Beleuchtungstechnik

Vorlesungsmanuskript
von
Prof. Dr. G. Waller

Fachhochschule Kiel
Fachbereich
Informatik und Elektrotechnik

Version 1.4

ab SS 2006

Inhaltsverzeichnis

1 Die Lichttechnischen Größen 5
- 1.1 Licht und Strahlung 5
- 1.2 Die Temperaturstrahlung - schwarzer Körper 6
- 1.3 Lichtempfindlichkeit des menschlichen Auges 9
- 1.4 Der Lichtstrom 11
- 1.5 Die Lichtmenge 12
- 1.6 Die Lichtstärke 13
- 1.7 Die Beleuchtungsstärke 14
- 1.8 Die Leuchtdichte 16
- 1.9 Licht und Farbe 20
- 1.10 Zusammenfassung 22

2 Die Sehleistung des Auges 25
- 2.1 Leuchtdichte und Adaption 25
- 2.2 Kontrast und Unterschiedsempfindlichkeit 26
- 2.3 Sehschärfe 28
- 2.4 Wahrnehmungsgeschwindigkeit 28
- 2.5 Farbwahrnehmung 29
- 2.6 Blendung 29

3 Lichtmessung 31
- 3.1 Grundlagen 31
- 2.2 Messung lichttechnischer Größen 32

4 Lichterzeugung 36
- 4.1 Allgemeines über Lampen 36
- 4.2 Lampentypen 37

5 Beleuchtung mit Tageslicht 45
- 5.1 Anforderungen 45
- 5.2 Berechnung der Tageslichtbeleuchtung 47

6 Innenraumbeleuchtung mit künstlichem Licht 51
- 6.1 Allgemeine Vorbemerkungen 51
- 6.2 Gütemerkmale einer Innenraumbeleuchtung 51
- 6.3 Planung und Berechnung der Innenbeleuchtung mit künstlichem Licht 55

1 Die Lichttechnischen Größen

Video Nr. 1: Lichtwirkung

1.1 Licht und Strahlung

Die Lösung von Beleuchtungsproblemen ist nicht allein ein physikalisches oder technisches Problem, sondern hängt sehr stark mit dem Sehprozess des menschlichen Auges zusammen. Das Auge ist ein Strahlungsmessgerät, welches nur in einem sehr engen Frequenzbereich der elektromagnetischen Strahlung empfindlich ist.

Folie Nr. 1: elektromagnetische Strahlung

Der Grund für diese Begrenzung hängt mit der Sonnenstrahlung zusammen, die gerade im Empfindlichkeitsmaximum des Auges auch ihren Maximalwert hat (siehe 1.2). Dadurch kann das Auge mit relativ unempfindlichen Strahlungssensoren ausgerüstet sein. Als **Licht** bezeichnet man jetzt genau den Strahlungsbereich in dem das Auge empfindlich ist. Dieser Bereich kann durch folgende Grenzen festgelegt werden: ($\lambda = c/f$)

kurzwellige Grenze:	λ = 380 nm,	f = $7{,}89 \cdot 10^{14}$ Hz	violett
langwellige Grenze:	λ = 780 nm,	f = $3{,}85 \cdot 10^{14}$ Hz	rot

Diese Grenzen sind dabei fließend, da die Empfindlichkeit der Augen unterschiedlich sein kann.

Technisch wichtig für die Beleuchtungstechnik sind auch noch die Randbereiche des sichtbaren Lichtes, da diese Strahlungen durchaus Wirkungen auf den Menschen haben können, ohne dass sie durch die Augen wahrgenommen werden können. Wir unterscheiden:

Bezeichnung		Wellenlängen-bereich
Ultraviolettstrahlung	UV-C	100 nm ... 280 nm
	UV-B	280 nm ... 315 nm
	UV-A	315 nm ... 380 nm
sichtbares Licht		380 nm ... 780 nm
Infrarotstrahlung	IR-A	780 nm ... 1,4 µm
	IR-B	1,4 µm ... 3 µm
	IR-C	3 µm ... 1 mm

Will man die von einer Lichtquelle ausgehende Strahlung bewerten, so muss man sie folglich in ihre Wellenlängenanteile zerlegen. Dies kann z.B. mit einem Prisma oder einem Gitter geschehen. Außerdem muss die jeweilige Strahlungsleistung bei einer bestimmten Wellenlän-

ge gemessen werden:

