

1

Lichttechnische Grundlagen

Licht lässt sich als vom Menschen wahrnehmbare *elektromagnetische Welle* beschreiben, die sich mit der Geschwindigkeit $c_0 = 299\,792\,458\text{ m/s}$ durch Vakuum und mit entsprechend dem *Brechungsindex* n (vgl. Abschnitt 3.3) verminderter Geschwindigkeit $c = \frac{c_0}{n}$ durch transparente Medien ausbreiten kann. Eine solche Welle ist durch ihre *Frequenz* f (unabhängig vom Medium) und ihre *Wellenlänge* λ (abhängig vom Medium, durch das sich die Welle bewegt) charakterisiert; beide hängen über

$$\lambda \cdot f = c \quad (1.1)$$

zusammen. Die Wellenlänge λ beschreibt den räumlichen Abstand zweier Intensitätsmaxima, die Frequenz f den zeitlichen (für die *Periode* T der Welle gilt $T = \frac{1}{f}$). Die Intensität der Welle ist durch das Quadrat der Amplitude gegeben und entspricht der Leistungsdichte. Während es ein breites *elektromagnetisches Spektrum* mit einer Vielzahl technisch genutzte Wellenlängen und Frequenzen gibt, ist nur ein kleiner Teil für den Menschen als *Licht* sichtbar: nämlich diejenigen Wellenlängen, die zwischen 380 nm (blau) und 730 nm (rot) liegen. Dieser Ausschnitt des elektromagnetischen Spektrums wird als (*sichtbares*) *Licht* bezeichnet. In der Beleuchtungstechnik werden manchmal auch benachbarte Wellenlängenbereiche betrachtet: Wellenlängen zwischen 10 nm und 380 nm (Ultraviolett-Strahlung, UV-Strahlung), die zwar nicht sichtbar sind, aber Farbpigmente und die menschliche Haut schädigen können, und solche zwischen 730 nm und ca. 1 μm (Infrarotstrahlung, IR-Strahlung), die als *Wärme* wahrnehmbar ist.

Insbesondere zum Verständnis von LEDs und Lasern (vgl. Abschnitt 2.3) ist es sinnvoll, Licht nicht nur als Welle, sondern als *Photonenstrom* zu verstehen. Hierbei werden elektromagnetische Wellen als Strom von Teilchen (*Photonen*) beschrieben, denen über ihre *Energie* E eine Frequenz zugeordnet ist: es gilt $E = h \cdot f$ mit dem PLANCK'schen Konstante $h = 6.62607015 \cdot 10^{-34}\text{ Js}$. Bei

Stoßprozessen in Halbleitermaterialien kann somit Energie in Form dieser *Lichtteilchen* abgegeben werden.

Für die eigentliche Beleuchtungstechnik ist jedoch weder die Vorstellung von Licht als Welle noch als Photonenstrom wirklich relevant: echte Wellenphänomene wie Interferenz oder Beugung kommen nur in wenigen Anwendungen vor und es wird auch nicht mit einzelnen Photonen gearbeitet. Vielmehr kann man hier im Rahmen der *geometrischen Optik* die Ausbreitung von Licht als *Lichtstrahlen* beschreiben. Ein solcher Strahl definiert die Ausbreitungsrichtung der elektromagnetischen Welle und steht senkrecht auf ihren *Wellenfronten*, d. h. den Flächen gleicher Intensität. Optische Elemente können die Richtung der Lichtstrahlen ändern und so *Lichtlenkung* beschreiben (vgl. Kapitel 3).

