

# Solarstrahlung und Tageslicht

Heinrich Kaase, Alexander Rosemann

**Bauingenieur-Praxis**





## Solarstrahlung und Tageslicht



# Solarstrahlung und Tageslicht

*Heinrich Kaase und Alexander Rosemann*

## **Autoren**

**Heinrich Kaase**

Berlin  
Deutschland

**Alexander Rosemann**

Eindhoven  
Niederlande

**Titelbild** Kuppel des Pantheons

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

© 2018 Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG,  
Rotherstraße 21, 10245 Berlin, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden.

All rights reserved (including those of translation into other languages). No part of this book may be reproduced in any form – by photoprinting, microfilm, or any other means – nor transmitted or translated into a machine language without written permission from the publishers. Registered names, trademarks, etc. used in this book, even when not specifically marked as such, are not to be considered unprotected by law.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Umschlaggestaltung: Stefanie Eckart – stilvoll  
Satz: le-tex publishing services GmbH, Leipzig, Deutschland

Printed in the Federal Republic of Germany.  
Gedruckt auf säurefreiem Papier.

**Print ISBN:** 978-3-433-03188-9  
**ePDF ISBN:** 978-3-433-60821-0  
**ePub ISBN:** 978-3-433-60819-7  
**oBook ISBN:** 978-3-433-60822-7

# Inhaltsverzeichnis

**Vorwort** IX

**Über die Autoren** XI

**Liste ausgewählter Naturkonstanten** XIII

- 1 Einleitung** 1
  
- 2 Lichttechnische Grundlagen** 3
  - 2.1 Optische Strahlung 3
  - 2.2 Licht- und Strahlungsgrößen 7
  - 2.3 Photonengrößen, Wellenzahl und Frequenz 10
  - 2.4 Farbe 10
  - Literatur 16
  
- 3 Extraterrestrische Solarstrahlung** 17
  - 3.1 Die Sonne 17
  - 3.2 Die Solarkonstante 20
  - Literatur 23
  
- 4 Terrestrische Solarstrahlung** 25
  - 4.1 Aufbau der Erdatmosphäre 25
  - 4.2 Einfluss der Erdatmosphäre auf die Solarstrahlung 27
  - 4.3 Die Globalstrahlung 34
  - 4.4 Spektrale Verteilung der terrestrischen Solarstrahlung 35
  - 4.5 Die Himmelsfarbe 38
  - Literatur 39
  
- 5 Tageslichtangebot** 41
  - 5.1 Tageslicht im Außenraum 41
  - 5.2 Sonnenstand 47
  - 5.3 Besonnung 51
  - 5.4 Tageslicht im Innenraum 52
  - 5.5 Blendung durch Tageslicht 58
  - 5.6 Anforderungen an das Tageslicht im Innenraum 60
  - Literatur 63

<b>6</b>	<b>Tageslichtmesstechnik</b>	<b>67</b>
6.1	Gesamtstrahlungsmessungen	68
6.1.1	Messung der direkten Sonnenbestrahlungsstärke	69
6.1.2	Messung der Globalstrahlung	70
6.2	Spektrale Messtechnik	73
6.3	Lichtmessungen	77
6.4	Licht- und Strahlungsmessgeräte für den Feldeinsatz	79
6.5	Testräume für lichttechnische Untersuchungen an Tageslichtsystemen	80
	Literatur	82
<b>7</b>	<b>Sonnensimulation</b>	<b>85</b>
	Literatur	90
<b>8</b>	<b>Strahlungsphysikalische und lichttechnische Kennzahlen von Tageslichtsystemen</b>	<b>93</b>
8.1	Winkelbeziehungen	95
8.2	Spektraler Transmissions- und Reflexionsgrad	99
8.3	Strahlungstransmissionsgrad, Lichttransmissionsgrad und Lichtreflexionsgrad	102
8.4	Bidirektionale Messungen	105
8.5	Bestimmung des Gesamtenergiedurchlassgrades nach optischen Methoden	109
8.6	Das Datenformat EUMELDAT	110
8.7	Konvertierung der Messdaten in Planungsprogramme	115
	Literatur	116
<b>9</b>	<b>Angewandte Tageslichttechnik</b>	<b>119</b>
9.1	Potenziale der Tageslichttechnik	119
9.2	Tageslichtsysteme	121
9.2.1	Verglasungen	121
9.2.2	Sonnenschutzeinrichtungen	125
9.2.3	Tageslichtlenksysteme	126
9.3	Tageslichtdachsysteme	130
9.4	Heliostatensysteme	136
	Literatur	138
<b>10</b>	<b>Planungsprogramme</b>	<b>141</b>
	<i>Jan de Boer</i>	
10.1	Einleitung	141
10.2	Berechnungsverfahren	141
10.2.1	Radiosity (Strahlungsaustausch)	143
10.2.2	Raytracing-Verfahren (Strahlverfolgung)	144
10.2.3	Photon Mapping	147
10.2.4	Materialien- und Fassadenmodellierung	147
10.3	Berechnungswerkzeuge/Anwenderschnittstellen	150
10.3.1	Übersicht	150

- 10.3.2 Sonnenstandsverschattungsstudien 151
- 10.3.3 Auslegung Sonnen- und Blendschutz 153
- 10.3.4 Relative Nutzbelichtung, Bewertung nach DIN V 18599/EnEV 154
- 10.3.5 Solarkonzentration außen 156
- 10.3.6 Parametrisches Modellieren 158
- 10.4 Zusammenfassung 159
- Literatur 159
  
