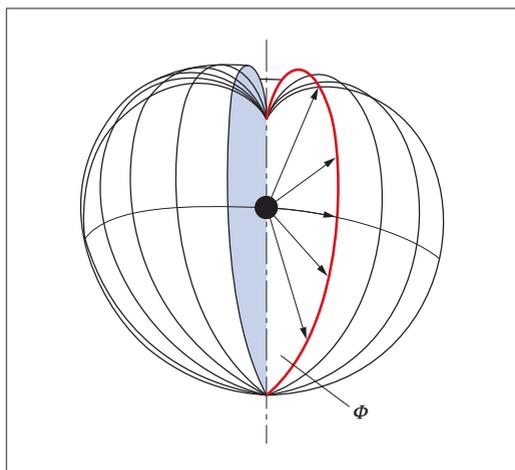


Bild 1.11 Lichtstromdarstellung
(Quelle: Baer)

Der Lichtstrom hat die Einheit Lumen (lm). **Tabelle 1.6** enthält die Lichtströme von sieben Lichtquellen.

Lichtquelle, elektrische Leistungsaufnahme	Lichtstrom in lm
Kerze	10
Glühlampe, 100W	1380
Leuchtstofflampe T5, 21 W	1900
High-Power-LED, 20W	2300
Halogenglühlampe, 500W	10000
Xenon-Höchstdrucklampe, 2000W	110000
Sonne	$3,8 \cdot 10^{28}$

Tabelle 1.6 Lichtstromwerte einiger Lichtquellen

1.2.5.2 Lichtstärke

Der differenzielle Quotient aus Lichtstrom und Raumwinkel (**Bild 1.12**) wird als *Lichtstärke I* bezeichnet:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega_1} \tag{1.23}$$

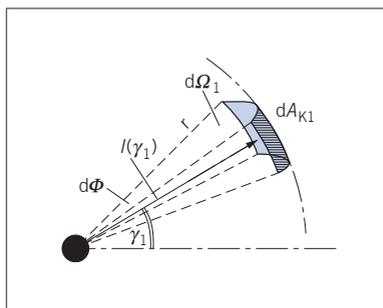


Bild 1.12 Lichtstärkedefinition
(Quelle: Baer)

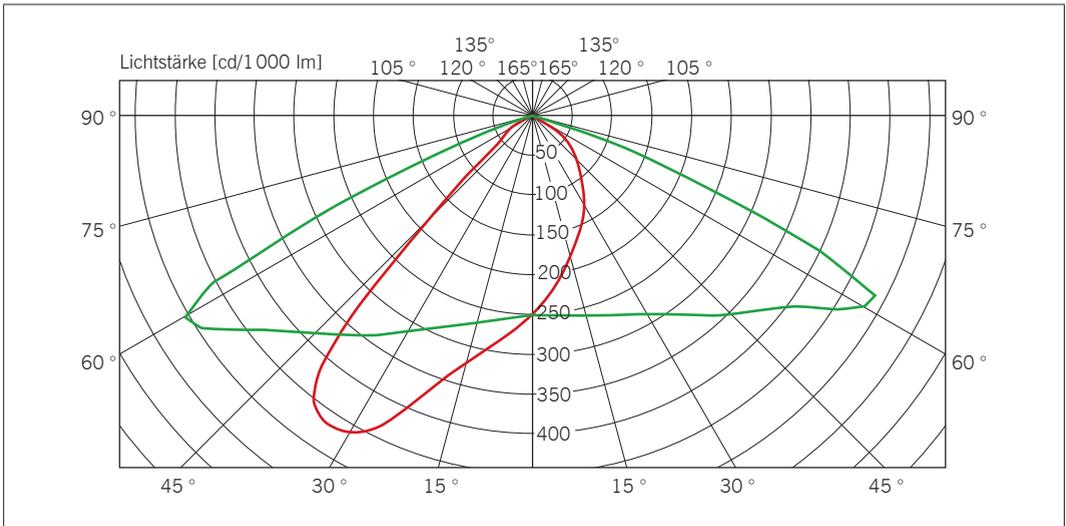


Bild 1.13 Lichtstärkeverteilungskurve eines LED-Flutlichtes (Quelle: Völker)

Die Einheit der Lichtstärke ist die *Candela* (cd). Sie gehört zu den sieben SI-Basiseinheiten und ist definiert als die Lichtstärke einer Strahlungsquelle, deren monochromatische Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$ in eine bestimmte Richtung $1/683 \text{ W/sr}$ beträgt.

Da die meisten Lichtquellen das Licht in verschiedene Richtungen unterschiedlich stark abstrahlen, muss zur vollständigen Charakterisierung des Lichtfeldes die Lichtstärkeverteilung in alle Richtungen angegeben werden. Die polare Lichtstärkeverteilung in einer Ebene wird als *Lichtstärkeverteilungskurve* (siehe **Bild 1.13**) und die im Raum als *Lichtstärkeverteilungskörper* bezeichnet.

Für viele praktische Zwecke genügt es, die Lichtstärkeverteilungskurven in ausgewählten Ebenen darzustellen (A-, B- und C-Ebene, **Bild 1.14**). In diesen Diagrammen werden die Lichtstärken nicht absolut, sondern auf einen Lampenlichtstrom von 1000 lm normiert eingetragen. Verbindet man im Lichtstärkeverteilungskörper Punkte gleicher Lichtstärke und projiziert die so erhaltenen Linien in eine Ebene, so erhält man ein *Isocandeladiagramm*. **Tabelle 1.7** gibt typische Lichtstärken an.

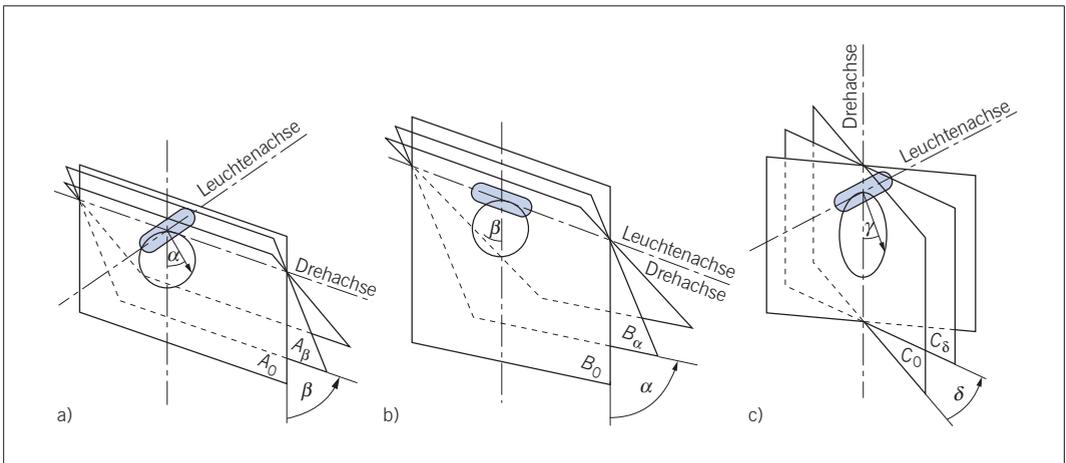


Bild 1.14 Charakteristische Ebenen des Lichtstärkeverteilungskörpers (Quelle: Baer)

a) A-Ebenen; b) B-Ebenen; c) C-Ebenen

Lichtquelle	Lichtstärke in cd
Kerze	0,6 ... 1,0
Reflektorlampe, 12V, 20W, Abstrahlwinkel 36°	510
LED, 20W	700
Halogen-Metaldampflampe, 2000W	17 000
Leuchtturm	≈ 4 · 10 ⁷
Sonne (außerhalb der Atmosphäre)	≈ 3 · 10 ²⁷

Tabelle 1.7 Lichtstärkewerte einiger Lichtquellen

1.2.5.3 Beleuchtungsstärke

Der Quotient aus Lichtstrom und beleuchteter Fläche wird als *Beleuchtungsstärke E* bezeichnet. Für die ebene Fläche gilt (**Bild 1.15**):

$$E = \frac{d\Phi}{dA_2} \tag{1.24}$$

Bei der Beleuchtungsplanung wird in den häufigsten Fällen auf horizontale bzw. vertikale Flächen Bezug genommen. Entsprechend nutzt man den Begriff der horizontalen bzw. vertikalen Beleuchtungsstärke. Die Einheit der Beleuchtungsstärke ist das Lux (lx). Eine ältere angelsächsische Einheit ist das Footcandle (fc); 1 fc = 10,764 lx.

Einige typische Beleuchtungsstärken sind in **Tabelle 1.8** angegeben.

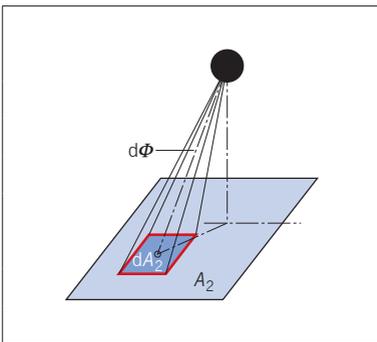


Bild 1.15 Beleuchtungsstärkedefinition (Quelle: Baer)

Beleuchtung	Beleuchtungsstärke in lx
Neumond, Erdoberfläche	0,01
Vollmond, Erdoberfläche	5
Straßenbeleuchtung, Straßenoberfläche	15
Glühlampe, 100W, 1 m Abstand	110
Zimmerbeleuchtung, Tischhöhe	500
TV-Studio, beleuchtete Objekte	1 500
Bedeckter Himmel, Erdoberfläche	15 000
Direktes Sonnenlicht, Erdoberfläche	100 000

Tabelle 1.8 Beleuchtungsstärkewerte in typischen Situationen (Quelle: Völker)

Die *Beleuchtungsstärkeverteilung* auf einer Fläche kann entweder als *Beleuchtungsstärkegebirge* dargestellt werden, indem man den Beleuchtungsstärken in den einzelnen Punkten Höhen zuordnet, oder als *Isoluxkurven*, bei denen man in der zu betrachtenden Ebene die Punkte gleicher Beleuchtungsstärke verbindet.

Bild 1.16 zeigt einen Schnitt durch das Beleuchtungsstärkegebirge und die Isoluxkurven einer rotations-symmetrischen Leuchte in einer horizontalen Ebene und **Bild 1.17** ein sogenanntes polares Isoluxdiagramm für horizontale Beleuchtungsstärken bei verschiedenen Beleuchtungshöhen.

Die Auslegung einer Beleuchtungsanlage erfolgt mit dem örtlichen Mittelwert der Beleuchtungsstärke, der in Abhängigkeit von der jeweiligen *Sehaufgabe* nach den entsprechenden DIN-Normen festgelegt ist.

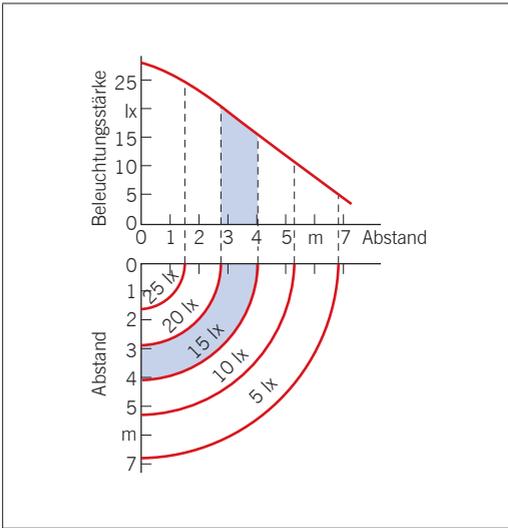


Bild 1.16 Ebenes Isoluxdiagramm (unten) und Beleuchtungsstärkegebiete (oben) einer mit einer rotationssymmetrischen Leuchte beleuchteten Fläche (Quelle: Baer)

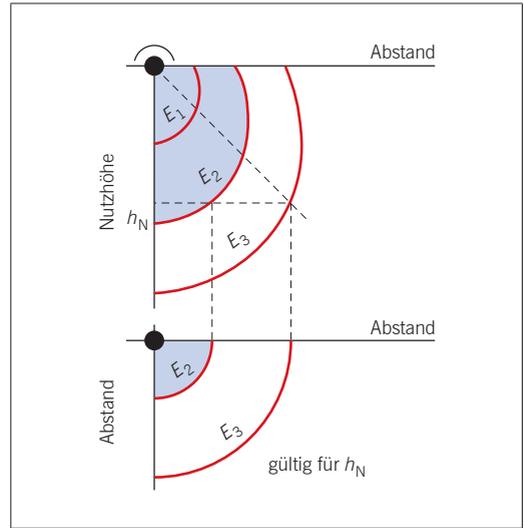


Bild 1.17 Polares (oben) und ebenes Isoluxdiagramm (unten) (Quelle: Baer)

E_1, E_2, E_3 horizontale Beleuchtungsstärken

1.2.5.4 Leuchtdichte

Die für den Helligkeitseindruck im Auge maßgebliche Größe ist die *Leuchtdichte* L . Sie ist als der Lichtstromanteil $d\Phi$ definiert, der in eine vorgegebene Richtung, in ein Raumwinkelelement $d\Omega_1$ eingestrahlt wird, bezogen auf die scheinbar leuchtende Fläche ($dA_1 \cdot \cos \gamma_1$), (**Bild 1.18**):

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA_1 \cdot \cos \gamma_1 \cdot d\Omega_1} = \frac{d(\gamma_1)}{dA_1 \cdot \cos \gamma_1} \tag{1.25}$$

Die Einheit der Leuchtdichte ist cd/m^2 .