■ 1.1 Lichttechnische Größen und Einheiten

Nicht für alle Wellenlängen des sichtbaren Lichts ist das menschliche Auge gleich empfindlich (vgl. Abschnitt 1.2): die wahrgenommene „Helligkeit“ einer Lichtquelle hängt nicht nur von der Strahlungsleistung, sondern unter anderem auch von der Lichtwellenlänge ab. Diese Abhängigkeit wird durch die *spektrale Empfindlichkeitskurve* („ $V(\lambda)$ -Kurve“) des menschlichen Auges beschrieben. Diese Kurve wurde empirisch ermittelt [Wri29, Gui31] und ist in den Veröffentlichungen der *Internationalen Beleuchtungskommission* (CIE) [CIE19] und in Deutschland in DIN 5031 [DIN18] festgelegt.

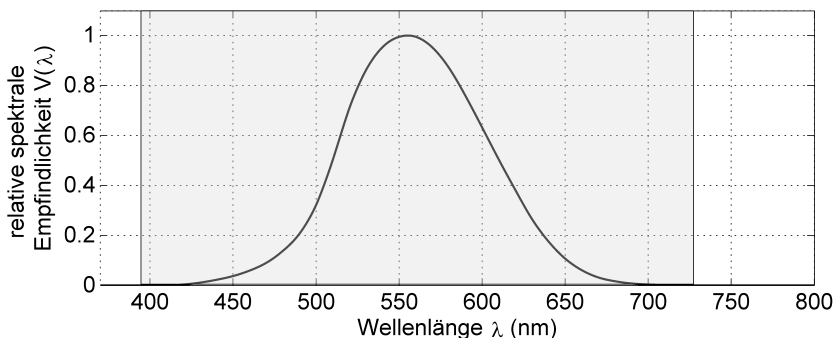


Bild 1.1 Spektrale Empfindlichkeitskurve des menschlichen Auges (Tagsehen). Der grau hinterlegte Bereich markiert den sichtbaren Wellenlängenbereich.

Mithilfe der $V(\lambda)$ -Kurve kann nun aus einer *Strahlungsleistung* („radiometrische Größe“ G_R) je nach Wellenlänge λ eine *wahrnehmungsgewichtete* Größe („photometrische Größe“ G_V) bestimmt werden:

$$G_V = K_m \cdot V(\lambda) \cdot G_R, \quad (1.2)$$

wobei $K_m = 683 \text{ lm/W}$ das *photometrische Strahlungsäquivalent* ist. Hat die Strahlung nicht nur eine Wellenlänge, so gilt

$$G_V = K_m \cdot \int V(\lambda) G_R(\lambda) d\lambda, \quad (1.3)$$

wobei über den sichtbaren Wellenlängenbereich integriert wird.

Mithilfe der Gleichungen 1.2 bzw. 1.3 können nun verschiedene lichttechnische Größen definiert werden. Sie alle versuchen in unterschiedlicher Weise die menschliche „Helligkeitsempfindung“ messtechnisch erfassbar zu machen.

1.1.1 Lichtstrom

Die von einer Lichtquelle abgestrahlte *Strahlungsleistung* (nicht zu verwechseln mit der *elektrischen Anschlussleistung*!) wird radiometrisch als Leistung in Watt gemessen. Photometrisch, d. h. mit $V(\lambda)$ entsprechend Gleichung 1.3 gewichtet, entsteht daraus der *Lichtstrom* Φ , gemessen in *Lumen* (lm) – die von einer Lichtquelle insgesamt abgestrahlte wahrnehmbare *Lichtleistung*. Eine Kerze strahlt etwa 10lm ab, eine 100-W-Glühlampe 1380lm, eine Straßenleuchte um 1000lm und die Sonne $3.8 \cdot 10^{28}$ lm.

Geben eine rote ($\lambda = 650 \text{ nm}$) und eine grüne ($\lambda = 555 \text{ nm}$) LED jeweils 0.5W Strahlungsleistung ab, kann man der $V(\lambda)$ -Kurve $V(555 \text{ nm}) = 1$ und $V(650 \text{ nm}) \approx 0.1$ entnehmen. Damit gilt für die Lichtströme

$$\Phi_{\text{rot}} \approx 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \cdot 0.1 \cdot 0.5 \text{ W} = 34.15 \text{ lm},$$

$$\Phi_{\text{grün}} \approx 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \cdot 0.5 \text{ W} = 341.5 \text{ lm}.$$

Die grüne LED hat einen deutlich höheren Lichtstrom bei gleicher Strahlungsleistung.