- 11 Energetische Aspekte der Tageslichttechnik 161**
- 11.1 Gebäudeautomatisierungssysteme 162
- 11.1.1 Übersicht 162
- 11.1.2 Anwendungsbereiche in der Beleuchtungstechnik 167
- 11.2 Tageslichtabhängige Beleuchtung 169
- 11.2.1 Kontrolle der künstlichen Beleuchtung 172
- 11.2.2 Kontrolle der Tageslichtbeleuchtung und von Tageslichtsystemen 175
- 11.3 Energiebedarf von Gebäuden 178
- 11.4 Kunstlichtbeleuchtungsanlagen 181
- 11.4.1 Lichtquellen 182
- 11.4.2 Leuchten 184
- 11.4.3 Materialien 187
- 11.5 Berechnungsverfahren zur Ermittlung des Energiebedarfes für Beleuchtung 187
- 11.5.1 Grundüberlegungen 187
- 11.5.2 Mögliche Verfahren zur Ermittlung der spezifischen Bewertungsleistung 190
- 11.5.3 Ermittlung des tageslichtversorgten Bereiches 191
- 11.5.4 Ermittlung der effektiven Betriebszeiten 191
- 11.5.5 Gesamtbetriebszeit 192
- 11.5.6 Teilbetriebsfaktor zur Berücksichtigung der Anwesenheit 195
- 11.5.7 Zusammenfassung des neuen Verfahrens 195
- 11.6 Anwendung des Verfahrens im internationalen Vergleich 197
- 11.7 Beispiele für innovative, energieoptimierte Tageslichtnutzungskonzepte 198
- 11.7.1 Wartungsarmes Hybridbeleuchtungssystem 198
- 11.7.2 Autoadaptive Systeme 199
- 11.7.3 Das Adaptive Butterfly Array für ein hybrides Hohllichtleitersystem 204
- 11.8 Umwelttechnische Aspekte der Tageslichttechnik 205
- Literatur 207
  
- 12 Fotoinduzierte Effekte durch Solarstrahlung 211**
- 12.1 Allgemeine Grundlagen 211
- 12.2 Beispiele für physikalische Wirkungen 214
- 12.3 Beispiele für chemische Wirkungen 215
- 12.4 Beispiele für biologische Wirkungen 219
- Literatur 221

<b>13</b>	<b>Gesundheitliche Aspekte</b>	223
13.1	Zur Geschichte des Sonnenkultes und der Heliotherapie	223
13.2	Medizinisch-technische Bewertungsgrößen	226
13.3	Wirkungen auf und über die Haut	228
13.4	Wirkungen auf das Auge	233
13.5	Systemische Wirkungen	238
13.6	Wärme- und Strahlungsbelastung	239
13.7	Heliotherapie	240
13.8	Sicherheitsaspekte und Schutzmaßnahmen	243
13.9	Referenzsonnenspektren	244
	Literatur	246
<b>14</b>	<b>Ausblick</b>	249
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	253

## Vorwort

Das Wissen über das Weltall, die Sonne und die Gestirne ist wohl die älteste Wissenschaft. Sie reicht in ihren Anfängen bis weit in das Altertum der Menschheit zurück. Die alten Völker wie die Chinesen in Asien, die Ägypter in Afrika und die Mayas in Amerika besaßen bereits hochentwickelte astronomische Kenntnisse und haben ihre Spuren in der Geschichte hinterlassen, sie haben zur Entwicklung des Weltbildes und der technischen Entwicklung maßgeblich beigetragen.

Der Strahlung der Sonne kommt dabei für das Leben auf der Erde die allergrößte Bedeutung zu. Eine Einführung in die Grundlagen der Solarstrahlung und eine vertiefte Beschreibung der Eigenschaften des Tageslichtes sollen in dieser Publikation behandelt werden. Auf Themen der Solarenergiewandlung, zu denen eine Vielzahl an Übersichts- und Fachliteratur vorliegt, wird hier verzichtet.

Mit diesem Buch haben wir uns nach langem Zureden endlich dazu entschlossen, die Grundprinzipien der Solarstrahlung im Zusammenhang zu erläutern und eine Vorstellung von der Wirkungsweise in einer Buchform aufzustellen. Die mathematische Behandlung ist dabei auf das grundsätzlich Notwendige beschränkt. Dieses Buch enthält Inhalte aus Vorlesungen an der Technischen Universität Berlin und an der Eindhoven University of Technology sowie aus Forschungsprojekten der Autoren, die aus öffentlichen Mitteln von BMFT, BMWi, BMU, EU und BBSR sowie von Industriefirmen gefördert worden sind. Besonderer Dank gilt Herrn Dr. Jan de Boer, der die Bearbeitung des Kapitels „Planungsprogramme“ übernommen hat. Mit ihm haben wir den kompetentesten deutschen Experten zu diesem Thema gewinnen können.

Die langjährige Forschungstätigkeit über interdisziplinäre Themen mit einer intensiven Mitarbeit in nationalen Gremien (DIN, DKE, SLS, SSK und VDI) und in internationalen Gremien (CIE, IEA, IMEKO, ISO und PEP) war Garantie für eine praxisorientierte Betrachtung von Themen zur Wirkung der Solarstrahlung. Wenn es nunmehr gelingt, neben den Studenten auch diesem oder jenem Physiker, Biologen, Ingenieur, Architekten oder Mediziner in Forschung und Lehre Einblicke in physikalisch wie technisch interessante Entwicklungen der Solarstrahlung und der Tageslichttechnik zu vermitteln, so ist der Zweck des Buches völlig erreicht.



## Über die Autoren

Prof. em. Dr. rer. nat. *Heinrich Kaase* studierte Physik an der Technischen Universität Braunschweig und war von 1970 bis 1980 wissenschaftlicher Mitarbeiter im Laboratorium für Radiometrie der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig. Ab 1980 leitete er das neugegründete Laboratorium „Optoelektronik“ der PTB als Regierungsdirektor. 1987 erhielt er den Ruf auf den Lehrstuhl „Lichttechnik“ der TU Berlin. Seit 2008 ist Prof. Kaase im Ruhestand.

Die wissenschaftlichen Arbeiten zur Forschung über Spektralradiometrie, Synchrotronstrahlung, Plasmastrahlung, Solarstrahlung, Tageslicht, Lichtmesstechnik, Optohalbleiter, Fotobiologie, Fotomedizin und elektrische Installationstechnik waren stets praxisorientiert und interdisziplinär angelegt. Die Ergebnisse wurden in mehr als 200 Publikationen veröffentlicht. Auf Grund dieser Tätigkeiten wurde Heinrich Kaase in eine Vielzahl von nationalen Gremien (DIN, DKE, SLS und SSK) und internationalen Komitees (CIE, IEA, IMEKO und PEP) berufen.