Veraltete Einheiten sind:

1 Stilb (sb) = $1 \text{ cd/cm}^2 = 10^4 \text{ cd/m}^2$, 1 Footlambert (fL) = $3,426 \text{ cd/m}^2$,

1 Apostilb (asb) = $\frac{1}{\pi} \text{ cd/m}^2 = 0,3183 \text{ cd/m}^2$, 1 Nit (nt) = 1 cd/m^2 ,

1 Lambert (L) = $\frac{1}{\pi} \cdot 10^4 \text{ cd/m}^2 = 3183 \text{ cd/m}^2$, 1 Skot = $0,001 \text{ asb} = 10^{-3}/\pi \text{ cd/m}^2$.

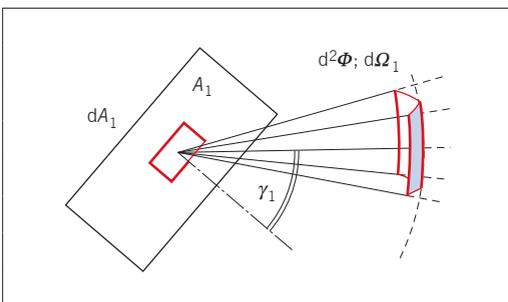


Bild 1.18 Leuchtdichtedefinition (Quelle: Baer)

Lichtquelle	Leuchtdichte in kcd/m^2
Mond	2,5
Kerze	8
Leuchtstofflampe T5	50
LED	6000
Glühlampenglühwendel	15000
Xenonhochdrucklampe	180000
Sonne	1600000

Tabelle 1.9 Typische Leuchtdichtewerte

Einige typische Leuchtdichten enthält **Tabelle 1.9**.

Die Leuchtdichte kann man bei vorgegebener Fläche über dem Ausstrahlungswinkel γ_1 oder bei vorgegebenem Ausstrahlungswinkel über der leuchtenden Fläche darstellen. Linien gleicher Leuchtdichte bei vorgegebener Abstrahlungsrichtung nennt man *Iso-cd/m²-Diagramme*.

1.2.6 Ergänzende Grundgrößen der Lichttechnik

1.2.6.1 Pupillenlichtstärke

Als Helligkeitsmaß zur Charakterisierung optischer Reize auf das menschliche Auge wird gelegentlich die *Pupillenlichtstärke* I_{Pu} [1.11] verwendet, die ein Maß für die Beleuchtungsstärke in der Netzhautenebene ist:

$$I_{Pu} = L \cdot A_{Pu}, \quad (1.26)$$

L Leuchtdichte des optischen Reizes in cd/m^2 ,
 A_{Pu} Pupillenfläche in mm^2 .

Die Einheit der Pupillenlichtstärke ist das Troland (td); $1 \text{ td} = 1 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^2$. Da der Helligkeitseindruck auch davon abhängt, durch welche Stelle der Pupille das Licht in das Auge trifft (Stiles-Crawford-Effekt 1. Art), muss man je nach Pupillengröße eine reduzierte Lichtstärke I'_{Pu} angeben:

$$I'_{Pu} = s \cdot I_{Pu}, \quad (1.27)$$

$s = 1,0136 (1 - 0,0106 d_{Pu}^2 + 4,17 \cdot 10^{-5} d_{Pu}^4)$,
 $d_{Pu} = 5 - 3 \tanh(0,4 \lg L_A)$ Pupillendurchmesser in mm,
 L_A Adaptationsleuchtdichte in cd/m^2 .

Den Zusammenhang zwischen der Pupillenlichtstärke I_{Pu} und der Adaptationsleuchtdichte L_A zeigt **Bild 1.19**. Die Lichtfarbe hat einen spürbaren Einfluss auf die Pupillengröße [1.17]. Dabei ist der blaue Spektralbereich besonders wirksam.

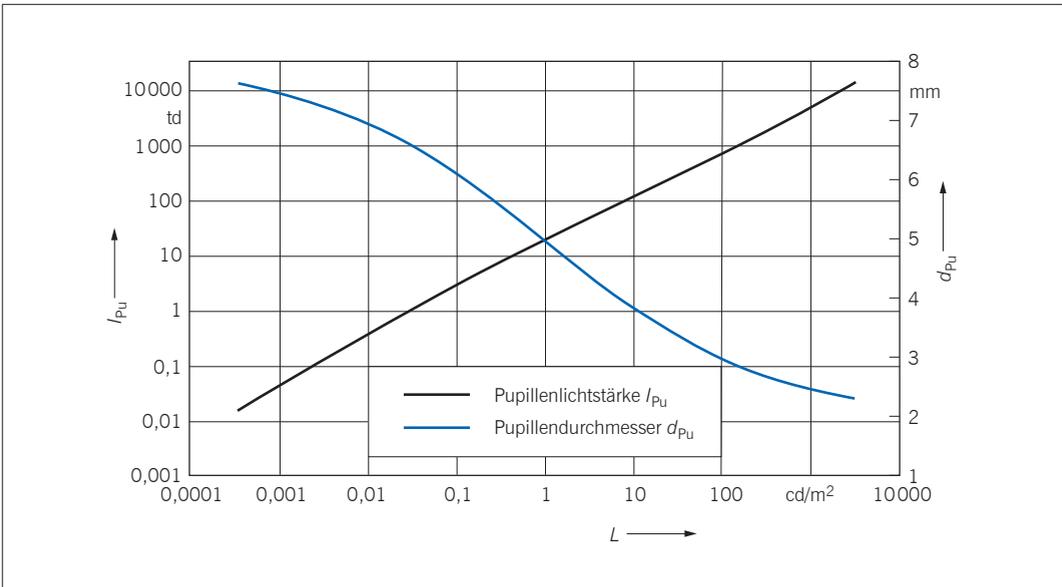


Bild 1.19 Pupillendurchmesser (rechte Achse) und Pupillenlichtstärke als Funktion der Leuchtdichte ($L = L_A$)
 (Quelle: Völker)

1.2.6.2 Zylindrische, halbzylindrische und sphärische Beleuchtungsstärke

Die Beleuchtungsstärke bezieht sich in vielen Anwendungsfällen auf eine ebene Fläche mit einer festen Bezugsrichtung zur Beleuchtung. Liegt zur Charakterisierung des zu beleuchtenden Objektes keine definierte Richtung vor, so kann man mit der *sphärischen Beleuchtungsstärke* E_S die integrale Wirkung der Beleuchtung gut beschreiben:

$$E_S = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \Omega_0} \cdot \int_{4\pi\Omega_0} E \cdot d\Omega_2. \quad (1.28)$$

Die Beleuchtungsstärke E_S ist also das arithmetische Mittel aus den sich aus allen Richtungen ergebenden Beleuchtungsstärken.

Für ausgewählte räumliche Gebilde kann man den auf sie einfallenden Lichtstrom auf deren Oberfläche beziehen und erhält damit die Raumbelichtungsstärken, die zur Kennzeichnung der Raumhelligkeit und der Körperwiedergabe gut geeignet sind. Als Bezugskörper können dabei Kugel (sphärische Beleuchtungsstärke E_S), Halbkugel (hemisphärische Beleuchtungsstärke $E_{S_{1/2}}$), Zylinder (zylindrische Beleuchtungsstärke E_Z) oder Halbzylinder (halbzylindrische Beleuchtungsstärke $E_{Z_{1/2}}$) mit differentiell kleinen Abmessungen genommen werden [1.9]. Die Raumbelichtungsstärke E_0 ergibt sich zu

$$E_0 = \int_{4\pi\Omega_0} L \cdot d\Omega_2; \quad (1.29)$$

sie kann auch aus der sphärischen Beleuchtungsstärke E_S bestimmt werden:

$$E_0 = 4 \cdot E_S. \quad (1.30)$$

Die *zylindrische Beleuchtungsstärke* [1.19] bis [1.21] ist die mittlere Beleuchtungsstärke auf der Mantelfläche eines vertikalen Kreiszylinders mit gegen null gehenden Abmessungen:

$$E_Z = \lim_{\substack{D \rightarrow 0 \\ h \rightarrow 0}} \frac{\Phi_Z}{A_Z}; \quad (1.31)$$

Φ_Z Lichtstrom auf der Mantelfläche,
 A_Z, D, h Mantelfläche, Durchmesser und Höhe des Zylinders.

Die zylindrische Beleuchtungsstärke erhält man auch, wenn man über alle vertikalen Beleuchtungsstärken mittelt:

$$E_Z = \bar{E}_V. \quad (1.32)$$

Für die gebräuchlichsten Beleuchtungssysteme gibt es bereits umfangreiche Unterlagen zur Berechnung der zylindrischen Beleuchtungsstärke [1.22], [1.23].

Die Beleuchtungsstärke kann man nicht nur durch ihren Betrag, sondern zusätzlich durch ihre Richtung kennzeichnen. Dies führt auf den *Beleuchtungsvektor*

$$\vec{E} = \int_{4\pi\Omega_0} L \cdot d\vec{\Omega}_2 = \int_{4\pi\Omega_0} L \cdot \frac{d\vec{A}}{r^2} \cdot \Omega_0; \quad (1.33)$$

$d\vec{\Omega}_2$ vektorieller Raumwinkel,
 $d\vec{A} = dA \cdot \vec{n}$ Fläche auf der Einheitskugel,
 \vec{n} Einheitsvektor der Fläche (liegt in Richtung der Flächennormalen).

Die Angabe des Beleuchtungsvektors ist nur für kleine und einzelne Lichtpunkte sinnvoll, da man nur dort von einer Richtung der Beleuchtung sprechen kann. Zur Kennzeichnung der Körperwiedergabe (modelling) wird der Beleuchtungsvektor gelegentlich verwendet.

1.2.6.3 Lichtmenge Q

Der in einem bestimmten Zeitraum abgestrahlte Lichtstrom wird *Lichtmenge* (Lichtarbeit) Q genannt:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \Phi \cdot dt . \quad (1.34)$$

Die Einheit ist Lumensekunde ($\text{lm} \cdot \text{s}$) bzw. Lumenstunde ($\text{lm} \cdot \text{h}$).

1.2.6.4 Spezifische Lichtausstrahlung M

Bezieht man den Lichtstrom auf eine strahlende Oberfläche A_1 , so erhält man die *spezifische Lichtausstrahlung*. Diese Größe wird verwendet, um leuchtende Flächen zu charakterisieren.

$$M = \frac{d\Phi}{dA_1} \quad (1.35)$$

mit der Einheit lm/m^2 .

1.2.6.5 Lichteinfallsstärke J

Lichtstrom, der in einen empfangenden Raumwinkel fällt, wurde von Völker [1.24] als *Lichteinfallsstärke* definiert. Diese Größe eignet sich besonders, um die Wirkung der Lichtrichtung zu beschreiben. **Bild 1.20** stellt die Lichteinfallsstärke grafisch dar.

$$J = \frac{d\Phi}{d\Omega_2} \quad (1.36)$$

mit der Einheit lm/sr .

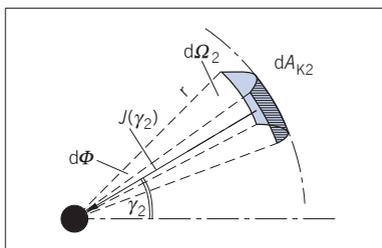


Bild 1.20 Lichteinfallsstärke
(Quelle: Völker)

Das physikalische Pendant hierzu ist die Strahleinfallsstärke

$$J_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega_2} .$$

mit der Einheit W/sr .

1.2.6.6 Belichtung und Leitzahl

Die Integration der Beleuchtungsstärke über die Zeit ergibt die *Belichtung*

$$H = \int_{t_1}^{t_2} E \cdot dt . \quad (1.37)$$

Ihre Einheit ist die Luxsekunde ($\text{lx} \cdot \text{s}$). Diese Größe leistet vor allem bei der Beschreibung der Beleuchtungsbedingungen bei fotochemischen (Filmbelichtung) und fotobiologischen (Pflanzenbestrahlung) Vorgängen gute Dienste.

Leitzahl. Zur Kennzeichnung von Blitzlichtern verwendet man die Leitzahl Z

$$Z = K \cdot r ; \quad (1.38)$$

K an der Kamera eingestellte Blendenzahl,
 r Abstand Blitz – beleuchtete Fläche in Meter.

1.2.7 Strahlungsphysikalische Größen

Aus den lichttechnischen Größen ergeben sich die strahlungsphysikalischen Größen, wenn die $V(\lambda)$ -Bewertung nicht zur Anwendung kommt und das fotometrische Strahlungsäquivalent (siehe (1.7)) entfällt. Die den lichttechnischen Größen entsprechenden strahlungsphysikalischen Größen samt ihren Einheiten sind in **Tabelle 1.10** enthalten.