Folie Nr. 19: Beispielspektren

Mit Φ_e wird die gesamte **Strahlungsleistung**, also die Energieabstrahlung pro Sekunde, einer Lichtquelle bezeichnet. Dann ist die bei der Wellenlänge λ beobachtete Strahlungsleistung (**spektrale Strahlungsleistung**) gegeben durch:

$$\Phi_{e\lambda} = \frac{d\Phi_e}{d\lambda} \quad , \quad \Phi_e = \int_\lambda \Phi_{e\lambda} \cdot d\lambda \tag{1.1}$$

Diese Größe $\Phi_{e\lambda}$ über der Wellenlänge λ aufgetragen ergibt das **Spektrum** einer Strahlungsquelle.

1.2 Die Temperaturstrahlung - schwarzer Körper

Da die Empfindlichkeit des menschlichen Auges an das Spektrum der Sonne angepasst ist, kommt der Sonnenstrahlung als Lichtquelle naturgemäß eine besondere Bedeutung zu. Alle Lichtquellen müssen sich mit dieser natürliche Quelle in gewisser Weise messen. Die Sonne ist ein so genannter **thermischer Strahler** und auch die Mehrzahl der in der menschlichen Vergangenheit verwendeten Lichtquellen sind thermische Strahler, d.h. es wurden Verbrennungsprozesse genutzt um Wärme und Licht zu erzeugen. Diese waren allerdings weit entfernt von einem sonnenähnlichen Spektrum. Erst in den letzten 100 Jahren wurden auch Lichtquellen entwickelt, die nicht mehr zu den thermischen Strahlern zu zählen sind.

Folie Nr. 2: Spektrum der Sonnenstrahlung

Ein Modell für einen idealen thermischen Strahler ist der „**schwarze Körper**“.

Ein Körper, der alles sichtbare Licht absorbiert erscheint uns **vollkommen schwarz**. Einen solchen Körper gibt es in der Natur nicht. Selbst Ruß besitzt noch einen Reflexionsgrad von etwa 4%. Er lässt sich aber technisch in sehr guter Näherung realisieren. Dazu wird ein Hohlraum verwandt, dessen Innenwände gut geschwärzt sind. Die einfallende Strahlung wird häufig reflektiert und verliert jedesmal Energie. Es kann praktisch keine Strahlung aus dem Hohlraum entweichen. Wir sprechen von einem **schwarzen Körper**.

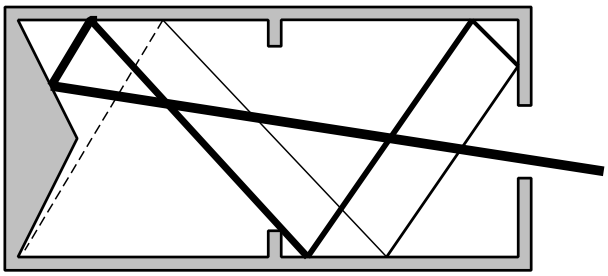


Abb. 1.1

Durch die ständige Energiezufuhr würde sich der schwarze Körper aber ständig aufheizen. Damit nimmt automatisch seine Emission zu. Es stellt sich ein Gleichgewicht ein, bei dem der schwarze Körper genau so viel Energie abstrahlt, wie er aufnimmt. D.h. seine **Emission ist**

genau so groß wie seine Absorption. Da ein schwarzer Körper optimal absorbiert, muss er umgekehrt genauso gut emittieren. Damit gilt:

Ein schwarzer Körper besitzt von allen Körpern bei gegebener Temperatur die höchste Energieabstrahlung: schwarzer Strahler.

Für die gesamte Strahlungsmenge, die von einem schwarzen Körper ausgesandt wird, wurde von **Stefan** und **Boltzmann** die folgende Beziehung gefunden:

$$\Phi_{e,SK} = A \cdot \sigma \cdot T^4 \tag{1.2}$$

Die Konstante σ heißt **Stefan-Boltzmann-Konstante** und hat den Wert:

$$\sigma = 5{,}57 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \tag{1.3}$$

Dieses Gesetz wird auch häufig als **Boltzmannsches T-hoch-4-Gesetz** bezeichnet, da es nur wenige physikalische Gesetze mit so hohen Potenzen gibt. Diese hohe Potenz bewirkt, dass bei hohen Temperaturen der größte Teil der Wärmeabgabe eines Körpers über die Strahlung erfolgt, bei niedrigen Temperaturen dagegen die Konvektion und die Wärmeleitung überwiegt.