Prof. Dr.-Ing. habil. *Alexander Rosemann* leitet das Fachgebiet Building Lighting an der Eindhoven University of Technology (TU/e). Seine Forschungsschwerpunkte liegen in den Bereichen Licht & Energie, Licht & visuelle Umgebung sowie Licht & Gesundheit. Nach dem Studium der Elektrotechnik an der TU Berlin promovierte und habilitierte er sich bei Prof. Kaase auf dem Gebiet der Tageslichttechnik. Im Anschluss an seine Tätigkeiten am Fachgebiet Lichttechnik und in der Firma schüco International KG ging er für 10 Jahre nach Kanada. Dort war er nach einer Postdoc-Anstellung an der University of British Columbia in Vancouver bei dem Energieunternehmen BC Hydro im Bereich Energieeffizienz tätig. Sein Verantwortungsgebiet umfasste die Entwicklung und Anwendung von energieeffizienten Standards und Building Codes auf kommunaler, regionaler und nationaler Ebene. Rosemann ist Vorstandsmitglied der NSVV (Nederlandse Stichting Voor Verlichtingskunde) und Mitglied der LiTG (Deutsche Lichttechnische Gesellschaft).



## Liste ausgewählter Naturkonstanten

$\sigma$	Stefan-Boltzmann-Konstante: $5,76 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
AU	astronomische Längeneinheit: $1 \text{ AU} = 150 \cdot 10^9 \text{ m}$
$c_0$	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum: $2,997925 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$
$E_{\text{Ex}}$	extraterrestrische Bestrahlungsstärke (Solarkonstante): $1356 \text{ W/m}^2$
$h$	Planck'sches Wirkungsquantum: $6,626 07 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$
$k$	Boltzmann-Konstante: $1,380 66 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$

## Liste der Symbole

$\alpha$	Azimutwinkel für einen Punkt am Himmel
$\alpha_i$	Strahlungsabsorptionsgrad
$\alpha_S$	Sonnenazimut
$\beta_A$	Trübungskoeffizient nach Ångström
$\beta_i(\lambda)$	spektraler Strahldichtefaktor
$\gamma_1$	Lichteinfallswinkel im EUMELDAT-Koordinatensystem
$\gamma_2$	Beobachtungsrichtung im EUMELDAT-Koordinatensystem
$\gamma_S$	Höhenwinkel der Sonne
$\delta(\lambda)$	vertikale optische Dicke
$\delta_S$	Sonnendeklination
$\varepsilon$	Winkel zwischen Zenit und dem Punkt P
$\varepsilon_F$	Neigungswinkel für die Einbaulage eines Tageslichtsystems
$\varepsilon_{\text{Fh}}$	Fensterhöhenwinkel
$\varepsilon_i$	Lichteinfallswinkel
$\varepsilon_{\text{innen}}$	Emissionsgrad der inneren Oberfläche
$\eta$	Wirkungsgrad
$\eta_{\text{lern}}$	Lernrate eines neuronalen Netzes
$\vartheta_L$	Leuchtenumgebungstemperatur
$\theta_1$	Winkel zur Beschreibung der Lichteinfallsrichtung im IEA-System
$\theta_2$	Winkel zur Beschreibung der Beobachtungsrichtung im IEA-System
$\lambda$	Wellenlänge
$\lambda_B$	geografische Länge
$\Delta\lambda_H$	Halbwertsbreite des spektralen Durchlassprofils

$\lambda_m$	Mittenwellenlänge
$\lambda_{\max}$	Wellenlänge der maximalen Empfindlichkeit
$\nu$	Frequenz
$\rho_0$	Luftdichte bei Meereshöhe
$\rho$	Strahlungsreflexionsgrad
$\rho_v$	Lichtreflexionsgrad
$\sigma_i(\lambda, z)$	Extinktionskoeffizient für den Extinktionseffekt $i$
$\tau(\lambda)$	spektraler Transmissionsgrad
$\tau$	Strahlungstransmissionsgrad
$\tau_s$	Stundenwinkel
$\tau_v$	Lichttransmissionsgrad
$\varphi_1$	Lichteinfallswinkel im IEA-Koordinatensystem
$\varphi_2$	Beobachtungswinkel im IEA-Koordinatensystem
$\varphi_B$	geografische Breite
$\Phi$	Strahlungsleistung
$\Phi_p$	Photonenfluss
$\Phi_v$	Lichtstrom
$\chi$	Wellenlängenexponent nach Mie
$\Omega$	Raumwinkel
$A$	Fläche
$dA$	Flächenelement
AM	relative Luftmasse
$C$	Ozongehalt der Atmosphäre
$C_{th}$	Wärmekapazität
$C_{TL, Vers, j}$	Tageslichtversorgungsfaktor
$d$	Abstand
$D$	Tageslichtquotient
D65	Normlichtart D65
$D_a$	Außentageslichtquotient
$D_i$	Innentageslichtquotient
$D_{kost}$	Kostenfunktion eines neuronalen Netzes
$D_n$	Kalendertag
DGI	Tageslichtblendungsindex (Daylight Glare Index)
$E$	elektrische Feldstärke
$E$	Bestrahlungsstärke
$E_{v, ex}$	extraterrestrische Beleuchtungsstärke
$E_{biol}$	photobiologisch wirksame Bestrahlungsstärke
$E_{dir}$	direkte Sonnenbestrahlungsstärke
$E_{chem}$	chemisch wirksame Sonnenbestrahlungsstärke
$E_{dif}$	diffuser Anteil der Bestrahlungsstärke
$E_{med}$	medizinisch wirksame Bestrahlungsstärke
$E_{dif}$	diffuser Anteil der Bestrahlungsstärke
$E_a$	Bestrahlungsstärke außen vor der Verglasungsfläche
$E_i$	Bestrahlungsstärke im Innenraum
$E_{v, g}$	globale Beleuchtungsstärke
$E_g$	Bestrahlungsstärke der Globalstrahlung