Lichttechnische Größe	Einheit	strahlungsphysikalische Größe	Einheit
Lichtstrom Φ	lm	Strahlungsleistung, Strahlungsfluss Φ_e, P	W
Lichtmenge Q	lm · s	Strahlungsmenge Q_e	W · s = J
spezifische Lichtausstrahlung M	lm/m ²	spezifische Ausstrahlung M_e	W/m ²
Lichtstärke I	cd	Strahlstärke I_e	W/sr
Lichteinfallstärke J	lm/sr	Strahleinfallsstärke J_e	W/sr
Beleuchtungsstärke E	lx	Bestrahlungsstärke E_e	W/m ²
Belichtung H	lx · s	Bestrahlung H_e	W · s/m ²
Leuchtdichte L	cd/m ²	Strahldichte L_e	W/(m ² · sr)

Tabelle 1.10 Lichttechnische und strahlungsphysikalische Größen

1.2.8 Abgeleitete Größen

1.2.8.1 Stoffkennzahlen

Zur Charakterisierung lichttechnischer Baustoffe dienen Stoffkennzahlen, die die Wechselwirkungen von Licht mit Materie, also Reflexionen, Transmissionen, Absorptionen, Streuungen oder Emissionen beschreiben [1.25]. Stoffkennzahlen können entweder lichttechnisch entsprechend der $V(\lambda)$ -Funktion oder strahlungsphysikalisch ohne spektrale Wichtung (Index e) ermittelt werden. Im Weiteren werden vor allem die lichttechnischen Kennzahlen behandelt.

Reflexions-, Transmissions- und Absorptionsgrad. Diese Kennzahlen sind als Quotienten des Lichtstromes nach der Einwirkung zum auftreffenden Lichtstrom definiert:

$$\text{Reflexionsgrad: } \rho = \frac{\Phi_\rho}{\Phi}, \quad (1.39)$$

$$\text{Transmissionsgrad: } \tau = \frac{\Phi_\tau}{\Phi}, \quad (1.40)$$

$$\text{Absorptionsgrad: } \alpha = \frac{\Phi_\alpha}{\Phi}; \quad (1.41)$$

$\Phi_\rho, \Phi_\tau, \Phi_\alpha$ reflektierter, transmittierter, absorbierter Lichtstrom,
 Φ auftreffender Lichtstrom.

In **Tabelle 1.11** sind Reflexions- und Transmissionsgrade einiger Materialien im sichtbaren Spektralbereich aufgeführt.

Material	Reflexionsgrad	Material	Reflexionsgrad
Aluminium hochglänzend matt	0,80 ... 0,85 0,55 ... 0,75	Email weiß	0,65 ... 0,75
		Papier weiß	0,70 ... 0,85
		Sandstein	0,20 ... 0,40
Farben, allgemein weiß helle Farben dunkle Farben	0,75 ... 0,85 0,45 ... 0,60 0,10 ... 0,20	Erde	0,07
		Schnee	0,60 ... 0,70
		Haut	0,45

a)

Material	Dicke in mm	Transmissionsgrad	Reflexionsgrad
Klarglas	1 ... 4	0,90 ... 0,92	0,06 ... 0,08
Trübglas	2 ... 3	0,36 ... 0,66	0,31 ... 0,54
weißes Gewebe (Baumwolle)		0,30 ... 0,70	0,30 ... 0,60
Kunststoff (weiß, getrübt)	2 ... 3	0,40 ... 0,60	0,20 ... 0,40

b)

Tabelle 1.11 Reflexions- und Transmissionsgrade einiger Materialien im sichtbaren Spektralbereich (z. T. aus [1.26])

Wenn infolge der Lichteinstrahlung im beleuchteten Stoff keine eigene Emission erfolgt, so gilt aus Energieerhaltungsgründen

$$\rho + \tau + \alpha = 1. \quad (1.42)$$

1.2.8.2 Ergänzende Stoffkennzahlen

Andere Kennzahlen für das Transmissionsverhalten sind die *Opazität (Trübungsgrad)*, welche z. B. in der Bauphysik verwendet wird

$$O = \frac{1}{\tau} \quad (1.43)$$

und die *optische Dichte (Extinktion)*

$$D_{\tau} = \lg O = \lg \frac{1}{\tau}. \quad (1.44)$$

Da das Transmissionsverhalten dickenabhängig ist (Bouguer-Lambert-Gesetz), hat man neben dem Transmissionsgrad noch den natürlichen Absorptionskoeffizienten a_n (Verhältnis unterschiedlicher Größen) eingeführt (Maßeinheit: cm^{-1}):

$$a_n = \frac{\ln \frac{I}{I_0}}{d} = 2,3 \cdot \frac{D_{\tau}}{d}; \quad (1.45)$$

d Dicke des Materials in cm.

Der reziproke Wert von a_n wird gelegentlich als Eindringtiefe des Lichtes bezeichnet.

Leuchtdichtestoffkennzahlen. Sie werden verwendet, wenn interessiert, wie sich die Leuchtdichteverhältnisse nach der Wechselwirkung der Strahlung mit einem Objekt verändert haben. Der *Leuchtdichtefaktor* (Verhältnis gleicher Größen)

$$\beta = \frac{L_{\beta}}{L_W}; \quad (1.46)$$

L_{β} Leuchtdichte des zu charakterisierenden Materials in einer Richtung,

L_W Leuchtdichte einer mattweißen Fläche,

wird sowohl für transmittierende (Transluzenzgrad) als auch für reflektierende Stoffe (Remissionsgrad) angegeben.

Der Leuchtdichtekoeffizient q ist richtungsabhängig und bezieht die Leuchtdichte auf die in dem betrachteten Punkt herrschende Beleuchtungsstärke:

$$q(\gamma, \beta) = \frac{L(\gamma, \beta)}{E} \quad (1.47)$$

Er dient zur Beschreibung der Reflexion bei nichtmatten Oberflächen.

Rückstrahlwert (eines Rückstrahlers) ist das Verhältnis der in einer Richtung γ zurückgestrahlten Lichtstärke $I(\gamma)$ und der Beleuchtungsstärke E_{\perp} am Rückstrahler bei senkrechtem Lichteinfall und wird in erster Linie für die Charakterisierung retroreflektierender Stoffe verwendet:

$$R = \frac{I(\gamma)}{E_{\perp}} \quad (1.48)$$

Die Einheit ist Millicandela je Lux (mcd/lx).

Streuverhalten der Stoffe. Materialien und Systeme streuen das auftreffende Licht sehr unterschiedlich.

Bild 1.21 zeigt dies am Beispiel Reflexion.

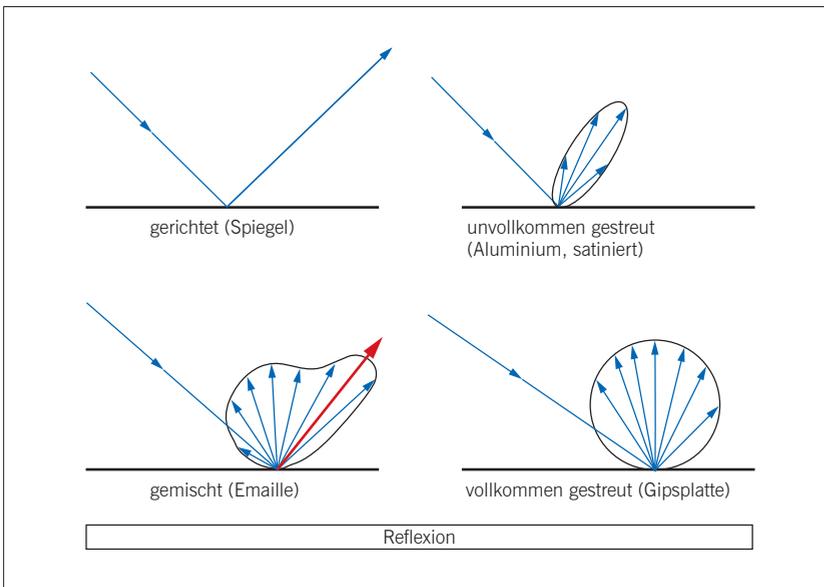


Bild 1.21
Streuverhalten
an Grenzflächen
am Beispiel
Reflexion
(Quelle: Völker)

Wenn keine Streuung des Lichtes auftritt, spricht man von *gerichteter Transmission* oder *Reflexion* (**Bild 1.21**, links oben). Wird das Licht dagegen in alle Richtungen gleichmäßig gestreut, so liegt *diffuse Reflexion* bzw. *Transmission* vor (**Bild 1.21** rechts unten). Zwischen diesen beiden Extremen können alle möglichen Varianten (gemischtes Verhalten) auftreten. Das Streuverhalten kann entweder durch die relative Lichtstärkeverteilungskurve oder durch entsprechende Maßzahlen beschrieben werden. So gibt der *Halbwertswinkel* $\gamma_{1/2}$ an, bei welchem Winkel noch 50 % der maximalen Lichtstärke vorhanden sind, und der *Zehntelwertswinkel* $\gamma_{1/10}$ den Winkel, bei dem nur noch 10 % vorhanden sind **Bild 1.22**.

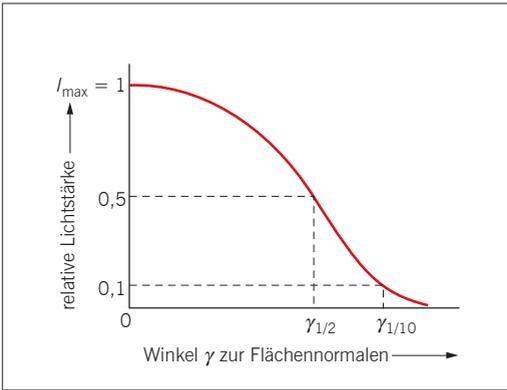


Bild 1.22 Halbwerths- und Zehntelwertswinkel
(Quelle: Baer)

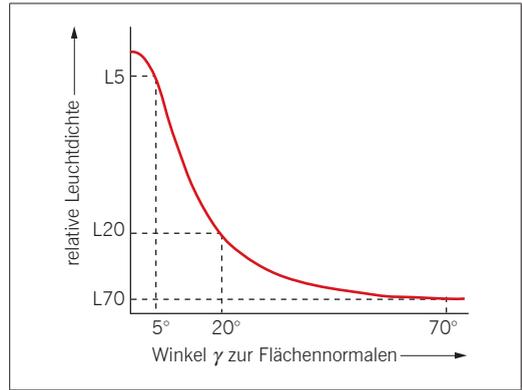


Bild 1.23 Definitionsgrößen für das Streuvermögen
(Quelle: Baer)

Diese Kennzahlen werden zur Klassifizierung von Leuchten herangezogen. Für lichttechnische Baustoffe mit starker Streuung gibt man entweder das **Streuvermögen** (**Bild 1.23**)

$$\sigma = \frac{L_{70} + L_{20}}{2L_5} ; \tag{1.49}$$

$L_{70, 20, 5}$ Leuchtdichte bei 70°, 20° und 5° Streuwinkel (Beleuchtung senkrecht zur Fläche),

oder die **Glanzkennzahl** (**Bild 1.24**) [1.18] an:

$$\xi = \frac{\beta_{25}}{\beta_0} = \frac{L_{25}}{L_0} ; \tag{1.50}$$

$L_{0, 25}$ Leuchtdichte bei 0° bzw. 25° (bei Beleuchtung mit gerichtetem Licht unter 25°),

$\beta_{0, 25}$ Leuchtdichtefaktor bei 0° bzw. 25°.

Mit der **Glanzkennzahl** ξ korreliert die **Glanzempfindung** G :

$$G = 0,5(1 + \xi) . \tag{1.51}$$

Es bedeuten

- $G = 1$ kein Glanz,
- $G = 1,3 \dots 1,7$ geringer Glanz,
- $G = 1,7 \dots 3,1$ mittlerer Glanz,
- $G = 3,1 \dots 6,1$ starker Glanz,

Als Maß für den Glanz kann auch ein sogenannter Reflektometerwert R' angegeben werden [1.27].

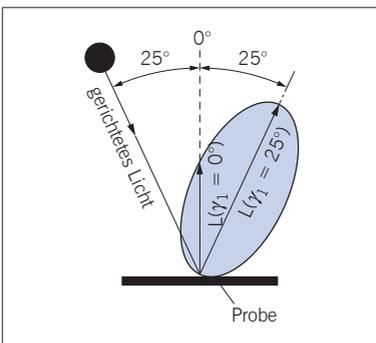


Bild 1.24 Bedingungen zur Glanzdefinition
(Quelle: Baer)

1.2.8.3 Wirkungsgrade

Bei den folgenden Wirkungsgraden handelt es sich nicht immer um Wirkungsgrade im physikalischen Sinne, sondern um Größenverhältnisse (u. U. dimensionsbehaftete Größen!):

Strahlungsausbeute

$$\eta_e = \frac{\Phi_e}{P}, \text{ Einheit: W/W;} \quad (1.52)$$

P aufgewendete Leistung.

