

huss

Baer, Barfuß, Seifert

# Beleuchtungs- technik Grundlagen



Deutsche Lichttechnische  
Gesellschaft e.V.

5. Auflage



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

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

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

**BEGA**



**Das gute Licht.**  
Für die leichtere Orientierung.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Grundlagen</b>	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	Lichteinfallsstärke $J$	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 Farbmeterik	61
1.3.1	Farbreiz, CIE-Normvalenzsystem, CIE-Normfarbtafel, MACADAM-Ellipsen, Farbmischung	61
1.3.2	Farberscheinung, Farbumstimmung, Farbräume, 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	$\alpha$ -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-Lichts simulationsprogramme .....	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
<b>2</b>	<b>Lichtquellen und Zubehör .....</b>	<b>205</b>
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 farbmétrischen Kenngrößen weißer LEDs .....	284
2.5.5	Spektrale und farbmétrische 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
<b>3</b>	<b>Leuchten</b> .....	<b>311</b>
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	Leuchenausführungen .....	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
<b>4</b>	<b>Lichtsteuerung, Regelung und Management .....</b>	<b>375</b>
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

<b>5</b>	<b>Beleuchtung mit Tageslicht</b>	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
<b>6</b>	<b>Beleuchtungsanlagen im Innenraum</b>	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

<b>7</b>	<b>Beleuchtungssysteme im Außenraum</b>	504
7.1	Anforderungen, Gütemerkmale und Kenngrößen	504
7.1.1	Gütemerkmale	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
<b>8</b>	<b>Anhang</b>	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 vervollkommnete, 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