$E_{m,g}$	globale Beleuchtungsstärke bei mittlerem Himmel im Freien ohne Verbauung
$E_{m,H}$	Beleuchtungsstärke bei mittlerem Himmel durch den Himmel
$E_{m,S}$	Beleuchtungsstärke bei mittlerem Himmel durch die Sonne
$E_v$	Beleuchtungsstärke
$E_{v,B,F}$	Reflexionsanteil der Beleuchtungsstärke auf einer beliebig geneigten und orientierten Fläche $F$
$E_{v,dif}$	diffuse Beleuchtungsstärke in der horizontalen Ebene
$E_{v,dif,F}$	Himmelslichtanteil der Beleuchtungsstärke auf einer beliebig geneigten und orientierten Fläche $F$
$E_{v,dir}$	direkte Beleuchtungsstärke in der Ebene senkrecht zur Einfallrichtung
$E_{v,dir,F}$	direkter Anteil der Beleuchtungsstärke auf einer beliebig geneigten und orientierten Fläche $F$
$E_{v,F}$	Beleuchtungsstärke auf einer beliebig geneigten und orientierten Fläche $F$
$E_{v,g}$	Horizontalbeleuchtungsstärke der Globalstrahlung
$F_{Prä,j}$	Teilbetriebsfaktor zur Berücksichtigung der Präsenz im Berechnungsbereich $j$
$F_{Prä,j}$	Teilbetriebsfaktor zur Berücksichtigung der Anwesenheit in dem Berechnungsbereich $j$
$F_{TL,j}$	Teilbetriebsfaktor zur Berücksichtigung der Tageslichtversorgung im Berechnungsbereich $j$
$g$	Gesamtenergiedurchlassgrad
$G$	Gelbwert
$h_m$	Höhe über Meeresniveau
$h_{Ne,j}$	Höhe der Nutzebene
$h_{R,j}$	lichte Raumhöhe des Berechnungsbereiches mit Dachoberlicht
$H$	magnetische Feldstärke
$H$	Bestrahlung (Dosis)
$H_{biol}$	photobiologisch wirksame Bestrahlung
$H_{med}$	medizinisch wirksame Bestrahlung
$I$	Strahlstärke
IES/GI	IES-Blendungsindex
$I_v$	Lichtstärke
$k_{1,n}$	Versprossungsfaktor
$k_{2,n}$	Verschmutzungsfaktor
$k_{3,n}$	Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung des nicht senkrechten Lichteinfalles
$K$	photometrisches Strahlungsäquivalent
$\bar{K}$	mittleres photometrisches Strahlungsäquivalent
$K_D$	Bedeckungsgrad
$K_m$	Maximum des photometrischen Strahlungsäquivalentes
$L$	Strahldichte
$L_v$	Leuchtdichte
$L_{v,P}$	Leuchtdichte an der betrachteten Himmelsposition P
$L_{v,sky}$	Leuchtdichte des durch das Fenster gesehenen Himmels

$L_{wp}$	Leuchtdichte der Fensterebene
$L_{v,z}$	Zenitleuchtdichte
$M$	spezifische Ausstrahlung
MED	minimale erythemwirksame Dosis
MEZ	mitteleuropäische Zeit
$M_v$	spezifische Lichtausstrahlung
MOZ	mittlere Ortszeit
$n$	Brechzahl
$\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$	Flächennormale
$n_s(\lambda)$	Brechzahl der Luft unter Standardbedingungen
$p$	Positionsindex
$p(h_m)$	Luftdruck in der Höhe $h_m$
$p_0$	Luftdruck auf Meereshöhe
$p_j$	spezifische Bewertungsleistung für die Kunstlichtbeleuchtungsanlage
$P$	elektrische Leistung
$q$	Strahldichtekoeffizient
$q_v$	Leuchtdichtekoeffizient
$q_i$	sekundäre Wärmeabgabe nach innen
$Q$	Energie
$Q_{el}$	über die Lebensdauer der Lampe umgesetzte elektrische Energie
$Q_{l,b,n}$	Energiebedarf für Beleuchtung für die Gebäudezone $n$
$Q_v$	Lichtmenge
$Q_w$	Wärmeentwicklung
$r$	Abstand
$R$	elektrischer Widerstand
$R_a$	allgemeiner Farbwiedergabeindex
$R_i$	spezieller Farbwiedergabeindex für die Testfarbe $i$
$R_r$	Auflösungsvermögen
$s(\lambda)$	spektrale Empfindlichkeit
$s(\lambda)_{rel}$	relative spektrale Empfindlichkeit (Wirkungsspektrum)
$s(\lambda)_{biol,rel}$	Wirkungsspektrum biologisch wirksamer Strahlung
$s(\lambda)_{med,rel}$	Wirkungsspektrum medizinisch wirksamer Strahlung
$\mathbf{S}$	Poynting-Vektor
SAD	Seasonal Affective Disorder
SED	Standarderythemdosis
SSW	Sonnenscheinwahrscheinlichkeit
STP	Standard Temperature and Pressure
$t_{eff,Nacht,j}$	effektive Betriebszeit des Beleuchtungssystems zur Nachtzeit
$t_{eff,Tag,KTL,j}$	effektive Betriebszeit des Beleuchtungssystems in dem vom Tageslicht nicht profitierenden Bereich der Zone $n$
$t_{eff,Tag,TL,j}$	effektive Betriebszeit des Beleuchtungssystems in dem vom Tageslicht profitierenden Bereich der Zone $n$
$t_{Nacht,j}$	Gesamtbetriebszeit des Berechnungsbereichs $j$ zur Nachtzeit
$t_{rel,TL,SA,j}$	relativer Anteil an der Gesamtbetriebszeit, während der der Sonnen-/Blendschutz aktiviert ist
$t_{s,biol}$	Schwellenbestrahlungsdauer des fotobiologischen Effektes

$t_{s,med}$	Schwellenbestrahlungsdauer des medizinischen Effektes
$t_{SA}$	Sonnenaufgangszeit
$t_{SU}$	Sonnenuntergangszeit
$t_{Tag,j}$	Gesamtbetriebszeit des Berechnungsbereichs $j$ zur Tageszeit
$T$	Temperatur
$T_{cp}$	ähnlichste Farbtemperatur
$T_L$	Linke-Trübungsfaktor
$U$	$U$ -Wert (früher $k$ -Wert)
$\Delta U_{th}$	Thermospannung
$V_S$	Sichtweite
$V(\lambda)$	relative spektrale Empfindlichkeitsfunktion des helladaptierten menschlichen Auges
$V'(\lambda)$	relative spektrale Empfindlichkeitsfunktion des dunkeladaptierten menschlichen Auges
$V_{th}$	Wärmeverluste
$W_{He}$	Wechselhaftigkeit des Himmelszustandes
$w_{ij}$	Gewichtsfaktoren eines neuronalen Netzes
WOZ	wahre Ortszeit
$x, y, z$	Normfarbwertanteile
$X, Y, Z$	Normspektralwerte
$Z_g$	Zeitgleichung