Lichtausbeute

$$\eta = \frac{\Phi}{P}, \text{ Einheit: lm/W} \quad (1.53)$$

(Werte für η siehe Abschnitt 2.1)

optischer Nutzeffekt

$$O = \frac{\int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \Phi_{e,\lambda} \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda} \cdot d\lambda}, \quad (1.54)$$

visueller Nutzeffekt

$$\text{für die Gesamtstrahlung: } V = \frac{\int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda} \cdot d\lambda}, \quad (1.55)$$

$$\text{für das sichtbare Gebiet: } V_{\text{vis}} = \frac{\int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \Phi_{e,\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \Phi_{e,\lambda} \cdot d\lambda} = \frac{V}{O}. \quad (1.56)$$

Leuchtenwirkungsgrade

Optischer Wirkungsgrad einer Leuchte

$$\eta_L = \frac{\Phi_L}{\Phi_{La}}; \quad (1.57)$$

Φ_L Lichtstrom, der die Leuchte verlässt,

Φ_{La} Lichtstrom der in der Leuchte vorhandenen Lampe(n).

Betriebswirkungsgrad einer Leuchte

$$\eta_{LB} = \frac{\Phi_L(t_L)}{\Phi_{La}(t)}; \quad (1.58)$$

$\Phi_L(t_L)$ Lichtstrom der Leuchte bei der Leuchtenumgebungstemperatur t_L ,

$\Phi_{La}(t)$ Lichtstrom der Lampen in der Leuchte bei einer vorgegebenen Temperatur t .

Der *Nutzwirkungsgrad* ergibt sich aus dem Lichtstromanteil, der auf eine interessierende Nutzfläche (Index N) auftrifft. Man bezieht ihn entweder auf die Lampen- (Φ_{La}) oder die Leuchtenlichtströme (Φ_L):

Beleuchtungswirkungsgrad

$$\eta_B = \frac{\Phi_N}{\Phi_{La}(t)}, \quad (1.59)$$

Raumwirkungsgrad

$$\eta_R = \frac{\Phi_N}{\Phi_L(t_L)}. \quad (1.60)$$

Es gilt

$$\eta_B = \eta_R \cdot \eta_{LB}. \quad (1.61)$$

Bezieht sich der Raumwirkungsgrad η_R nur auf die Wirkung einer Leuchte, so bezeichnet man dieses Verhältnis auch als *Leuchtenbündelungs-* oder *Scheinwerferwirkungsgrad*:

$$\eta_{LBü} = \frac{\Phi_N}{\Phi_L}. \quad (1.62)$$

Leuchtdichtewirkungsgrad

$$I = \frac{L}{E}, \text{ Einheit: cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx}). \quad (1.63)$$

Im Gegensatz zum Leuchtdichtekoeffizienten $q(\gamma)$ ist beim Leuchtdichtewirkungsgrad die Beleuchtungsstärke E diejenige Beleuchtungsstärke auf einer festen Bezugsebene; er drückt also aus, wie stark sich die Beleuchtung einer Raumfläche (in den meisten Fällen ist es die Nutzebene) auf die Leuchtdichte einer anderen Fläche (Wand oder Decke) auswirkt (siehe Abschnitt 1.5).

1.2.9 Beziehungen zwischen den Grundgrößen

Der Lichtstromaustausch zwischen einer Sender- und einer Empfängerfläche ist ein zentrales Element in der Lichttechnik. In (1.64) und **Bild 1.25** lassen sich folgende Einflussgrößen identifizieren:

1. Der Abstand zwischen der leuchtenden und der empfangenden Fläche, dessen Quadrat umgekehrt proportional zur übertragenen sichtbaren Strahlungsleistung ist,
2. die Helligkeit der strahlenden Fläche, quantifiziert durch die Leuchtdichte,
3. die Größe und der Neigungswinkel der strahlenden Fläche und
4. die Größe und der Neigungswinkel der empfangenden Fläche.

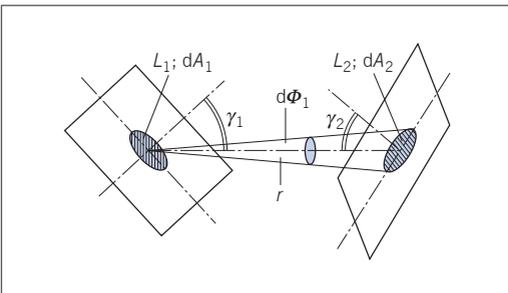


Bild 1.25 Bezeichnungen zum fotometrischen Grundgesetz (Quelle: Baer)

Aus der mathematischen Verknüpfung dieser Größen ergibt sich das *fotometrische Grundgesetz* in differenzieller Form. Alle strahlenden Flächen erhalten den Index 1, alle bestrahlten Flächen den Index 2:

$$d^2\Phi = L \frac{dA_1 \cos \gamma_1 \cdot dA_2 \cos \gamma_2}{r^2} \Omega_0 . \quad (1.64)$$

Mit der Kenntnis der Raumwinkel bzw. der projizierten Raumwinkel

$$d\Omega_1 = \frac{dA_2 \cdot \cos \gamma_2 \cdot \Omega_0}{r^2} \quad \text{und} \quad d\Omega_2 = \frac{dA_1 \cdot \cos \gamma_1 \cdot \Omega_0}{r^2} \quad (1.65)$$

$$\begin{aligned} dA_{p1} &= dA_1 \cdot \cos \gamma_1 \quad \text{und} \quad dA_{p2} = dA_2 \cdot \cos \gamma_2 \\ d\Omega_{p1} &= d\Omega_1 \cdot \cos \gamma_1 \quad \text{und} \quad d\Omega_{p2} = d\Omega_2 \cdot \cos \gamma_2 \end{aligned} \quad (1.66)$$

gelangt man zu folgenden vier Darstellungen des fotometrischen Grundgesetzes:

$$d^2\Phi = L dA_{p1} d\Omega_1 , \quad (1.67)$$

$$d^2\Phi = L dA_1 d\Omega_{p1} , \quad (1.68)$$

$$d^2\Phi = L dA_{p2} d\Omega_2 , \quad (1.69)$$

$$d^2\Phi = L dA_2 d\Omega_{p2} . \quad (1.70)$$

Durch Integration erhält man das fotometrische Grundgesetz in integraler Schreibweise

$$\Phi_1 = \int \int_{\Omega_1 A_1} L \cdot dA_1 \cdot \cos \gamma_1 \cdot d\Omega_1 . \quad (1.71)$$

Wobei das folgende Doppelintegral (1.72) auch als *geometrischer Fluss* bzw. Lichtleitwert oder Etendue bezeichnet wird:

$$G = \iint dA_1 \cdot \cos \gamma_1 \cdot d\Omega_1 . \quad (1.72)$$

Betrachtet man den Lichtstromanteil $d^2\Phi_1$, den ein Flächenelement dA_1 auf die Fläche dA_2 wirft,

$$d^2\Phi_1 = L_1 \cdot dA_1 \cdot \cos \gamma_1 \cdot d\Omega_1 \quad (1.73)$$

und vergleicht ihn mit dem Lichtstromanteil $d^2\Phi_2$, den die Fläche dA_2 auf die Fläche dA_1 einstrahlt, so ergibt sich, dass dieser Lichtstromaustausch dem Verhältnis der Leuchtdichten proportional ist:

$$\frac{d^2\Phi_1}{d^2\Phi_2} = \frac{L_1}{L_2} . \quad (1.74)$$

Darüber hinaus lassen sich aus den vier Darstellungen des fotometrischen Grundgesetzes in differenzieller Form wichtige weitere Gesetze ableiten, die insbesondere für die Anwendung von Bedeutung sind.

Aus (1.71) folgt

$$I = \int L dA_{p1} . \quad (1.75)$$

Aus (1.70) ergibt sich das *Raumwinkelprojektionsgesetz*. Dies ist immer dann anzuwenden, wenn die durch große leuchtende Flächen (z. B. Wände, Fenster, Himmel) verursachte Beleuchtungsstärke in einem Punkt gesucht ist:

$$E = \int L_1 \cdot \cos \gamma_2 \cdot d\Omega_2 = \int L_1 \cdot d\Omega_{p2} . \quad (1.76)$$

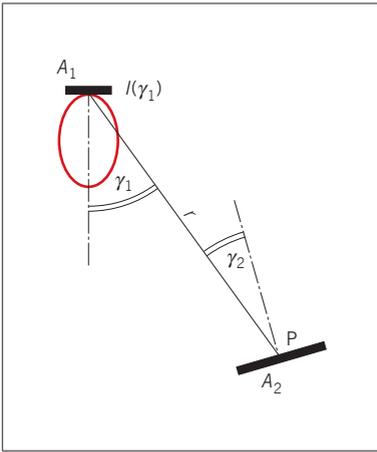


Bild 1.26 Angaben zum fotometrischen Entfernungsgesetz (Quelle: Baer)

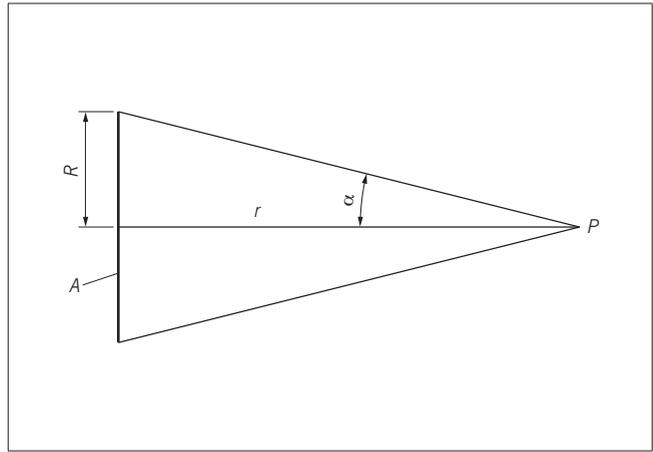


Bild 1.27 Skizze zur Herleitung der fotometrischen Grenzentfernung (Quelle: Völker)

Hat man es mit punktförmigen Strahlern zu tun, d. h. ist die Ausdehnung der Fläche klein gegenüber der Beleuchtungsentfernung, so ergibt sich aus (1.76) und (1.25) das *fotometrische Entfernungsgesetz*

$$E = \frac{l(\gamma_1)}{r^2} \cos \gamma_2 \Omega_0. \quad (1.77)$$

γ_2 ist der Winkel zwischen der Lichtrichtung und dem Lot der beleuchteten Fläche A_2 (**Bild 1.26**). Da reale Strahler eine endliche Ausdehnung haben, macht man bei der Anwendung des fotometrischen Entfernungsgesetzes immer einen Fehler. Die *fotometrische Grenzentfernung* ist die Entfernung, in der dieser Fehler klein genug ist, um eine Lichtquelle als Punktlichtquelle annehmen zu dürfen.

Für eine leuchtende Kreisscheibe A (**Bild 1.27**) mit konstanter Leuchtdichte und lambertscher Abstrahlungscharakteristik kann die Lichtstärke in Richtung der Flächennormalen mit

$$I = A \cdot L = \pi \cdot R^2 \cdot L \quad (1.78)$$

oder

$$I' = E_p \cdot r^2 \cdot \frac{1}{\Omega_0} \quad (1.79)$$

berechnet werden. Je nach Entfernung des Punktes P zur Kreisscheibe unterscheiden sich die beiden Lichtstärken. Bestimmt man zunächst E_p ,

$$E_p = L \cdot \int_{\Omega} \cos \alpha d\Omega = \pi \cdot \Omega_0 \cdot L \cdot \sin \alpha = \pi \cdot \Omega_0 \cdot L \cdot \frac{R^2}{R^2 + r^2} \quad (1.80)$$

folgt

$$I' = E \cdot r^2 \cdot \frac{1}{\Omega_0} = \frac{\pi \cdot L \cdot R^2 \cdot r^2}{R^2 + r^2} \quad (1.81)$$

und damit für das Verhältnis der Lichtstärken

$$\frac{I}{I'} = \frac{R^2 + r^2}{r^2}. \quad (1.82)$$

Zur Ermittlung der exakten Werte für die Lichtstärke einer leuchtenden Kreisscheibe aus der Beleuchtungsstärke, die in der endlichen Entfernung r gemessen wurde, muss man also den aus dem quadratischen

Entfernungsgesetz errechneten Wert mit dem Korrekturfaktor $1 + (R/r)^2$ multiplizieren. Werden für den Quotienten R/r verschiedene Verhältnisse zugrunde gelegt, so erhält man für I/I' folgende Werte:

$\frac{R}{r}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{10}$
$\frac{I}{I'}$	1,250	1,062	1,028	1,016	1,010

Es wird deutlich, dass der Fehler erst dann nennenswert wird, wenn die Entfernung von P zu A den fünf-fachen Radius der Scheibe unterschreitet, beim zehnfachen Radius beträgt er nur noch 1 %. Bei optischen Systemen (Scheinwerfern, Projektoren usw.) kann die Entfernung, ab der man den Strahler als punktförmig annehmen kann (*fotometrische Grenzentfernung*), erheblich größer sein ($R/r < 1/20$).