Die Gesamtstrahlung eines schwarzen Körpers kann natürlich nicht auf alle Wellenlängen gleichmäßig verteilt sein, da dann immer eine unendliche Energiemenge vorliegen müßte. Man beobachtet vielmehr eine Wellenlänge, bei der die Energieabstrahlung maximal ist, darüber und darunter nimmt die Energieabstrahlung stark ab. Der erste, der die Verteilung der Strahlungsenergie auf die Wellenlängen exakt beschreiben konnte war **Max Plank**. Dafür musste er annehmen, dass die Energie nicht kontinuierlich abgestrahlt wurde, sondern immer in **Energiepaketen** zusammengefasst ist (sogenannte **Quanten**):

$$\Phi_{e\lambda,SK}(\lambda, T) = A \cdot \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1} \tag{1.4}$$

mit den Konstanten $c_1 = 3{,}74 \cdot 10^{-16}$ W·m² und $c_2 = 0{,}0144$ m·K.

Die Strahlungskurve eines schwarzen Körpers zeigt auf der Seite kurzer Wellenlängen einen sehr steilen Abfall, auf der Seite großer Wellenlängen dagegen einen langsamen Abfall.

Erst bei sehr hohen Temperaturen liegt das Maximum der Kurve in dem Wellenlängenbereich, der dem menschlichen Auge zugänglich ist. Naturgemäß entspricht die zugehörige Temperatur genau der Oberflächentemperatur der Sonne von 5800K.

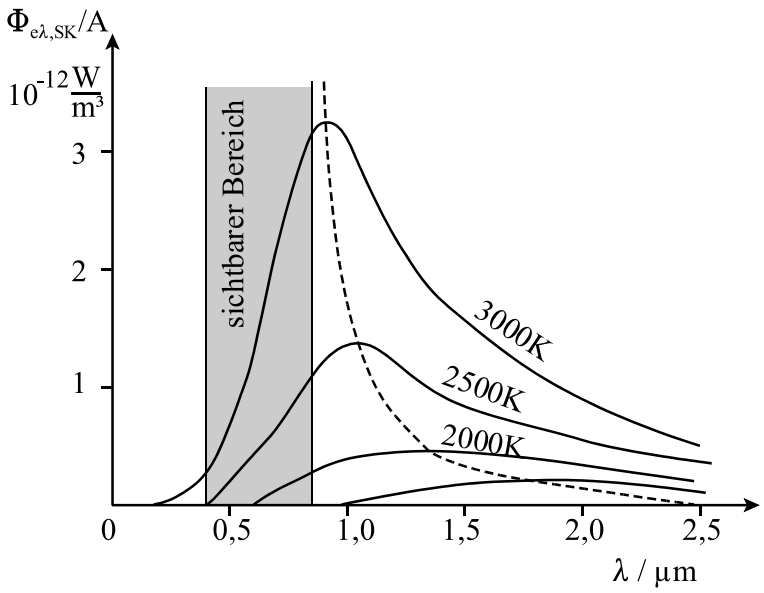


Abb. 1.2

Bei niedrigeren Temperaturen liegt das Maximum der Strahlung im so genannten **Infrarot-Bereich**. Dies bezeichnen wir als Wärmestrahlung, da alle heißen Körper auf der Erde in diesem Bereich ihre maximale Abstrahlung besitzen. Das Maximum der Kurve ist temperaturabhängig nach dem so genannten **Wienschen Verschiebungsgesetz**:

$$\lambda_{max} \cdot T = 0{,}2896 cm \cdot K \tag{1.5}$$

Da jeder reale Körper eine geringere Emission besitzt als ein schwarzer Körper, muss dessen Strahlungsverteilung über der Wellenlänge stets unterhalb der Plankschen Strahlungskurve bei gleicher Temperatur verlaufen. Dabei ist der Verlauf in der Regel sehr unregelmäßig über der Wellenlänge verteilt. Da der Absorptionskoeffizient gleich dem Emissionskoeffizienten ist, besitzt dieser auch die gleiche Wellenlängenabhängigkeit.