## 1

## Einleitung

Das Interesse an elektromagnetischer Solarstrahlung ist außerordentlich groß, da diese nicht nur die primäre Energiequelle im Energiehaushalt der Erdoberfläche und der Erdatmosphäre ist, sondern auch unsere wichtigste Lichtquelle darstellt. Die jährliche Strahlungsmenge durch Solarstrahlung auf der Erdoberfläche ist rund 3000-mal größer als der Weltjahresenergiebedarf zu Beginn des 21. Jahrhunderts und ist nach menschlichen Maßstäben unerschöpflich. Dagegen sind unter energetischen Aspekten die korpuskularen und die kosmischen Strahlungsanteile aus dem Weltraum, die die Erdoberfläche erreichen, gegenüber der Solarstrahlung, die die Erdatmosphäre trifft, ebenso zu vernachlässigen wie die geothermischen Wärmeströme aus dem Erdinneren oder die natürliche radioaktive Strahlung. Die für die Erde wichtigste natürliche Strahlungs- und Energiequelle ist also die Sonne. Durch sie werden das Erdklima und der Energiehaushalt auf der Erdoberfläche sowie die Verhältnisse in der Erdatmosphäre entscheidend bestimmt.

Neben der energetischen Bedeutung der Solarstrahlung sind ihre Wirkungen auf den Menschen lebensnotwendig. Dies trifft besonders auf das Auge als unser wichtigstes Orientierungs- und Kommunikationsorgan zu. Deshalb werden in diesem Buch Themen der Tageslichttechnik und Wirkungen der Solarstrahlung auf Organe des Menschen grundlegend behandelt. Dagegen wird bei Themen der Sonnenenergieumwandlung und den technischen Anwendungen auf die umfangreiche Literatur verwiesen.

Die Solarstrahlung wird auf dem Wege von der Sonne bis zum Erreichen der Erdoberfläche durch Absorption und Streuung reduziert. Die Verluste treten durch Atom- und Molekülabsorption in den Randzonen der Sonne, im interstellaren Raum, in der Erdatmosphäre und auf der Erdoberfläche auf. In der Erdatmosphäre und auf der Erdoberfläche führen Streuung und Reflexion an Aerosolteilchen, Wassertropfen und Wasserkristallen zu weiteren Strahlungsverlusten. Die Berechnung der auf der Erde zur Verfügung stehenden Solarstrahlung ist aufgrund der inhomogenen Verteilung und Zusammensetzung der Erdatmosphäre, die zusätzlich noch höhen- und temperaturabhängig sind, z. T. sehr aufwendig und erfordert Kenntnisse der theoretischen und der geometrischen Optik.

Mithilfe der Tageslichtbeleuchtung können heute sowohl die Energie eines Gebäudes als auch die Gesundheit der Menschen und die Aufenthaltsqualität entscheidend verbessert werden. Dabei lassen sich die Beleuchtungsverhältnisse im Innenraum durch Tageslicht von den örtlichen Gegebenheiten der terrestrischen

Solarstrahlung, den lichttechnischen Eigenschaften der Verglasungen bzw. der Sonnenschutzeinrichtungen, der Raumumschließungsflächen und der Einrichtungsgegenstände bestimmen. Zur ausreichenden Beleuchtung fensterferner Zonen in Gebäuden werden zunehmend auch Lichtlenksysteme eingesetzt. Die sich hieraus ergebenden Arbeitsfelder der Lichttechnik behandeln also die zentralen Zukunftsthemen: Energie, Umwelt und Gesundheit. Dabei können Gebäude sowohl im Neubau als auch bei der Sanierung eine zentrale Rolle bei der Reduzierung der Energieumsetzung und der Verbesserung des Komforts spielen.

Heute werden am Markt eine Vielzahl von Systemen/Produkten für die Tageslichtbeleuchtung bei unterschiedlichsten Problemfeldern angeboten: Tageslichtlenkung, tageslichtabhängige Kunstlichtsteuerung, Sonnenschutz, Blendschutz, Sichtverbindung ins Freie, Ergonomie, passive Solarenergienutzung, Lüftung und Wärmedurchgang.

Die Entscheidung, ob der Einsatz dieser Systeme sinnvoll und wirtschaftlich ist, fällt jedoch oft ohne gesicherte Grundlagen. Auch ist dem Planer im Einzelfall nicht immer klar, welche Umgebungsparameter in dem System „Gebäude“ vorliegen müssen, damit sich die energetische oder tageslichttechnische Maßnahme sinnvoll in die Gebäudedynamik einfügt bzw. überhaupt funktioniert.

Der wirtschaftliche Einsatz von Tageslichtlenksystemen kann vor allem in Kombination mit der elektronischen Gebäudeautomatisierungstechnik, insbesondere mit einer tageslichtabhängigen Beleuchtungskontrolle, erreicht werden. So wird die Einsparung elektrischer Energie bei der künstlichen Beleuchtung durch energieeffiziente Lampen- und Vorschalttechniken, aber auch durch tageslichtabhängiges Schalten und Dimmen möglich.

Die Solarstrahlung und das Tageslicht beeinflussen aber nicht nur die Energiebilanz und den Sehvorgang, sie haben auch eine große Bedeutung für die Gesundheit und das Wohlbefinden des Menschen. Tageslichtlenksysteme sowie Sonnenschutzmaßnahmen beeinträchtigen häufig den Ausblick ins Freie; dies kann durch eine Verringerung der für den freien Blick in die Außenwelt zur Verfügung stehenden Fensterfläche oder auch durch eine Verminderung der Transparenz geschehen. Es sind Fälle bekannt, bei denen Nutzer Einbußen in der Beleuchtungsqualität hinnehmen und die Tageslichtlenktechnik nicht verwenden, um einen besseren Ausblick ins Freie zu haben. Wenn Tageslichtsysteme den Innen- und Außenraum entkoppeln, so kann dies das Wohlbefinden des Nutzers beeinträchtigen. In diesem Zusammenhang ist auch die Arbeitsstättenverordnung von Bedeutung, die für Arbeitsplätze einen Ausblick ins Freie fordert. Zudem beeinflussen Tageslichtsysteme die Blendungsbegrenzung, die Lichtfarbe und die Farbwiedergabe sowie die Beleuchtungsstärkeverteilung im Innenraum. Sie bestimmen die Akzeptanz bzw. die gesundheitlichen und die ergonomischen Verhältnisse entscheidend.