1.2.10 Berechnung einfacher Elementarstrahler

1.2.10.1 Zusammenhang zwischen Lichtstärke im Maximum der Ausstrahlung und dem Lichtstrom

Kugel (Bild 1.28 a):

$$\Phi = 4 \cdot \pi \cdot I \cdot \Omega_0, I = \text{konstant}$$

Scheibe (Bild 1.28 b):

$$\Phi = \pi \cdot I(\gamma = 0) \cdot \Omega_0, I(\gamma) = I(\gamma = 0) \cdot \cos \gamma$$

Zylinder (Bild 1.28 c):

$$\Phi = \pi^2 \cdot I(\gamma = 0) \cdot \Omega_0, I(\gamma) = I(\gamma = 0) \cdot \cos \gamma$$

Für Leuchtstofflampen gilt

$$\Phi = 9,2 \cdot I \cdot (\gamma = 0) \cdot \Omega_0 \text{ und } L(\gamma) = L_0 \cdot \cos^{1/2} \gamma$$

Kardioide (Bild 1.28 d):

$$\Phi = 2 \cdot \pi \cdot I(\gamma = 0) \cdot \Omega_0$$

$$I(\gamma) = \frac{I(\gamma = 0)}{2} \cdot (1 + \cos \gamma)$$

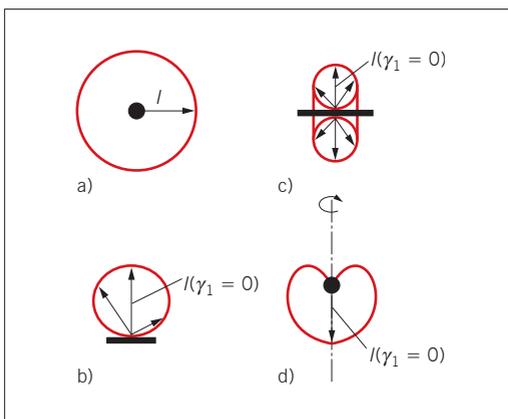


Bild 1.28 Elementarstrahler (Quelle: Baer)

a) Kugel; b) Scheibe; c) Zylinder; d) Kardioide

1.2.10.2 Anwendung des Raumwinkelprojektionsgesetzes auf Lambertstrahler

Strahler, die unter allen Winkeln γ die gleiche Leuchtdichte L aufweisen, werden *Lambertstrahler* (*diffuse Strahler*) genannt. Das gilt sowohl für Primärstrahler (Selbstleuchter) als auch für Sekundärstrahler. Wie im **Bild 1.29** dargestellt, ist für richtungskonstantes L

$$I(\gamma) = I(\gamma = 0) \cdot \cos \gamma \tag{1.83}$$

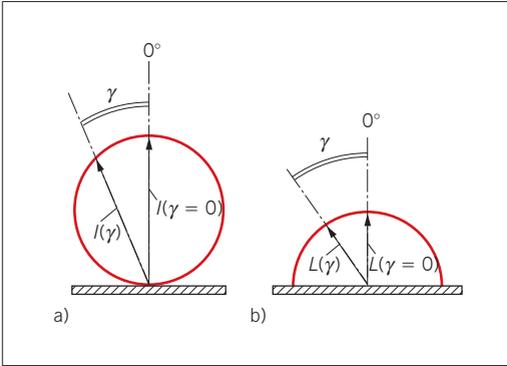


Bild 1.29 Lichtstärke- (a) und Leuchtdichteverteilung (b) eines Lambertstrahlers (Quelle: Baer)

Will man nun die Leuchtdichte eines transparenten *Sekundärstrahlers* mit einer entsprechenden Lambertcharakteristik aus der Beleuchtungsstärke auf dem Körper berechnen, können dafür zwei sehr einfache Beziehungen genutzt werden:

Reflexion:
$$L = \frac{\rho \cdot E}{\pi \cdot \Omega_0} \tag{1.84}$$

Transmission:
$$L = \frac{\tau \cdot E}{\pi \cdot \Omega_0} \tag{1.85}$$

ρ Reflexionsgrad,
 τ Transmissionsgrad.

1.2.10.3 Anwendung des Raumwinkelprojektionsgesetzes für Sekundär- und Primärstrahler

Wenn die Leuchtdichte über der Fläche A_1 konstant ist, vereinfacht sich (1.80) zu

$$E = L \cdot \Omega_p \tag{1.86}$$

Für einige Spezialfälle [1.9] kann man über die Raumwinkelprojektion die Beleuchtungsstärke E im Punkt P auf der Empfängerfläche explizit angeben:

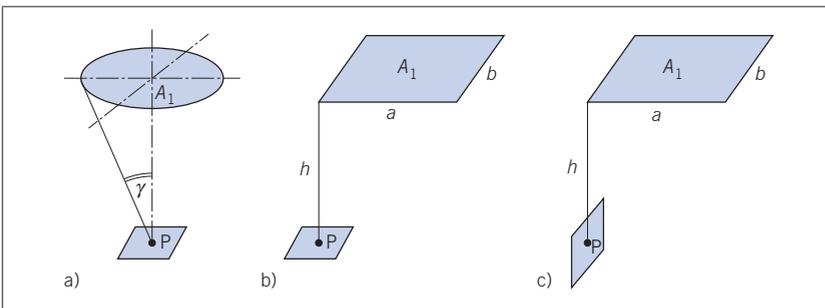


Bild 1.30 Beleuchtungsstärke unter einigen geometrischen Lambertstrahlern (Quelle: Serick)
 a) Kreisscheibe;
 b) und c) Rechteck

Unter der Mitte einer Kreisscheibe, parallel zur Fläche A_1 (**Bild 1.30 a**)

$$E = \pi \cdot L \cdot \sin^2 \gamma \cdot \Omega_0 \quad (1.87)$$

Unter der Ecke eines Rechtecks, parallel zur Fläche A_1 (**Bild 1.30 b**)

$$E = \frac{L}{2} \left[\frac{a}{\sqrt{a^2 + h^2}} \cdot \arctan \frac{b}{\sqrt{a^2 + h^2}} + \frac{b}{\sqrt{b^2 + h^2}} \cdot \arctan \frac{a}{\sqrt{b^2 + h^2}} \right] \cdot \Omega_0 \quad (1.88)$$

Unter der Ecke eines Rechtecks, senkrecht zur Fläche A_1 (**Bild 1.30 c**)

$$E = \frac{L}{2} \left[\arctan \frac{b}{h} - \frac{h}{\sqrt{a^2 + h^2}} \cdot \arctan \frac{b}{\sqrt{a^2 + h^2}} \right] \cdot \Omega_0 \quad (1.89)$$

1.2.10.4 Berechnung der Beleuchtungsstärke mittels zonalem Lichtstromverfahren

Für beliebige rotationssymmetrische Verteilungen kann man den Lichtstrom bestimmen, wenn man den Lichtstärkeverteilungskörper in Kugelschichten (siehe **Bild 1.31**) mit konstanter Winkeldifferenz $\Delta\gamma = \gamma_1 - \gamma_2$ zerteilt, die einzelnen Zonen mit den Lichtstärken, die den Zonen zugeordnet sind, multipliziert und die so erhaltenen Lichtstromanteile summiert. Aus (1.11) folgt für $\Delta\gamma = 10^\circ$

$$\Delta\Omega = 4 \cdot \pi \cdot \sin 5^\circ \cdot \sin \gamma_m \cdot \Omega_0 = 1,095 \cdot \sin \gamma_m \cdot \Omega_0, \quad (1.90)$$

$$\gamma_m = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2}. \quad (1.91)$$

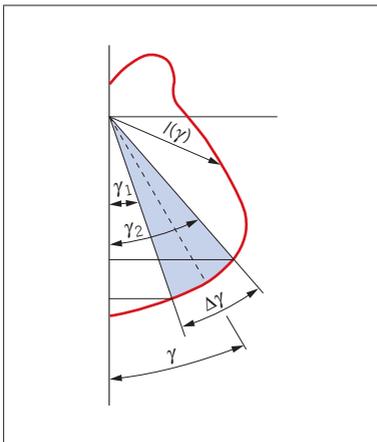


Bild 1.31 Bezeichnungen
beim zonalen Lichtstromverfahren
(Quelle: Baer)

Ein Muster für dieses *zonale Lichtstromverfahren* zeigt **Tabelle 1.12**. Der Gesamtlichtstrom ergibt sich dann zu:

$$\Phi_{\text{ges}} = \sum_{\gamma_m=5^\circ}^{\gamma_m=175^\circ} \Delta\Omega(\gamma) \cdot I(\gamma).$$

Für langgestreckte Leuchten und nichtrotationssymmetrische Lichtstärkeverteilungen gibt es spezielle Streifenverfahren [1.28].

γ_m	$\Delta\Omega(\gamma)$ in sr	$I(\gamma)$ in cd	$\Delta\Omega(\gamma) \cdot I(\gamma)$ in lm	γ_m	$\Delta\Omega(\gamma)$ in sr	$I(\gamma)$ in cd	$\Delta\Omega(\gamma) \cdot I(\gamma)$ in lm
5°	0,095			95°	1,091		
15°	0,283			105°	1,058		
25°	0,463			115°	0,993		
35°	0,628			125°	0,897		
45°	0,774			135°	0,774		
55°	0,897			145°	0,628		
65°	0,993			155°	0,463		
75°	1,058			165°	0,283		
85°	1,091			175°	0,095		

Tabelle 1.12 Zonales Lichtstromverfahren für eine rotationssymmetrische Lichtverteilungskurve

Zur Beschreibung der mittleren Wirkung einer lichttechnischen Größe bedient man sich meist des gewichteten arithmetischen Mittels, wobei die Beleuchtungsstärken und Reflexionsgrade flächenbezogen

$$\bar{E} = \frac{\int E \cdot dA}{\int dA} \approx \frac{\sum_{v=1}^n E_v \cdot A_v}{\sum_{v=1}^n A_v}, \tag{1.92}$$

$$\rho_m = \frac{\int \rho \cdot dA}{\int dA} \approx \frac{\sum_{v=1}^n \rho_v \cdot A_v}{\sum_{v=1}^n A_v} \tag{1.93}$$

und die Leuchtdichte entweder flächen- oder raumwinkelbezogen gewichtet werden:

$$\bar{L} = \frac{\int L \cdot d\Omega}{\int d\Omega} \approx \frac{\sum_{v=1}^n L_v \cdot A_v}{\sum_{v=1}^n A_v}. \tag{1.94}$$

Eine einfache arithmetische Mittelung kann erfolgen, wenn man mit gleichgroßem Flächen- oder Raumwinkelraster arbeitet. Für die mittlere Beleuchtungsstärke im **Bild 1.32** gilt z. B.

$$\bar{E} = \frac{\sum_{v=1}^n E_v}{n} \tag{1.95}$$

bzw.

$$\rho_m = \frac{\sum_{v=1}^n \rho_v}{n}. \tag{1.96}$$

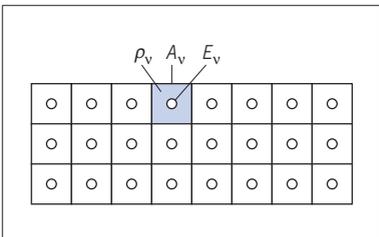


Bild 1.32 Raster für die Mittelwertbildung (Quelle: Baer)

1.2.11 Grundbegriffe der Beleuchtungsoptik

AUTOREN: PAOLA BELLONI, STEFAN SÖLLNER

Die Optik untersucht die physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Lichtausbreitung. Die historische Entwicklung dieser Wissenschaft brachte verschiedene Beschreibungsmodelle hervor, und die Vereinfachung optischer Phänomene auf das Notwendige erlaubt es, mit verschiedenen Modellen zu arbeiten.

Ist ein Objekt um ein Vielfaches größer als die Wellenlänge des auftreffenden Lichts, lassen sich optische Systeme mit ausreichender Genauigkeit mit der *geometrischen Optik* entwerfen. In der geometrischen Optik wird Licht als Strahl modelliert, der Phänomenen wie Brechung und Reflexion unterliegt. Entsprechen die Abmessungen eines Objekts hingegen der Größenordnung der Wellenlänge, werden Beugungseffekte wirksam, die mit der *Wellenoptik* beschrieben und erklärt werden.

Mit der Wellenoptik lassen sich alle Wellenphänomene des Lichts beschreiben, z. B. Interferenz. Das physikalische Fundament bilden die Maxwell-Gleichungen der Elektrodynamik, die auch grundlegendere Untersuchungen, wie z. B. die Ausbreitung von optischen Vektorfeldern in Materie erlauben (**Bild 1.33**).

Das momentane theoretische Dach der Optik bildet die Quantenoptik, mit der auch die Wechselwirkung zwischen Licht und Materie durch „Lichtquanten“ erklärt werden kann (z. B. Absorption, Emission, Dispersion). Für die Lichttechnik hat die Quantenoptik jedoch keine praktische Bedeutung.