Der Lichtstrom ist eine wichtige Kennzahl, hängt aber mit der menschlichen „Helligkeitsempfindung“ nur sehr indirekt zusammen: je nach bestrahlter Fläche und Entfernung können Lichtquellen gleichen Lichtstroms sehr unterschiedliche Helligkeitsempfindungen erzeugen.

Der bezogen auf die elektrische Anschlussleistung ausgesandte Lichtstrom ist die *Lichtausbeute* η (in lm/W). Sie ist eine wichtige Bezugsgröße für die Bewertung von Lichtquellen und Leuchten. Bei einer höheren Lichtausbeute wird mehr aufgenommene Leistung in Licht umgesetzt, die Lichtquelle oder Leuchte ist also effizienter. Glühlampen erreichen $10 \cdots 20$ lm/W, LEDs bis 300 lm/W.

1.1.2 Beleuchtungsstärke

Bei der Planung von Beleuchtungsanlagen wird häufig die „Helligkeit“ auf festen, horizontal oder vertikal angeordneten Flächen bewertet. Dazu gehört die *Beleuchtungsstärke* E in Lux (lx), die dem *Lichtstrom pro Fläche* entspricht.

$$E = \frac{d\Phi}{dA}. \quad (1.4)$$

Es ist also $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2$.

In einer sternenklaren Nacht bei Neumond werden auf der Erdoberfläche etwa 0.1 lx, bei Vollmond etwa 5 lx erzeugt. Auf Büro-Arbeitsflächen sollen mindestens 500 lx erreicht werden. An einem Sommertag können auf der Erdoberfläche bis zu 100 000 lx erreicht werden.

Die Beleuchtungsstärke ist eine wichtige *Planungs-* und *Bewertungsgröße* für Beleuchtungsanlagen im Innen- und Außenraum. Sie kann direkt gemessen werden; die Beleuchtungsstärkemessung ist die Grundlage aller lichttechnischen Messungen. Neben den Punktbeleuchtungsstärken E_i an jedem Punkt eines Mess- oder Bewertungsrasters sind häufig noch die *maximalen* und *minimalen* Beleuchtungsstärkewerte E_{\min} und E_{\max} , der *Mittelwert*

$$\bar{E} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i \quad (1.5)$$

und die *Gleichmäßigkeit*

$$U_0 = \frac{E_{\min}}{\bar{E}}. \quad (1.6)$$

Je nach Form der Fläche A , auf die die Beleuchtungsstärke bezogen wird, spricht man von sphärischer, zylindrischer, horizontaler, vertikaler Beleuchtungsstärke. Die *horizontale* Beleuchtungsstärke ist für die Beleuchtung von waagerechten Arbeitsflächen (Schreibtisch, Operationsfeld, Straße, ...)

relevant, die vertikale bei angeleuchteten senkrechten Flächen (Tafel, Projektionsfläche, Verkehrsschild, ...). Zylindrische und sphärische Beleuchtungsstärken werden zur Bewertung der räumlichen Wahrnehmung verwendet (Gesichtswahrnehmung in Besprechungsräumen, Wahrnehmung von Hindernissen auf der Straße, ...).