## 2

### Lichttechnische Grundlagen

Die Bestimmung von Strahlungs-, Licht- und Farbgrößen der Innenraumbeleuchtung mit Tageslicht setzt die Kenntnis von lichttechnischen Grundlagen und von Parametern voraus, die die Solarstrahlung und das Tageslicht beschreiben. Während die Grundlagen der Lichttechnik [1] hier nur in kurzer Form zusammenhängend dargestellt werden können, werden die Eigenschaften der Solarstrahlung und das daraus abgeleitete Tageslichtangebot im Freien sowie die Innenraumbeleuchtung mit Tageslicht in den Kapiteln 4 und 5 ausführlich behandelt.

Von der Solarstrahlung interessiert hier allerdings nur der Teil, der mit optischen Wirkungen verknüpft ist. Der langwelligere Anteil, der für die Wärmelast und die Raumkonditionierung wichtig ist, wird eher als Thema in der Raumklimatechnik dargestellt [2].

#### 2.1 Optische Strahlung

Unter optischer Strahlung versteht man den Teil der elektromagnetischen Strahlung, der im Wellenlängenbereich von 1 nm (obere Grenzwellenlänge des Bereiches der Röntgenstrahlung) bis 1 mm (untere Grenzwellenlänge des Bereiches der Radiowellen) liegt. In der Norm [3] wird dieser Bereich von 100 nm bis 1 mm angegeben; es fehlt dort allerdings der sogenannte extreme Vakuum-UV (EUV)-Bereich von 1 nm bis 100 nm. Dieser EUV-Bereich ist Teil der nichtionisierenden Strahlung und deshalb der UV-Strahlung zuzuordnen.

Die Strahlungsleistung  $\Phi$ , die durch elektromagnetische Wellen transportiert wird, lässt sich aus den Maxwell'schen Gleichungen berechnen. Sie ist durch den Poynting-Vektor  $\mathbf{S}$  als Kreuzprodukt des elektrischen und magnetischen Feldvektors

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (2.1)$$

festgelegt [4].  $\mathbf{E}$  bezeichnet die elektrische Feldstärke und  $\mathbf{H}$  die magnetische Feldstärke. Die Strahlungsleistung  $\Phi$  (in W) einer emittierenden Quelle wird dann durch das Integral über eine geschlossene Fläche  $A$  (in m<sup>2</sup>) um die emit-

tierende Quelle bestimmt:

$$\Phi = \oint_A \mathbf{S} \cdot d\mathbf{A} \quad (2.2)$$

$\Phi$  ist also die durch die Fläche  $A$  durchtretende Strahlungsleistung und  $dA$  ist ein Flächenelement auf der die Quelle umschließenden Fläche  $A$ .

Die Verteilung optischer Strahlung über die Wellenlänge wird durch Spektren beschrieben [5]. So ist die spektrale Strahlungsleistung diejenige Strahlungsleistung, die in einem Wellenlängenintervall um die Wellenlänge  $\lambda$  enthalten ist:

$$\Phi_\lambda(\lambda) = \frac{\partial \Phi(\lambda)}{\partial \lambda} \quad (2.3)$$

Mathematisch korrekt handelt es sich also um eine partielle Ableitung der wellenlängenabhängigen Strahlungsleistung. Die grafische Darstellung solcher spektralen Funktionen ist bei Strahlungsquellen wie die der Sonne, die sowohl Linien- als auch Kontinuumsstrahlung emittieren, mit Schwierigkeiten verbunden. In diesen Fällen wird oft eine histogrammähnliche Darstellung bevorzugt. Es wird dabei entweder die über ein endliches Wellenlängenintervall  $\Delta\lambda$  integrierte Strahlungsleistung in Abhängigkeit von der Mittenwellenlänge  $\lambda_m$  des jeweils betrachteten Intervalls aufgezeichnet [6]. Es ist also:

$$\Phi(\lambda_m) = \int_{\lambda_m - \frac{\Delta\lambda}{2}}^{\lambda_m + \frac{\Delta\lambda}{2}} \frac{\partial \Phi(\lambda)}{\partial \lambda} \cdot d\lambda \quad (2.4)$$

Oder es wird die über das Intervall  $\Delta\lambda$  gemittelte spektrale Strahlungsleistung

$$\bar{\Phi}_\lambda(\lambda_m) = \frac{1}{\Delta\lambda} \cdot \int_{\lambda_m - \frac{\Delta\lambda}{2}}^{\lambda_m + \frac{\Delta\lambda}{2}} \frac{\partial \Phi(\lambda)}{\partial \lambda} \cdot d\lambda \quad (2.5)$$

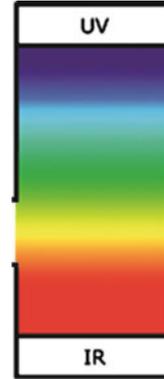
in Abhängigkeit von der Wellenlänge  $\lambda$  dargestellt. Während also  $\Phi(\lambda_m)$  in der Einheit  $W$  angegeben wird, misst man die spektrale Strahlungsleistung in der physikalischen Einheit  $W \text{ nm}^{-1}$ .

Die optische Strahlung wird in eine Vielzahl von Spektralbereichen eingeteilt, deren Grenzwellenlängen durch unterschiedliche physikalische, chemische oder biologische Wirkungen der Strahlung bestimmt sind. Die Einteilung der Spektralbereiche ist in Anlehnung an [3] mit der unteren Grenzwellenlänge  $\lambda_1$  und der oberen Grenzwellenlänge  $\lambda_2$  in Tab. 2.1 wiedergegeben.

Die obere Grenzwellenlänge gehört in dieser Aufstellung nicht mehr zu dem beschriebenen Bereich, der also nach oben offen ist. Die hier zusammengestellte Tabelle ist gegenüber der DIN-Norm um den Strahlungsbereich der extremen UV(EUV)-Strahlung erweitert. Die Grenzwellenlängen dieser Intervalle sind historisch entstanden und basieren auf Absorptionsvorgängen:

Tab. 2.1 Spektralbereiche der optischen Strahlung.