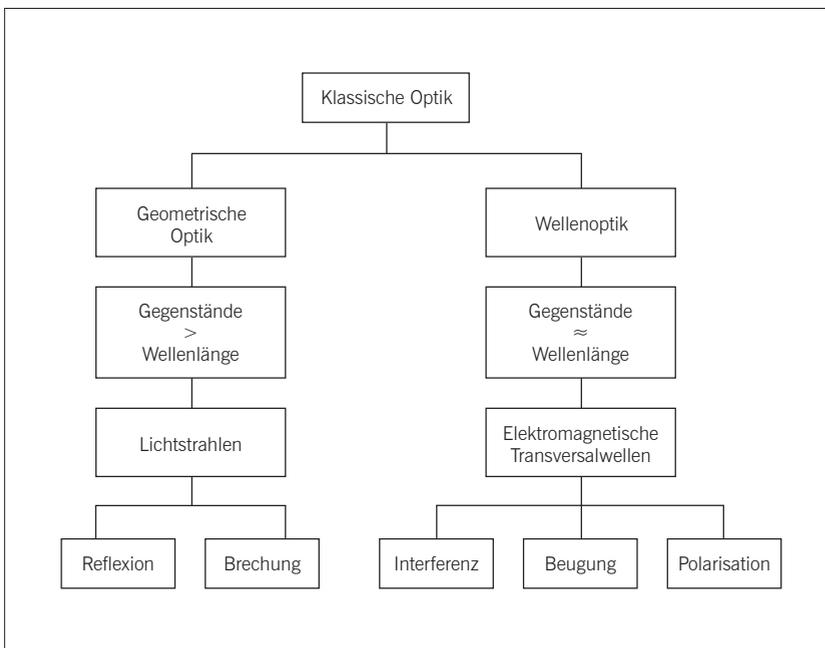


Bild 1.33
Bereiche der Optik
(Quelle: Belloni nach [1.254])

Technische Optik

Im Unterschied zur Optik interessiert sich die Lichttechnik vorrangig für die energetischen Fragen, die im Zusammenhang mit Licht und dessen Wirkung auf das Auge stehen. Dennoch haben die Disziplinen naturgemäß viele Berührungspunkte, daher soll in diesem Kapitel auf die grundlegenden Begriffe der technischen Optik in der Beleuchtung eingegangen werden.

Die *technische Optik* ist im Gegensatz zur physikalischen Optik eine Ingenieurwissenschaft und beschäftigt sich mit optischen Phänomenen in der Anwendung. Entwurf, Berechnung und Bau von optischen Systemen sind die Ziele der technischen Optik. Sie bedient sich im Allgemeinen aus den Bereichen der geometrischen Optik und der Wellenoptik.

Der weitaus wichtigere Aspekt in der Lichttechnik ist ein Gebiet der technischen Optik, die *nichtabbildende Optik*. Das Ziel der nichtabbildenden Optik ist, Strahlung möglichst effizient zu übertragen, um eine genau

definierte Lichtverteilung und Beleuchtungsstärke auf einer definierten Fläche zu erreichen [1.29]. Dies könnten zum Beispiel die normgerechte Beleuchtung eines Straßenabschnitts, die homogene Strahlungsverteilung auf einem lichttechnischen Messinstrument oder die Konzentration von Strahlung sein. Bis zur Einführung der LED als Lichtquelle kamen in der Lichttechnik vorrangig Reflektoren verschiedener Bauformen und Materialien zum Einsatz. Da sich die LEDs fundamental von konventionellen Lichtquellen unterscheiden, ist der Einsatz neuer optischer Systeme zur Lichtlenkung unabdingbar. Mit der Miniaturisierung der LED-Lichtquellen werden vermehrt Linsen und mikroprismatische optische Elemente als lichtlenkende Komponenten und Diffusoren verwendet. Interessante Anwendungen in Leuchtensystemen werden in 3.3.2 und Bild 3.4.4 dargestellt. Die Vorteile der Reflektor- und Linsentechnik können auch gemeinsam in einer Hybridoptik (3.3.5) kombiniert werden. Dies führt jedoch häufig zu einem geringeren optischen Gesamtwirkungsgrad. Für die Lichttechnik ist die abbildende Optik eher zweitrangig. Mithilfe optischer Instrumente werden Objekte möglichst verzerrungsfrei (bzw. auf die gewünschte Weise verzerrt) abgebildet. Dies bedeutet jedoch nicht, dass die abbildende Optik in der Lichttechnik keine Rolle spielt. Die bildgebende Leuchtdichtemesstechnik sei hier als Beispiel genannt.

1.2.11.1 Geometrische Optik

Eine wichtige Voraussetzung für die Anwendung der Prinzipien der geometrischen Optik ist, dass die zugrunde liegende Wellenlänge des Lichts viel kleiner als die Größe der Objekte oder Bauelemente ist, mit denen das Licht in Wechselwirkung tritt. Unter dieser Bedingung kann das Licht als Strahl angenommen werden. Der Lichtstrahl ist eine mathematische Entität und zeigt in die Ausbreitungsrichtung einer elektromagnetischen Welle, deckungsgleich mit dem Wellenvektor \vec{k} (1.104). Die Welleneigenschaften des Lichts werden in der geometrischen Optik nicht berücksichtigt.

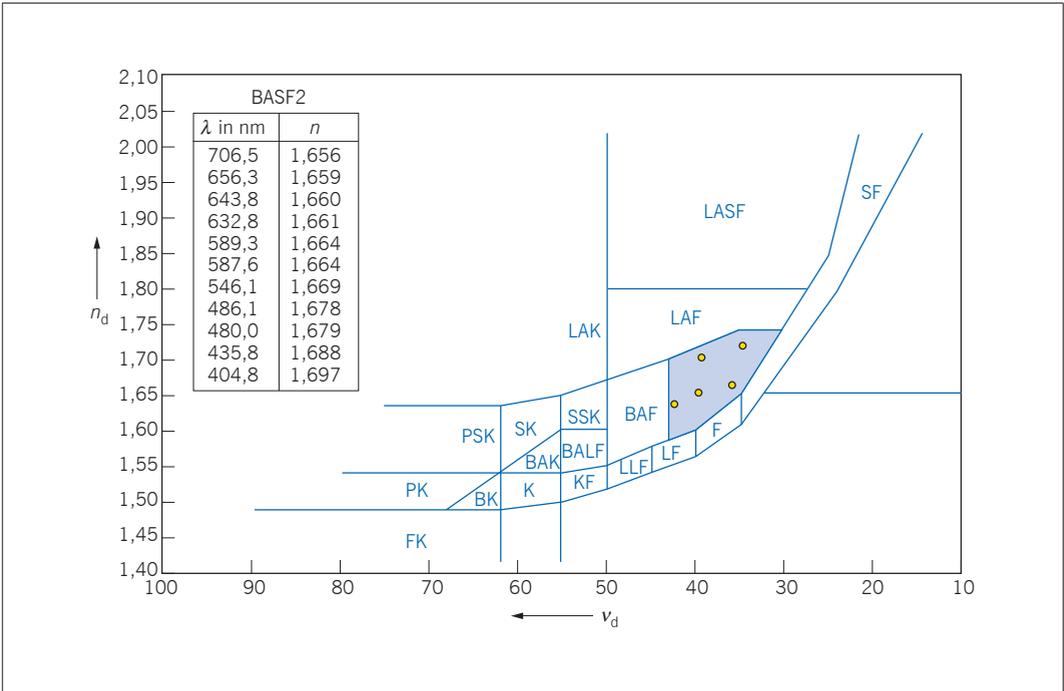


Bild 1.34 Abbe-Diagramm (Bild nach [1.30]). Der Brechungsindex n_d verschiedener optischer Gläser ist gegen die Abbe Zahl v_d aufgetragen. Als Beispiel ist für das Glas „N-BASF2“ (schraffierte Fläche) der Brechungsindex in Abhängigkeit von der Wellenlänge tabellarisch eingefügt. (Quelle: Söllner)

Brechungsindex

Der auch als Brechzahl bezeichnete *Brechungsindex* n_m zeigt an, um welchen Faktor die Phasengeschwindigkeit optischer Strahlung in einem Medium kleiner ist als im Vakuum:

$$n_m = \frac{c_0}{c_m} . \quad (1.97)$$

wobei c_0 und c_m die Lichtgeschwindigkeit in Vakuum und in einem Medium sind. Der Brechungsindex von Luft ist mit 1,0003 etwas größer als der im Vakuum. Medien werden als homogen bezeichnet, wenn n konstant ist, und als isotrop, wenn Polarisation und Richtung der Lichtstrahlen keine Rolle spielen. Ein Medium wird je nach Brechungsindex als optisch dichter oder dünner bezeichnet – je größer n , desto dichter das Medium.

Die Lichtgeschwindigkeit in einem Medium ist im Allgemeinen nicht konstant, sondern hängt von der Wellenlänge ab. Damit variiert auch der Brechungsindex mit der Wellenlänge der Strahlung. Dies führt zum Phänomen der *Dispersion*, was insbesondere bei der Konstruktion abbildender Optiken berücksichtigt werden muss.

Für eine vollständige Beschreibung der Dispersion eines Materials (z. B. einer Glassorte) muss daher die Funktion $n(\lambda)$ angegeben werden. Zur Charakterisierung der Dispersion wird oft ein einziger Parameter, die *Abbe-Zahl* v_d benutzt.

$$v_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} , \quad (1.98)$$

wobei n_d , n_F und n_C die Brechungsindizes des Materials bei den Wellenlängen der entsprechenden Fraunhoferlinien von Helium und Wasserstoff sind (d (He) = 587,5618 nm, F (H) = 486,1327 nm, C (H) = 656,2725 nm). Je kleiner v_d , desto größer ist die Dispersion. Gläser mit $v_d > 50$ werden als *Krongläser* bezeichnet, wohingegen Gläser mit $v_d < 50$ *Flintgläser* genannt werden. Die Glashersteller liefern Diagramme, in denen n_d in Abhängigkeit von v_d angegeben ist (**Bild 1.34**).

Brechung und Reflexion

Die beiden wichtigsten Phänomene in der geometrischen Optik sind die *Brechung* und die *Reflexion*, die aus dem Fermatschen Prinzip abgeleitet werden können. Nach diesem Prinzip legt ein Lichtstrahl genau den optischen Weg L zwischen zwei Punkten x_1 und x_2 zurück, für den er die geringste Zeit benötigt. Der optische Weg ist durch ein Linienintegral längs des Strahls gegeben, wobei der Brechungsindex n vom optischen Weg abhängt:

$$L = \int_{x_1}^{x_2} n \, ds . \quad (1.99)$$

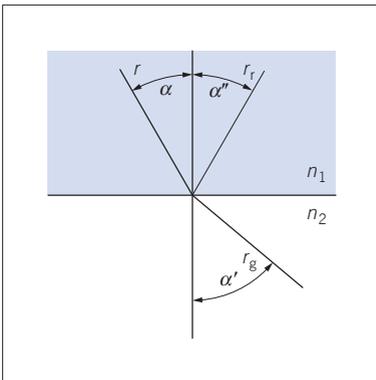


Bild 1.35 Brechung und Reflexion an der Grundfläche zwischen zwei Medien mit verschiedenen Brechungsindices (Quelle: Söllner)

Die Suche nach den Extrema des optischen Wegs führt am Übergang zwischen zwei Materialien mit den Brechungsindices n_1 und n_2 zum Brechungsgesetz von Snellius:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \alpha' . \quad (1.100)$$

Wechselt der Lichtstrahl in ein dichteres Medium, wird er zur Oberflächennormalen hin gebrochen, wechselt er in ein dünneres Medium, wird er von der Oberflächennormalen weg gebrochen (**Bild 1.35**).

Im Falle einer Reflexion entspricht der Winkel des einfallenden Lichtstrahls dem Winkel des ausfallenden Lichtstrahls:

$$\alpha'' = -\alpha . \quad (1.101)$$

Ein weiterer wichtiger Begriff ist die *Totalreflexion*, die dann auftritt, wenn Licht an einer Grenzfläche von einem optisch dichteren Medium n_1 in ein dünneres Medium n_2 wechseln würde, dabei aber der Einfallswinkel einen gewissen Grenzwinkel, den kritischen Winkel der Totalreflexion α_{Gr} , überschreitet. α_{Gr} ergibt sich anhand des Brechungsgesetzes nach Snellius

$$\alpha_{Gr} = \arcsin \frac{n_2}{n_1} . \quad (1.102)$$

Eine wichtige Anwendung der Totalreflexion stellt die Leitung von Lichtwellen in Lichtwellenleitern dar (Bilder 3.13, 3.14, 3.15). Im Idealfall einer perfekt bearbeiteten Oberfläche findet der Lichttransport ohne energetische Verluste statt und bietet deswegen sowohl in der Nachrichtentechnik als auch in der Medizintechnik für die Beleuchtung von Hohlräumen viele Vorteile. Dieses Prinzip wird auch in Beleuchtungssystemen verwendet um z. B. Licht in eine Kunststoffplatte einzukoppeln und entlang einer Fläche zu transportieren um dann durch mikroprismatische Strukturen ausgekoppelt zu werden (Bild 3.44 a).