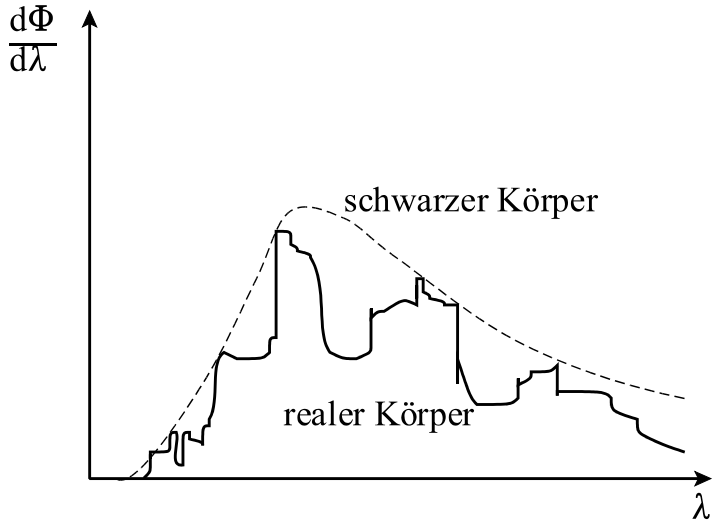


Abb. 1.3

Es gilt:

$$\Phi_{e\lambda} = \varepsilon(\lambda, T) \cdot \Phi_{e\lambda,SK} \tag{1.6}$$

Falls für einen Körper gilt:

$\varepsilon(\lambda,T) = 1$, so heißt er „schwarz“,

$\varepsilon(\lambda,T) < 1$, so heißt er „grau“,

$\varepsilon(\lambda,T) = 0$, so heißt er „weiß“,

Da jeder Körper bei seiner eigenen Temperatur T strahlt und infolge der Raumtemperatur T_U gleichzeitig Strahlung aufnimmt, gilt insgesamt für die abgestrahlte Wärmeleistung:

$$\Phi_e = A \cdot \varepsilon(\lambda, T) \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_U^4) \tag{1.7}$$

Wie diese Gleichung zeigt, nimmt die Strahlungsleistung eines thermischen Strahlers mit der vierten Potenz der Temperatur zu. So ergibt sich für einen schwarzen Körper ($\varepsilon = 1$) mit der Fläche A = 1cm² folgende abgestrahlte Leistung:

T = 1500 K	Kerzenlicht	$\Phi_{e,SK}$ = 28 W
T = 3000 K	Glühlampe	$\Phi_{e,SK}$ = 450 W
T = 6000 K	Sonne	$\Phi_{e,SK}$ = 7220 W

Zusätzlich zu dieser Leistungssteigerung verschiebt sich das Maximum der Emission immer mehr in den sichtbaren Bereich (Abb. 1.2). Damit steigt der Nutzeffekt für die Beleuchtung noch stärker mit der Temperatur an.

Folie Nr. 2: Visueller Nutzeffekt, Spektrum der Sonnenstrahlung

Anm: Die Lichtausbeute gibt an, wie viel von der Strahlungsleistung Φ_e für das Auge sichtbar ist. Der Maximalwert beträgt 683 lm/W (siehe unten). Dieser Wert wird von keinem schwarzen Strahler erreicht, da stets Strahlungsanteile außerhalb des sichtbaren Bereiches liegen.

1.3 Lichtempfindlichkeit des menschlichen Auges

Die Temperaturstrahlung hat deutlich gezeigt, dass der Strahlungsanteil, der als Licht wahrgenommen wird von der Empfindlichkeit des menschlichen Auges abhängt. Lichttechnische Größen müssen dies folglich berücksichtigen und sind von den physikalischen Strahlungsgrößen zu unterscheiden.

Das wichtigste optische Messgerät für den Menschen sind daher seine Augen.