1.1.3 Lichtstärke

Der in eine *Raumrichtung* abgestrahlte Lichtstrom einer Lichtquelle entspricht der *Lichtstärke* I gemessen in der SI-Basiseinheit Candela (cd). Dabei entspricht die Lichtstärke dem Lichtstrom pro *Raumwinkeleinheit*:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}. \quad (1.7)$$

Der *Raumwinkel* Ω wird als Verhältnis zweier Flächen definiert: ist $A_K = 4\pi \cdot R^2$ die Oberfläche einer Kugel mit Radius R , von der durch die ausgesandte Strahlung die Fläche dA überdeckt wird, so hat das Strahlenbündel den Raumwinkel

$$d\Omega = \frac{dA}{R^2}. \quad (1.8)$$

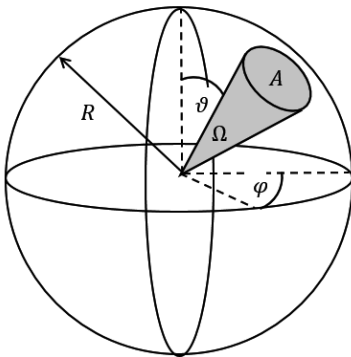


Bild 1.2 Definition des Raumwinkels Ω . Die Winkel φ und ϑ , die Kugelkoordinaten definieren, sind ebenfalls eingetragen.

Eine *Vollkugel* überdeckt den Raumwinkel $\Omega = 4\pi$, da hier ja $A = 4\pi \cdot R^2$ gilt. Der Raumwinkel eines Kugelflächenteils mit $0 \leq \varphi \leq \alpha$ und $-\beta \leq \vartheta \leq \beta$ kann in Kugelkoordinaten durch Integration über den Winkelbereich berechnet werden:

$$\Omega = \int_0^\alpha \int_{-\beta}^\beta \sin \vartheta \, d\vartheta \, d\varphi = \alpha \cdot (1 - \cos(2\beta)) = 2\alpha \cdot \sin^2(\beta). \quad (1.9)$$

Für einen *Kegel* mit halbem Öffnungswinkel β gilt dann mit $\alpha = 2\pi$

$$\Omega = 4\pi \cdot \sin^2\left(\frac{\beta}{2}\right). \quad (1.10)$$

Der Raumwinkel hat die Einheit *Steradian* (sr). Damit gilt für die Einheit der *Lichtstärke*:

$$1 \text{ cd} = 1 \frac{\text{lm}}{\text{sr}}. \quad (1.11)$$

Für Lichtquellen, deren Ausdehnung *klein* gegenüber der Entfernung R vom Beobachter ist, gilt das *photometrische Entfernungsgesetz*:

$$\begin{aligned} E &= \frac{d\Phi}{d\Omega} = \frac{I \cdot d\Omega}{dA} \quad \left(\text{mit } I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \Rightarrow d\Phi = I d\Omega \right) \\ &= \frac{I \cdot \cos \varepsilon}{R^2}. \end{aligned} \quad (1.12)$$

Im letzten Schritt wurde Gleichung 1.8 verwendet.

Mithilfe von Gleichung 1.12 kann zum einen aus einer gemessenen Beleuchtungsstärke in fester Entfernung und Richtung auf die unter dem Winkel ε zur Detektorfläche ausgesandte Lichtstärke geschlossen werden, was die Grundlage der *Lichtstärkemessung* ist. Zum anderen bildet es die Grundlage der *Punktbeleuchtungsmethode* in der Beleuchtungsplanung, bei der aus der gegebenen Lichtstärkeverteilung einer Leuchte die Beleuchtungsstärke an definierten Punkten einer Arbeitsfläche berechnet wird. Solche Berechnungen werden in Computerprogrammen zur Beleuchtungsplanung (DIALUX, RELUX) verwendet und können benutzt werden, um die mithilfe einer gegebenen Leuchte mit festgelegter Lichtstärkeverteilung auf definierten Ebenen erreichbare Beleuchtungsstärke abzuschätzen.

Eine *Faustregel* für die Anwendbarkeit des photometrischen Entfernungsgesetzes ist: Die größte Ausdehnung der Lichtquelle D sollte kleiner als der zehnfache Abstand zur Fläche, auf der die Beleuchtungsstärke betrachtet wird, sein. Dieser Abstand wird auch als *photometrische Grenzentfernung* bezeichnet.