Art der Strahlung		Wellenlängenbereich [ $\lambda_1$ bis $\lambda_2$ ] in nm
UV	Extremes Vakuum Ultraviolett (EUV)	1 bis 100
	Vakuum Ultraviolett (VUV)	100 bis 200
	Fernes Ultraviolett (UV-C)	200 bis 280
	Mittleres Ultraviolett (UV-B)	280 bis 315
	Nahes Ultraviolett (UV-A)	315 bis 380
Licht	Sichtbare Strahlung (VIS)	380 bis 780
IR	Nahes Infrarot (IR-A)	780 bis 1400
	Mittleres Infrarot (IRT-B)	1400 bis 3000
	Fernes Infrarot (IR-C)	3000 bis $10^6$



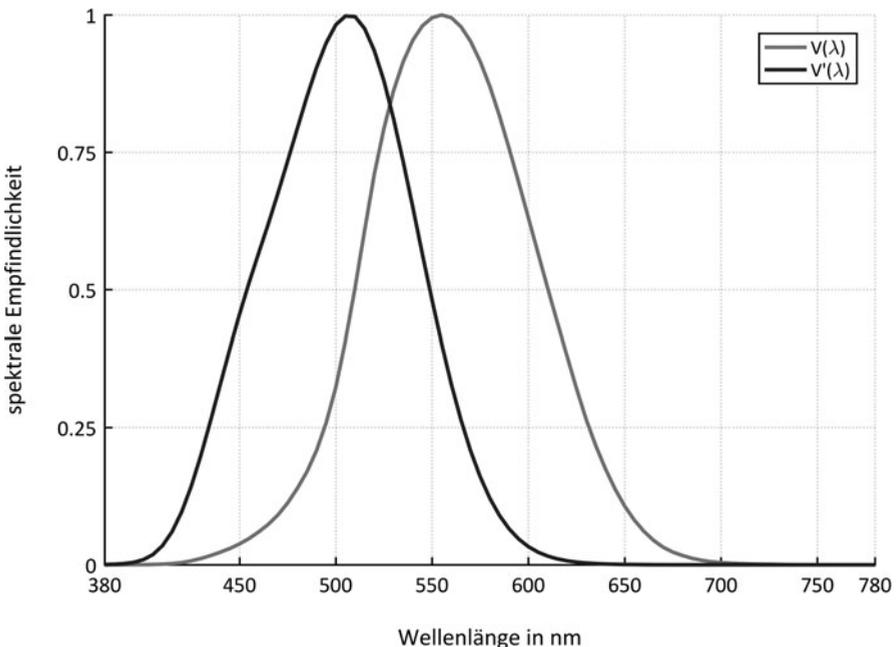
- 1 nm ist die Grenzwellenlänge zwischen optischer Strahlung und Röntgenstrahlung; Strahlung mit kleinerer Wellenlänge hat ionisierende Wirkung.
- Die Grenze bei 100 nm entspricht etwa dem Seriengrenzkontinuum von Wasserstoffatomen. Da diese Atome bei sehr geringem Druck das Weltall füllen, wird also UV-Strahlung mit Wellenlängen kleiner als etwa 100 nm im interstellaren Raum absorbiert, sodass der Weltraum zu kleinen Wellenlängen hin erst wieder Röntgenstrahlung mit Wellenlängen  $\lambda < 1$  nm passieren lässt. Die Astronomie ferner Sterne basiert deshalb auf Röntgenteleskopen, wie sie z. B. im Röntgensatelliten ROSAT sehr erfolgreich verwendet wurden [7].
- Die Grenze bei 200 nm entspricht etwa der Ionisierungsgrenzwellenlänge von  $O_2$  und  $N_2$  in der Luft. UV-Strahlung mit Wellenlängen kleiner als 200 nm hat bei Normaldruck in Luft eine Eindringtiefe von nur wenigen Millimetern.
- Die Grenze bei 280 nm ist durch die Ozonabsorption bestimmt. Da in der oberen Erdatmosphäre Ozon angereichert vorkommt, bildet diese Schicht einen Schutz vor UV-Strahlung außererdatischer Quellen, die eine DNA-Schädigung hervorrufen kann.
- Die Grenzwellenlänge 315 nm wurde in den 30er-Jahren des 20. Jahrhunderts als DNS-Absorptionskante angesehen. Heute sind Forschungs- und Normierungsinstitute geneigt, diese Grenze längerwellig bei 320 nm festzulegen.
- Nach [3] wird der sichtbare Spektralbereich für das helladaptierte menschliche Auge zwischen 380 und 780 nm festgelegt. Diese Grenzwellenlängen sind in internationalen Normen z. T. auf gerundete Werte bei 400 und 800 nm angesetzt worden; in der Farbmessung der CIE wird die Verwendung der Grenzen bei 360 und 830 nm empfohlen.
- Die Wellenlängengrenzen im IR-A-Bereich sind wiederum durch biologische Wirkungen bestimmt: IR-Strahlung der Wellenlängen 780 bis 1400 nm hat große Eindringtiefen ( $> 10$  mm) in den menschlichen Körper.

- Die Wellenlängengrenze bei 3000 nm ( $3\ \mu\text{m}$ ) ist dagegen durch die Messtechnik bedingt. So ist der Einsatz von Glas- und Quarzoptiken aufgrund ihrer Absorptionseigenschaften nur im IR-B-Bereich bis  $3\ \mu\text{m}$  möglich.
- Im Spektralbereich des IR-C mit  $3\ \mu\text{m} < \lambda < 1\ \text{mm}$  ist die Erdatmosphäre wegen der Wasserdampfabsorption nicht transparent. Damit kommt dem IR-C-Bereich auch keine wichtige Rolle in der Tageslichttechnik zu.

Für den Menschen ist der sichtbare Teil der optischen Strahlung von besonderem Interesse. Die mit der relativen spektralen Empfindlichkeitsfunktion des helladaptierten menschlichen Auges bewertete, sichtbare Strahlung wird als Licht bezeichnet. Diese Empfindlichkeitsfunktion wird auch  $V(\lambda)$ -Funktion für fotopisches Sehen genannt und ist in Abb. 2.1 dargestellt. Strahlung, die vom menschlichen Auge nicht wahrgenommen wird, darf also nicht als Licht benannt werden. In Abb. 2.1 ist zusätzlich die spektrale Empfindlichkeit der Rezeptoren für das dunkeladaptierte Auge (skotopisches Sehen)  $V'(\lambda)$ , die sich in der Netzhaut des menschlichen Auges befinden, wiedergegeben [1].