1.2.11.2 Wellenoptik

In der Wellenoptik wird Licht als elektromagnetische Transversalwelle beschrieben, wobei sich elektrische und magnetische Wechselfelder mit Lichtgeschwindigkeit von einer Quelle entfernen. Der Wellenoptik liegen die Maxwell-Gleichungen zur Berechnung der elektrischen Feldstärke E und der magnetischen Feldstärke H zugrunde:

$$\begin{aligned} \nabla E - \epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0 \left(\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \right) &= 0 \\ \nabla H - \epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0 \left(\frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \right) &= 0 . \end{aligned} \quad (1.103)$$

Dabei ist ϵ_r die relative Permittivität, ϵ_0 die elektrische Feldkonstante, μ_r die relative Permeabilität und μ_0 die magnetische Feldkonstante. Das einfachste Beispiel einer Lösung von (1.103) ist die monochromatische, ebene Welle:

$$E(r, t) = E_0 \cdot \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \varphi_0) \quad (1.104)$$

mit dem Wellenvektor $\vec{k} = 2\pi/\lambda \vec{e}$, \vec{e} ist der Einheitsvektor, die Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ und der Phasenwinkel φ_0 . Die ebene Welle läuft in eine beliebige Raumrichtung, die durch den Vektor \vec{k} symbolisiert wird. Sie kann durch eine *kollimierte* (d. h. parallelgerichtete) Lichtquelle approximiert werden.

Die Amplitude E am Ort r zum Zeitpunkt t entspricht dem Produkt der maximalen Amplitude E_0 und dem Kosinus der Phase $\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \varphi_0$.

Abschließend, sei bemerkt, dass auch in der Wellentheorie der Lichtstrahl der geometrischen Optik eine sinnvolle Bedeutung hat; er entspricht der Normalen auf einer Wellenfläche.

Kohärenz

Lichtquellen erzeugen im Allgemeinen inkohärentes Licht, d. h. die Wellenzüge des Lichts haben keine feste Phasenlage zueinander. Zeitlich und räumlich kohärente Wellenzüge entstehen, wenn die Ausstrahlung einer Lichtquelle eine kleine Winkelausdehnung hat und monochromatisches Licht erzeugt. Wenn nun kohärente Wellen überlagert werden, ergeben deren Superpositionen eine stabile Mode (Interferenz). Der Zustand der *Kohärenz* ist nicht perfekt herzustellen, daher spricht man von Licht mit einem *Kohärenzgrad* und einer *Kohärenzlänge* (z. B. grüne LED $6\ \mu\text{m}$ [1.31], frequenzstabilisierter He-Ne-Laser $> 10\ \text{km}$). Kohärenz ist eine Voraussetzung für die Phänomene Beugung und Interferenz.

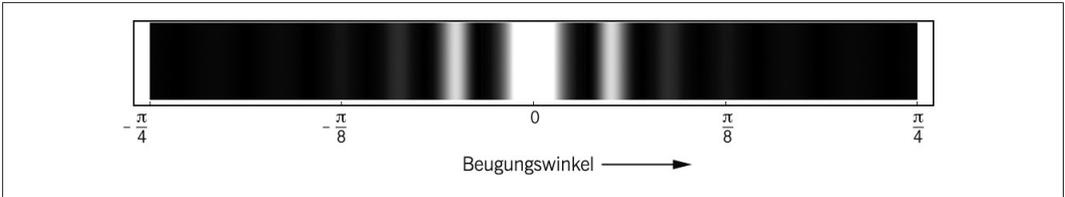


Bild 1.36 Fraunhofer-Beugungsmuster an einem rechteckigen Spalt der Breite s bei monochromatischer Bestrahlung mit der Wellenlänge $\lambda \approx s$. Winkel im Bogenmaß (Quelle: Söllner)

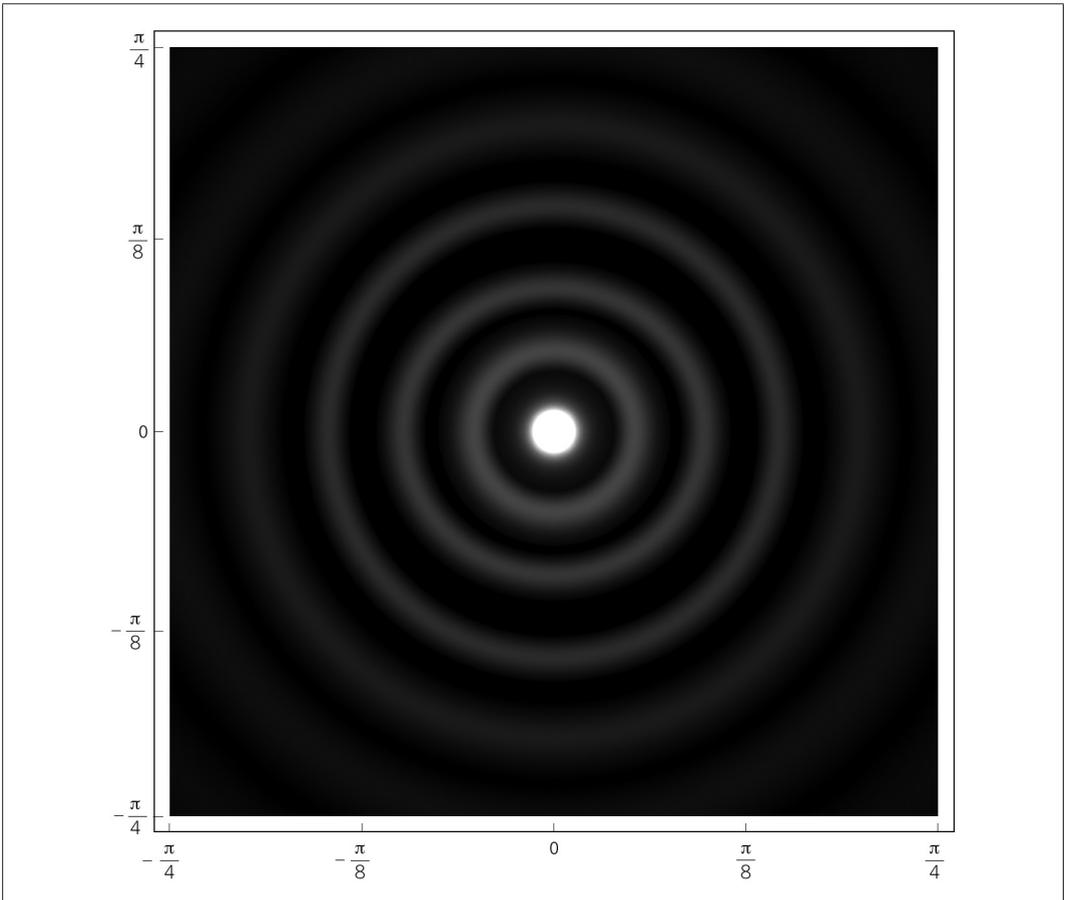


Bild 1.37 Fraunhofer-Beugungsmuster an einer Lochblende mit dem Durchmesser $4,6\ \mu\text{m}$ und $\lambda = 555\ \text{nm}$. Winkel im Bogenmaß (Quelle: Söllner)

Beugung

Wenn Licht auf ein Objekt trifft, würde die geometrische Optik in der Verlängerung der Lichtstrahlen, die die Kanten des Objektes „berühren“, einen perfekten Schattenwurf vorhersagen. Dies ist jedoch nicht der Fall. Das Licht wird immer in Abhängigkeit seiner Wellenlänge gebeugt. Die z. B. an einem Spalt hervortretenden Beugungsmuster werden immer deutlicher, wenn sich die Breite s des Spaltes der Größe von λ annähert. Das Phänomen der Beugung kann vereinfacht durch das Fresnel-Huygens-Prinzip beschrieben werden. Hier bildet jeder Punkt eines beugenden Objektes eine Sekundärwelle, deren Frequenz mit der Frequenz der Primärwelle übereinstimmt. Die resultierende Amplitude E wird in jedem nachfolgenden Punkt durch die Überlagerung aller Sekundärwellen beschrieben. Dies ist das *Beugungsintegral*, dessen Lösung von Fraunhofer für das Fernfeld und von Fresnel für das Nahfeld angenähert wurde (**Bild 1.36**).

Ein praktisch wichtiger Fall ist die Beugung monochromatischer Strahlung an einer kreisförmigen *Lochblende* mit dem Durchmesser d (**Bild 1.37**). Das Beugungsmuster, welches abwechselnd aus hellen und dunkeln Ringen besteht wird auch als Airy'sche Beugungsscheiben bezeichnet. Auf das zentrale Maximum entfallen dabei etwa 84 %, während die Strahlungsintensität der Ringe in der Peripherie abnimmt.

Der Winkel α des Randes des zentralen Beugungsscheibchens ist gegeben durch

$$\sin \alpha = 1.22 \frac{\lambda}{d}. \quad (1.105)$$

Interferenz

Werden Überlagerungsmuster von zwei unabhängigen Lichtstrahlen gleicher Wellenlänge hervorgerufen, spricht man von *Interferenz*. Das bekannteste Experiment ist das *Doppelspaltexperiment von Young*.

Konstruktive Interferenz, d. h. Verstärkung der beiden Wellen, ergibt sich, wenn der Gangunterschied Δl der beiden Ausgangswellen ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge ist (1.106 a). Destruktive Interferenz, d. h. Auslöschung, tritt ein, wenn der Gangunterschied ein ungeradzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge beträgt (1.106 b)

$$\begin{aligned} \Delta l &= m\lambda \\ \Delta l &= (2m+1)\lambda/2, \end{aligned} \quad (1.106)$$

wobei m eine natürliche Zahl ist, d. h. $m = 0, 1, 2, 3 \dots$

Wenn nun die Anzahl der Spalte von konstanter Breite b äquidistant erhöht wird, entsteht ein *optisches Gitter* (siehe **Bild 1.38**), das insbesondere als Reflexionsgitter seinen Einsatz in Monochromatoren oder Spektrometern findet. Die *Gitterkonstante* g wird dann in Linien/mm angegeben; sie zeigt den Abstand zwischen den Spalten an und beeinflusst die Anzahl der Nebenmaxima der resultierenden Strahlungsverteilung, beschrieben von der Gleichung:

$$E(\varphi) = E(0) \left[\frac{\sin \left(\frac{n\pi g \sin \varphi}{\lambda} \right)}{\sin \left(\frac{\pi g \sin \varphi}{\lambda} \right)} \right]^2; \quad (1.107)$$

b Spaltbreite,

n Spaltanzahl,

g Gitterkonstante.

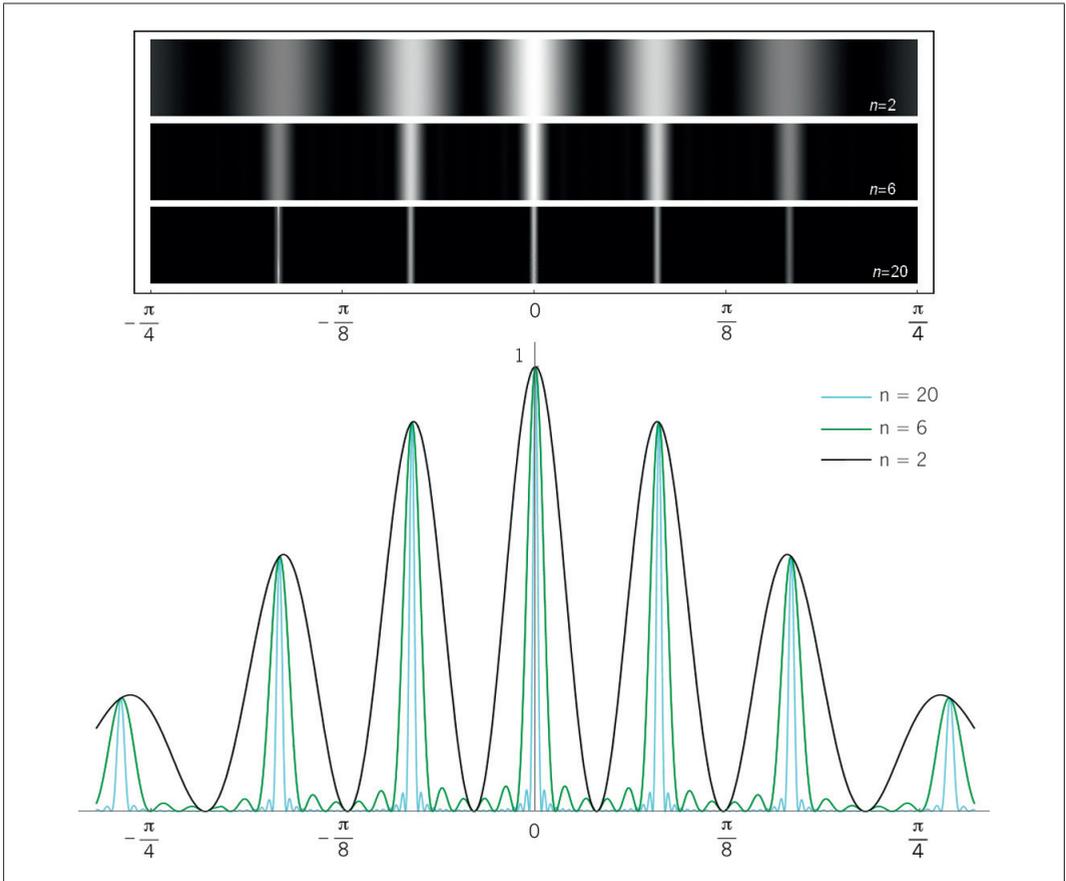


Bild 1.38 Relative Intensität gegenüber dem Winkel im Bogenmaß nach einem Gitter mit unterschiedlicher Spaltanzahl n sowie $g=500\text{ mm}$, $\lambda=555\text{ nm}$ und $b=400\text{ nm}$ (Quelle: Söllner)

Auch an einer planparallelen Platte (**Bild 1.39**) kommt es infolge von Vorder- und Rückreflexion zu zwei Wellenzügen, die einen optischen Wegunterschied ΔL und eine Phasendifferenz $\Delta\varphi$ aufweisen

$$\begin{aligned}\Delta L &= 2nd\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \\ \Delta\varphi &= \frac{4\pi d}{\lambda}\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} .\end{aligned}\quad (1.108)$$

Nach der Reflexion werden deshalb einige Wellenlängen ausgelöscht und andere verstärkt (1.106).