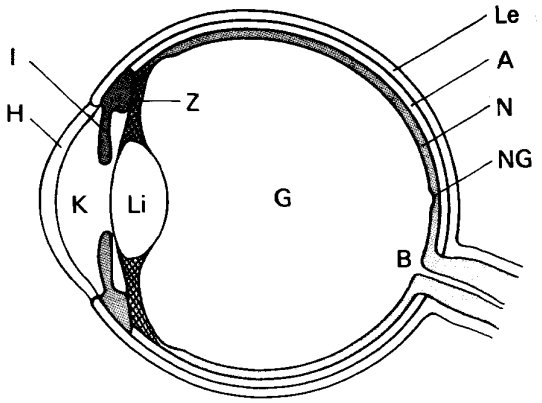


Abb. 1.4

Folie Nr. 3: Das Auge

Das Licht, welches auf das Auge trifft, tritt durch die transparente **Hornhaut H** in das Auge ein. Durch eine mit Flüssigkeit gefüllte **vordere Augenkammer K** gelangt es in die **Linse Li** und von dort in den **Glaskörper G**. Dieser besteht aus einer gallertartigen Masse. Aufgefangen wird das Licht durch die **Netzhaut N**, welche mit lichtempfindlichen Rezeptoren besetzt ist. Vor der Linse befindet sich noch die **Iris I**, welche dazu dient, die einfallende Lichtmenge zu regulieren.

Die Netzhaut des Auges besteht aus etwa 126 Millionen Lichtsensoren. Diese werden nach **Stäbchen** (120 Millionen) und **Zapfen** (6 Millionen) unterschieden. Die Zapfen können verschiedene Farben, also Lichtwellenlängen, unterscheiden. Es existieren drei Arten, die für Rot, Grün und Blau empfindlich sind.

Folie Nr.3: spektrale Empfindlichkeit der Zäpfchen

Die Stäbchen reagieren nur auf Helligkeitsunterschiede, sind dafür aber etwa 500 mal empfindlicher als die Zapfen. Aus diesem Grunde werden bei Dunkelheit nur noch die Stäbchen angesprochen und es lassen sich keine Farben mehr unterscheiden.

Die höchste Konzentration der Zapfen (ca. 135000) befindet sich direkt gegenüber der Linse und wird auch als **gelber Fleck** oder **Netzhautgrube NG** bezeichnet. Hier ist der Bereich des deutlichsten Sehens. In den peripheren Bereichen der Netzhaut nimmt die Dichte der Zapfen ab, die Dichte der Stäbchen dagegen zu.

An der Stelle, an welcher der **Sehnerv** in das Auge eintritt, sind keine lichtempfindlichen Sensoren vorhanden. Dies ist der sogenannte **blinde Fleck B**.

Zapfen und Stäbchen unterscheiden sich nicht nur in ihrer Empfindlichkeit und Farbdifferenzierung, sondern auch im Wellenlängenbereich ihrer Empfindlichkeit. Wir unterscheiden daher das **Tagessehen** und das **Nachtsehen**.

Es ergeben sich zwei unterschiedlich Empfindlichkeitskurven $V(\lambda)$ für das Tagessehen und $V'(\lambda)$ für das Nachtsehen:

Folie Nr. 3: spektraler Hellempfindlichkeitsgrad

Im Bereich der Beleuchtungstechnik ist die Tageswertkurve zu verwenden, da in der Regel stets eine ausreichend gute Beleuchtung angestrebt wird.

1.4 Der Lichtstrom

Diese Kurve dient dazu, aus der physikalischen Größe Strahlungsleistung Φ_e die photometrische Größe **Lichtstrom** Φ zu berechnen:

> Der **Lichtstrom** ist die von einer Quelle ausgesandte oder auf eine Fläche auftreffende Strahlungsleistung bewertet mit der Hellempfindlichkeitskurve V(λ).

Die Einheit des Lichtstromes ist das **Lumen** (lm). Dabei gilt aber nicht die einfache Gleichung

$$\Phi = V(\lambda) \cdot \Phi_e$$

sondern wir müssen bedenken, dass Φ_e wellenlängenabhängig ist. Zudem wird historisch bedingt ein zusätzlicher Maßstabsfaktor eingeführt:

$$\Phi_\lambda = 683 \frac{lm}{W} \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_{e\lambda} \tag{1.8}$$

Φ_λ ist der **spektrale Lichtstrom**. Die Konstante wird als **photometrisches Strahlungsäquivalent** bezeichnet.