Die Tab. 2.2 gibt typische Beleuchtungsstärken in horizontalen Ebenen auf der Erdoberfläche bei unterschiedlichen natürlichen Beleuchtungsverhältnissen wieder.

Während für das Tagessehen die  $V(\lambda)$ -Kurve und für das Nachtsehen die  $V'(\lambda)$ -Kurve anzusetzen ist, gilt im Zwischenbereich je nach Beleuchtungsstärke eine Kurve des sogenannten mesopischen Sehens.



**Abb. 2.1** Spektrale Empfindlichkeitsgrade des helladaptierten menschlichen Auges  $V(\lambda)$  und des dunkeladaptierten Auges  $V'(\lambda)$  in Abhängigkeit von der Wellenlänge.

**Tab. 2.2** Beleuchtungsstärke  $E_v$  auf der Erdoberfläche durch natürliche Strahlung bei unterschiedlichen Beleuchtungsverhältnissen.

Beispiel	Typische Beleuchtungsstärken in lx
Neumondnacht	0,01
Vollmondnacht	0,25
Vollkommen bedeckter Himmel am Wintertag	3 000
Vollkommen bedeckter Himmel am Sommertag um 12 Uhr	20 000
Klarer Sommertag um 12 Uhr	60 000...100000

## 2.2 Licht- und Strahlungsgrößen

Der Strahlungsübergang von einer Strahlerfläche  $dA_1$  zu einer Empfängerfläche  $dA_2$  wird durch geometrische Größen nach Abb. 2.2 beschrieben. Dabei sind  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  Winkel zwischen den Flächennormalen  $\mathbf{n}_1$  bzw.  $\mathbf{n}_2$  der beiden Flächenelemente und der kürzesten Verbindung  $d$ .

Damit lässt sich nun der Raumwinkel  $\Omega$  festlegen, unter dem die Strahlung von einer Quelle emittiert wird oder unter dem ein Empfänger die Strahlung einer Quelle erfasst. Es gilt

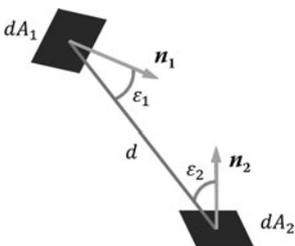
$$d\Omega = \frac{\cos \varepsilon}{d^2} \cdot dA \quad (2.6)$$

Die physikalische Einheit der Größe des Raumwinkels  $\Omega$  ist Steradian (sr), der gesamte Raumwinkel ist  $4\pi$  sr. Der Raumwinkel wird also in der Einheit sr gemessen, ist aber dimensionslos! Deshalb ist bei Dimensionsbetrachtungen in Größengleichungen Vorsicht geboten.

Für kleine Flächen  $A$  und große Abstände  $d$  gilt für den Raumwinkel näherungsweise:

$$\Omega = \cos \varepsilon \cdot \frac{A}{d^2} \quad (2.7)$$

Die Definitionen der in [8] und im CIE-Wörterbuch [9] genormten abgeleiteten Strahlungsgrößen sind in Tab. 2.3 zusammengefasst; sie werden radiometrische Größen genannt. Die Ausgangsgröße ist die Strahlungsleistung  $\Phi$  gemäß



**Abb. 2.2** Strahlungstransport zwischen zwei Flächen  $dA_1$  und  $dA_2$ .

**Tab. 2.3** Radiometrische Größen (energetische Strahlungsgrößen) mit Strahlungsleistung  $\Phi$  als Ausgangsgröße.

Größe	Definitionsgleichung	Einheit
Strahlungsleistung	$\Phi$	W
Strahlungsenergie	$Q = \int \Phi \cdot dt$	J
Spezifische Ausstrahlung	$M = \frac{\partial \Phi}{\partial A_1}$	W m <sup>-2</sup>
Strahlstärke	$I = \frac{\partial \Phi}{\partial \Omega_1}$	W sr <sup>-1</sup>
Strahldichte	$L = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \Omega \partial A_1 \cdot \cos \varepsilon_1}$	W m <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup>
Bestrahlungsstärke	$E = \frac{\partial \Phi}{\partial A_2}$	W m <sup>-2</sup>
Bestrahlung	$H = \frac{\partial Q}{\partial A_2}$	J m <sup>-2</sup>

Gl. (2.2). Diese Größen werden oft mit dem Index „e“ versehen, um den energetischen Bezug aufzuzeigen [10].

Während also die Größen Strahlungsenergie, Strahlungsleistung, spezifische Ausstrahlung, Strahlstärke und Strahldichte die Strahlungseigenschaften von Quellen beschreiben, beziehen sich die Größen Bestrahlungsstärke und Bestrahlung auf Strahlungsempfänger (also auf das Flächenelement  $dA_2$  bezogene Größen).

Für die zugehörigen wellenlängenabhängigen Größen (spektrale Größen) gelten Definitionen analog zu Gl. (2.3). Ist dabei nur der spektrale Gang von Interesse, wird die entsprechende Größe auf den Wert bei einer Wellenlänge normiert. Das Ergebnis ist eine relative Funktion in Abhängigkeit von der Wellenlänge und wird Strahlungsfunktion  $S(\lambda)$  genannt. So gilt z. B. für die relative spektrale Bestrahlungsstärke:

$$S(\lambda) = \frac{\partial E(\lambda)/\partial \lambda}{\partial E(\lambda = \lambda_0)/\partial \lambda} = \frac{E_\lambda(\lambda)}{E_\lambda(\lambda = \lambda_0)} \quad (2.8)$$

Die lichttechnischen (fotometrischen) Größen sind die mit der Empfindlichkeitsfunktion des helladaptierten menschlichen Auges (Tagessehen) bewerteten Strahlungsgrößen. Bewertete Strahlungsgrößen heißen auch aktinische Strahlungsgrößen. Kommen fotometrische und radiometrische Größen gleichzeitig vor, werden zur Unterscheidung die strahlungsphysikalischen Größen mit dem Index „e“ (energetisch) und die fotometrischen Größen mit dem Index „v“ (visuell) gekennzeichnet.

Da fotometrische Größen in speziell definierten Einheiten angegeben werden, die historisch über Primärstrahler mit festgelegten Betriebsbedingungen defi-