Die in die verschiedenen Raumrichtungen ausgesandte Lichtstärke einer Leuchte wird durch ihre *Lichtstärkeverteilungskurve* (LVK) beschrieben. Dabei wird I als Funktion eines Winkels in festgelegten Ebenen angegeben (vgl. Bild 1.3).

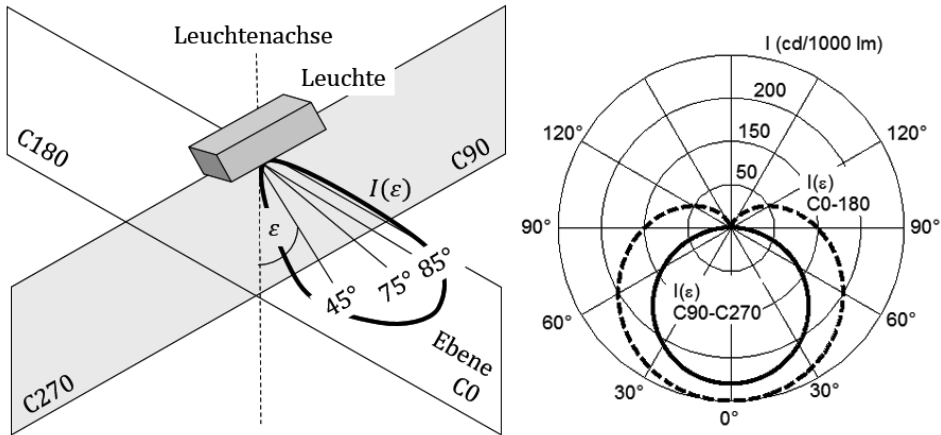


Bild 1.3 Definition der C-Ebenen sowie Darstellung der Lichtstärkeverteilungskurven einer Leuchte in den Ebenen C0-C180 und C90-C270

1.1.4 Leuchtdichte

Die *Leuchtdichte* L entspricht am ehesten der menschlichen „Helligkeitswahrnehmung“. Es ist

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dA \cdot \cos \varepsilon}, \quad (1.13)$$

die Leuchtdichte bestimmt also den Lichtstrom pro Raumwinkel und projizierter Fläche. Sie ist eine Eigenschaft von Lichtquellen (also selbst leuchtenden Flächen), aber auch von mit dem Lichtstrom Φ bestrahlten Flächen. Ihre Einheit ist

$$\frac{\text{lm}}{\text{sr} \cdot \text{m}^2} = \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}. \quad (1.14)$$

Insbesondere im angelsächsischen Sprachraum heißt diese Einheit auch „Nit“.

Isotrope Lichtemitter haben eine *Lichtstärke* I_0 , die nicht von der Raumrichtung abhängt. Für sie gilt

$$I = I_0 = A \cdot L_0 \quad \text{und} \quad L = \frac{L_0}{\cos \varepsilon}, \quad (1.15)$$

die Beleuchtungsstärke erfüllt $E = 2\pi \cdot L_0$ und der insgesamt abgestrahlte Lichtstrom ist $\Phi = 2\pi \cdot I_0$.

LAMBERTsch abstrahlende Lichtemitter haben eine konstante *Leuchtdichte* $L = L_0$. Sie wirken aus allen Raumrichtungen betrachtet „gleich hell“. Die Lichtstärke in Abstrahlungsrichtung ε erfüllt

$$I = I_0 \cdot \cos \varepsilon \quad (1.16)$$

mit $I_0 = A \cdot L_0$ und der Gesamtlichtstrom ist $\Phi = \pi \cdot I_0$. LAMBERT-Strahler können selbst leuchten (ein LED-Chip strahlt in guter Näherung so ab), aber auch *diffus streuende* (vgl. Abschnitt 3.4), beleuchtete Flächen sein. Ein angestrahltes Blatt Papier oder auch eine Zimmerwand strahlen so ab. Für eine mit der Beleuchtungsstärke E bestrahlte, diffus streuende Fläche mit Reflexionsgrad ρ gilt

$$L = \frac{E \cdot \rho}{\pi}. \quad (1.17)$$

Gleichung 1.17 wird bei der Planung von Beleuchtungsanlagen verwendet, um von der leicht messbaren Größe „Beleuchtungsstärke“ auf die der menschlichen Wahrnehmung besser entsprechenden Größe „Leuchtdichte“ *umzurechnen*.