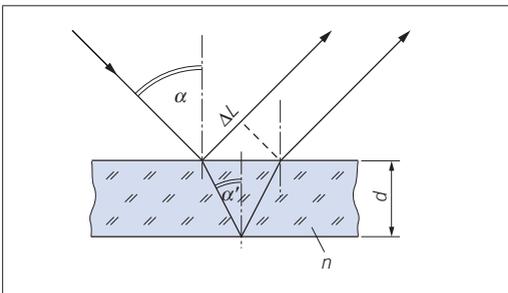


Bild 1.39 Optischer Wegunterschied einer planparallelen Platte mit Brechungsindex n und Dicke d (Quelle: Söllner)

Polarisation

Eine wichtige Eigenschaft von elektromagnetischen (transversalen) Wellen ist ihre *Polarisation*. Ungeordnete elektromagnetische Wellen schwingen in alle Richtungen; werden diese durch einen Polarisator geschickt, entsteht eine Polarisationsrichtung. Eine lineare Polarisation kann durch Prismen, Filter oder Reflektoren erzeugt werden. Möchte man das Licht zirkular polarisieren, ist zusätzlich eine *Phasenplatte* erforderlich, die eine Phasendifferenz zwischen senkrecht zueinander schwingenden Wellen erzeugen (**Bild 1.40**). Beträgt diese Differenz $\pi/2$, verlässt zirkular polarisiertes Licht das sogenannte $\lambda/4$ -Plättchen (z. B. Kalkspat mit einer Dicke von 0,5833 mm für die Natrium D_1 -Linie). Die Polarisation wird in der Fotografie, von LC-Elementen, im 3D-Kino, in der Spannungsoptik oder beim Angeln verwendet. Meist wird der Effekt ausgenutzt, dass linear polarisiertes Licht von einem weiteren Polarisator in Abhängigkeit seines Winkels θ zur Schwingungsrichtung abgeschwächt wird

$$\tau(\theta) = (\tau_1 - \tau_2) \cdot \cos \theta + \tau_2 ; \quad (1.109)$$

τ Transmissionsgrad des Polfilters,
 τ_1 maximaler Transmissionsgrad,
 τ_2 minimaler Transmissionsgrad.

Polarisiertes Licht kann von einigen Lebewesen wahrgenommen werden (z. B. von Fangschreckenkrebsen oder von Menschen [1.32]). Auch bei der Polarisation wird von einem Polarisationsgrad gesprochen, der mit Angaben über die Strahlstärke in verschiedenen Polarisationsrichtungen im 4D Stokes-Vektor (oder im komplexen 2D Jones-Vektor) beschrieben wird.

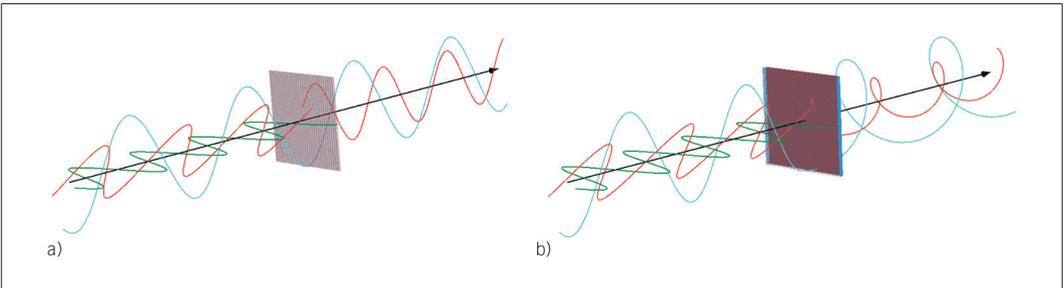


Bild 1.40 a) Lineare und b) zirkulare Polarisation von Licht (Quelle: Söllner)

1.2.11.3 Nichtabbildende Optik – Beleuchtungsoptik

Étendue, optischer Fluss

Der auf die Quellenleuchtdichte bezogene Lichtstrom, der durch ein optisches Element geleitet werden kann, hängt sowohl von dessen Raumwinkelöffnung Ω als auch von der Fläche A seiner Eingangspupille ab. Dies nennt man die *Étendue* G (Lichtleitwert) eines optischen Systems (für geometrischen Fluss siehe auch (1.72))

$$G = n_A^2 \iint \cos \theta dA d\Omega . \quad (1.110)$$

Dabei ist θ der Winkel zwischen dem Normalenvektor des Flächenelements dA und der Strahlungsrichtung, n_A bezeichnet den Brechungsindex an der Fläche A . Die *Étendue* ist eine geometrische Größe, die beim Durchgang von Strahlung durch ein verlustfreies optisches System erhalten bleibt, solange man Streueffekte vernachlässigt. Hieraus folgen Beschränkungen für die Lichtverteilungen, die sich durch optische Systeme erzielen lassen und, anders betrachtet, Mindestmaße für optische Systeme für eine bestimmte Lichtverteilung.

Die Beziehung der Étendue zur Leuchtdichte ist über den Lichtstrom Φ und dem Brechungsindex n definiert:

$$\frac{L}{n^2} = \frac{d\Phi}{dG} = \frac{d\Phi}{n^2 \cos \theta dA d\Omega} . \quad (1.111)$$

Es kann auch ein Verlust an Étendue auftreten, wenn die eingangsseitige Étendue eines optischen Bauelements nicht zu der ausgangsseitigen des vorhergehenden Elements passt. Im Englischen wird dafür der Begriff *dilution* (Verwässerung) verwendet.

Funktionselemente der nichtabbildenden Optik

Im Prinzip sind alle optischen Funktionselemente auch Elemente der nichtabbildenden Optik. In **Tabelle 1.13** sind die wichtigsten Kategorien gelistet. Im Folgenden sollen einige Funktionselemente herausgegriffen werden, die in der Lichttechnik eine besondere Bedeutung haben.

Funktion	Bauteile
Lichtleitung	Linienfolgen, Lichtleitfaser, Laserresonator
Dispersion	Prismen, Gitter
Filterung	Absorptionsfilter, Interferenzfilter
Polarisation	Prismen, Filter, Reflektoren
Lichtlenkung	Reflektoren, Prismen, Linsen
Apertur-, Lichtstromänderung	Neutralglas, Strahlteiler, Mattscheiben
Energiewandler	Lampen, Empfänger

Tabelle 1.13 Funktionselemente in der nichtabbildenden Optik, nach [1.33]

Reflektoren

Reflektoren haben in der Lichttechnik einen sehr vielseitigen Nutzen. Sie werden in der Spektralmesstechnik als dispergierende Elemente verwendet (Laminar- oder Echelettegitter), in der Integralmesstechnik als homogenisierende Elemente (diffuser Reflektor in der Ulbrichtkugel) und in der Beleuchtungstechnik als lichtlenkendes Element. An einer spiegelnden Fläche gilt das Reflexionsgesetz, jedoch können verspiegelte Oberflächen auch eine (Mikro-)Strukturierung aufweisen, die eine gezielte Streuung verursacht.

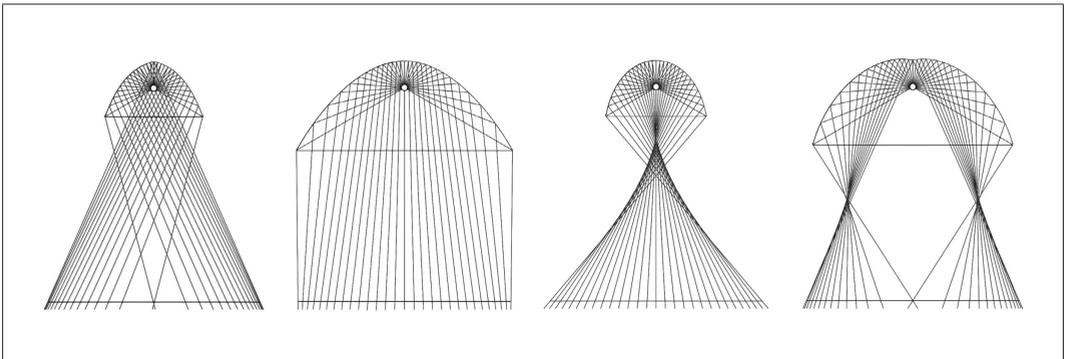


Bild 1.41 Verschiedene Reflektorformen und daraus resultierende Strahlverläufe führen zur ähnlichen Beleuchtungsstärkeverteilung auf einer Ebene (Quelle: Söllner)

In der Beleuchtung wird meist eloxiertes Aluminium mit verschiedenen Oberflächenstrukturierungen (hoch glänzend bis mattiert) als reflektierendes Material ($\rho = 0,95 \dots 0,98$) verwendet. Die Reflektoren können als Rotationskörper (z. B. für Spotbeleuchtung) gefertigt sein oder als Translationskörper für Leuchtstofflampen. Es ist möglich, Reflektoren zu facettieren z. B. konvexe Reflektorfacetten zur Mischung der abstrahlungswinkelabhängigen Farbörter bei LEDs oder zur Optimierung der Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke. Typische Reflektoren sind Parabol-, Ellipsoid- oder sphärische Spiegel (**Bild 1.41**).

Inzwischen sind auch maßgefertigte Reflektoren zum Erreichen einer bestimmten Lichtstärkeverteilung möglich. Die Berechnung solcher *Freiformreflektoren* erfolgt bei bekannter Lichtstärkeverteilung der Lampe und vorgegebener Beleuchtungsstärkeverteilung auf der Beleuchtungsebene über verschiedene Optimierungsalgorithmen [1.34], [1.35], [1.36].

Je nach Positionierung der Lampe im Reflektor, lassen sich sehr unterschiedliche Lichtstärkeverteilungen erzielen, die von stark fokussierenden bis hin zu breit streuenden Lichtstärkeverteilungen reichen.

Linsen und Linsenfolgen

Linsen und Linsenfolgen können in der Lichttechnik immer dann eingesetzt werden, wenn die Leuchtdichte der Lichtquelle sehr hoch ist und damit G recht klein. Es kann dann mit einer verhältnismäßig kleinen Linse ein großer Lichtstrom in die gewünschte Verteilung gebracht werden.

Die Verwendungszwecke und Bauformen von Linsen sind enorm vielseitig. Für abbildende Systeme wurden komplexe Folgen von verschiedenen Linsen erdacht, um Abbildungen in verschiedenen Maßstäben zu erzeugen und die entstehenden Abbildungsfehler (sphärische und chromatische Abberation, Astigmatismus, Koma, usw.) zu korrigieren.

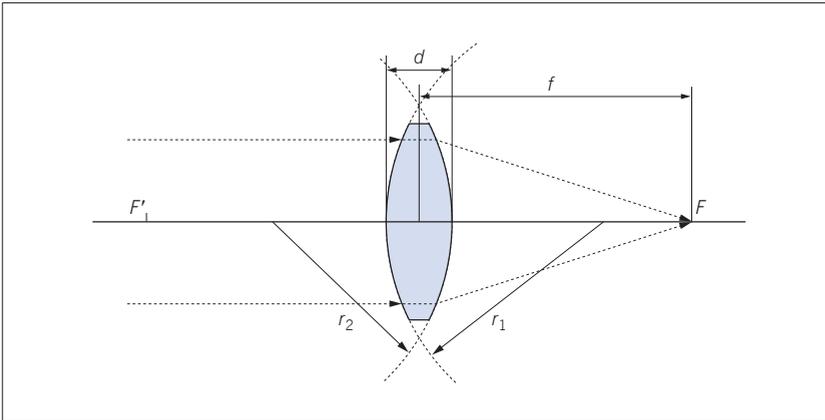


Bild 1.42
Bezeichnungen
bei einer
sphärischen
dicken Linse
(Quelle: Söllner)

Die Brennweite f von sphärischen dicken Linsen (**Bild 1.42**), die auf Grund der Herstellbarkeit und geringer Kosten sehr verbreitet sind, berechnet sich wie folgt :

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f'} = \frac{n' - n}{n} \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{(n' - n)^2 \cdot d}{n' \cdot n \cdot r_1 \cdot r_2}, \quad (1.112)$$

wobei r_1 und r_2 die Krümmungsradien, d die Dicke der Linse, n' der Brechungsindex der Linse und n des Umgebungsmaterials sind. Für dünne Linsen mit dem Umgebungsmedium Luft vereinfacht sich (1.112) zur so genannten Linsenmachergleichung:

$$\frac{1}{f} = (n' - 1) \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (1.113)$$