Der Vollmond hat eine Leuchtdichte von 2500 cd/m^2 , die Sonne von $1.6 \cdot 10^9 \text{ cd/m}^2$. Leuchtstofflampen haben um 50000 cd/m^2 , LEDs $6 \cdot 10^6 \text{ cd/m}^2$.

1.1.5 Übersicht

In der folgenden Tabelle 1.1 sind radiometrische und photometrische Größen und Einheiten zusammengefasst.

Tabelle 1.1 Übersicht über lichttechnische Größen und Einheiten. Es sind sowohl die deutschen als auch die in Datenblättern weit verbreiteten englischen Bezeichnungen angegeben.

radiometrische Größe	Einheit	photometrische Größe	Einheit
Strahlungsleistung radiant flux	Watt (W)	Lichtstrom Φ luminous flux	Lumen (lm)
Intensität radiant intensity	W/sr	Lichtstärke I luminous intensity	Candela (cd = lm/sr)
Bestrahlungsstärke irradiance	W/m ²	Beleuchtungsstärke E illuminance	Lux (lx = lm/m ²)
Strahldichte radiance	W/(m ² sr)	Leuchtdichte L luminance	cd/m ² = lm/(m ² sr)

■ 1.2 Licht und Farbe

1.2.1 Lichtwahrnehmung

Die Wirkung des Lichts kann nicht ausschließlich als physikalischer Vorgang (durch Wellenlänge, Leistung, ...), sondern nur im Zusammenspiel mit den menschlichen Sinneszellen, d. h. als *physiologischer* Vorgang beschrieben werden.

Das menschliche Auge verfügt über zwei Typen von Sinneszellen zur Lichtwahrnehmung: Die *Stäbchen*, die nur Helligkeit, aber keine Farbe wahrnehmen, und die *Zapfen*, die sowohl an der Helligkeits- als auch an der Farbwahrnehmung (vgl. Abschnitt 1.2.2) beteiligt sind. Am *Nachtsehen* (skotopisches Sehen) bei Leuchtdichten unter 10^{-3} cd/m^2 sind nur die Stäbchen, beim *Tagsehen* (fotopisches Sehen) über $3 \cdots 30 \text{ cd/m}^2$ sind nur die Zapfen aktiv.

Wahrnehmungsgröße ist nicht direkt die *Leuchtdichte* eines Objekts, sondern der *Leuchtdichtekontrast* im Vergleich zur Umgebung. Das Auge ist adaptionsfähig und kann sich an sehr unterschiedliche Beleuchtungsniveaus anpassen, so dass der oben genannte große Bereich an Leuchtdichten wahrnehmbar ist.

Die Sehleistung und das Wohlbefinden bei Sehaufgaben wird durch *Blendung* beeinträchtigt. Blendquellen erzeugen eine *Schleierleuchtdichte*, die den Kontrast zur Umgebung herabsetzt.

Bei *physiologischer* Blendung ist die Sehleistung messbar beeinträchtigt. Die Blendquelle kann durch eine Schleierleuchtdichte L_V mit

$$\frac{L_V}{E_{Bl}} = \frac{10}{\theta^3} + \frac{5}{\theta^2} \cdot \left(1 + \frac{\text{Alter}}{62.5 \text{ Jahre}} \right) \quad (1.18)$$

beschrieben werden. Dabei ist E_{Bl} von der Blendquelle erzeugte Beleuchtungsstärke und θ der Winkel zwischen Blendquelle und Blickrichtung. Die Schleierleuchtdichte ist abhängig vom *Alter* der geblendeten Person; mit zunehmendem Alter wird man *empfindlicher* für Blendung. Dies ist bei der Planung von Beleuchtungsanlagen, unter anderem aus Gründen des Arbeitsschutzes, zu berücksichtigen.

Im Innenraum sollte physiologische Blendung nicht auftreten, sie kann in der Regel hier gut vermieden werden. Bei Beleuchtungsanlagen im Außenraum ist das nicht immer möglich. Ein übliches Maß zur Blendbewertung ist der

Blendungswert GR („glare rating“) oder R_G mit

$$R_G = 27 + 24 \cdot \log_{10} \left(\frac{L_V}{0.035 \cdot L_{\text{Umgebung}}^{0.9}} \right), \quad (1.19)$$

wobei L_V die Schleierleuchtdichte nach Gleichung 1.18 ist. Die *logarithmische* Abhängigkeit vom Leuchtdichtekontrast zur Umgebung gibt die ebenfalls logarithmische Helligkeitsempfindung des Menschen wieder. Die Zahlenwerte sind hier empirisch so bestimmt, dass sich sinnvolle Schwellwerte für Blendempfindungen ergeben.

Ist die Sehleistung durch Blendung nicht verringert, aber das Wohlbefinden gestört, spricht man von *psychologischer* Blendung. Da sie sich durchaus messbar z. B. auf die Ermüdungsgeschwindigkeit auswirken kann, muss auch sie bei der Planung von Beleuchtungsanlagen berücksichtigt und bewertet werden. Dies geschieht durch den UGR -Wert („unified glare rating“) R_{UG} , der für eine Anlage mit n Blendquellen mit Leuchtdichten L_i ($i = 1, \dots, n$) mit den entsprechenden Raumwinkeln Ω_i bestimmt werden kann:

$$R_{UG} = 8 \cdot \log_{10} \left(\frac{0.25}{L_{\text{Umgebung}}} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{L_i^2 \cdot \Omega_i}{p_i^2} \right). \quad (1.20)$$

Der *Positionsindex* p nach GUTH [Gut51, Gut58] berücksichtigt die Lage der Blendquellen zur Blickrichtung. In *Blickrichtung* gilt $p = 1$, ansonsten wird p aus den horizontalen (d) und vertikalen (s) Abständen zwischen geblendeter Person und Blendquelle berechnet:

$$p = \frac{d^2 \cdot e}{d^2 + 1.5 \cdot d + 4.6} + 0.12 \cdot (1 - e)$$

mit $e = \exp \left(-0.18 \cdot \frac{s^2}{d} + 0.011 \cdot \frac{s^3}{d} \right).$

(1.21)

Auch hier sind die Zahlenwerte empirisch bestimmt.

Mithilfe von R_G und R_{UG} können Blendungsklassen definiert werden, auf die dann wiederum z. B. in Normen zur Bewertung von Beleuchtungsanlagen verwiesen wird. $R_G < 20$ und $R_{UG} < 16$ gelten als „unmerkliche“ Blendung, $30 < R_G < 40$ und $19 < R_{UG} < 22$ sind „erkennbar“, $R_G = 50$ und $R_{UG} = 25$ sind „gerade noch nicht störend“ und höhere Werte dann „störend“. An Büro-Arbeitsplätzen ist z. B. $R_{UG} \leq 19$ gefordert, bei Arbeiten in der Elektronikproduktion oder auch Medizin (z. B. zahnmedizinischer Behandlungsplatz) $R_{UG} \leq 16$. [DIN21, DIN14]

Praktisch werden R_{UG} und R_G durch Planungsprogramme für eine Beleuchtungsanlage berechnet; sie können auch für einfache Fälle aus Tabellenwerken entnommen werden.