Folie Nr. 4: spektraler Lichtstrom einer Glühlampe

Der gesamte Lichtstrom Φ ergibt sich dann als Integration über alle Wellenlängen λ:

$$\Phi = \int_\lambda \Phi_\lambda \cdot d\lambda = 683 \frac{lm}{W} \cdot \int_\lambda V(\lambda) \cdot \Phi_{e\lambda} \cdot d\lambda \tag{1.9}$$

Das Beispiel zeigt deutlich, wie viel Strahlungsenergie einer Glühlampe verloren geht, d.h. nicht für die Beleuchtung zur Verfügung steht, da hier das Spektrum eines schwarzen Strahlers zu Grunde liegt. Für verschiedene Lampentypen ergeben sich folgende typische Lichtströme und damit Lichtausbeuten (= Lichtstrom/elektrische Leistung):

Lampentyp	el. Leistung P /W	Lichtstrom Φ /lm	Lichtausbeute /lm/W
Glühlampe 220V	60	730	12
Halogenlampe 12V	50	1400	28
Leuchtstofflampe	65	5100	78
Bogenlampe 220V	5000	40000	8
Natriumhochdrucklampe	1065	130000	122

(Im Vergleich liefert die Sonne 90 lm/W, s. Folie Nr. 2)

Würde die Glühlampe ihre gesamte Strahlung bei λ = 555 nm (V(λ) = 1) aussenden, so ergäbe sich ein Lichtstrom von Φ = 683 lm/W · 60 W = 40980 lm. Durch die Verteilung auf ein breites Spektrum erhält man aber nur 730 lm, also etwa 1,8 % des Maximalwertes. Der Wirkungsgrad einer Glühlampe ist aus beleuchtungstechnischer Sicht folglich sehr gering. Andere Lampen, wie die Natriumhochdrucklampe konzentrieren durch einen anderen Lichterzeugungsmechanismus ihre Abstrahlung mehr auf den optischen Bereich und erreichen so eine wesentlich höhere Lichtausbeute.

Beispiel:

Folie Nr. 4a: Laserdiode

Eine Laserdiode strahlt bei λ=635nm eine Strahlungsleistung von 15 mW ab. Die Betriebsdaten sind dabei U = 2,4 V, I = 45 mA. Welchem Lichtstrom entspricht dies? Welche Lichtausbeute ergibt sich?

Folie Nr. 3: Tagessehkurve

$$\Phi = 683\frac{lm}{W} \cdot \Phi_e \cdot V(\lambda) = 683\frac{lm}{W} \cdot 15mW \cdot 0{,}25 = 2{,}6lm$$

dies entspricht einer Lichtausbeute von Φ/P = 2,6 lm / 108·10^{-3} W = 24 lm/W.

1.5 Die Lichtmenge

Die von einer Quelle ausgesandte oder von einer Fläche aufgefangene **Lichtmenge** errechnet sich aus dem Lichtstrom und der Zeit, über welche der Lichtstrom vorhanden ist:

$$Q = \Phi \cdot t \tag{1.10}$$

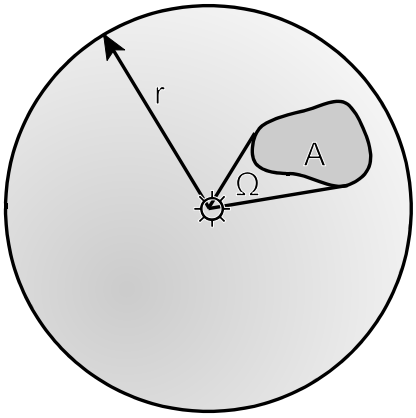
Ihre Einheit ist [Q] = lm·s. Benötigt wird die Lichtmenge z.B. bei Filmbelichtungen oder bei der Berechnung von Beleuchtungskosten. Hierzu ein Beispiel:

Folie Nr. 5: Beleuchtungskostenvergleich

1.6 Die Lichtstärke

Lichtquellen strahlen in der Regel nicht gleichmäßig in alle Raumrichtungen ab (Ausnahme: die Sonne). Daher ist es notwendig, diese Richtungsabhängigkeit des Lichtstromes zu beschreiben.

Diese Größe wird davon abhängen, welchen Fläche A wir zur Messung des Lichtstromes in einer bestimmten Richtung heranziehen. Da bei einer Vergrößerung des Radius r die Fläche A mit r^2 wächst, der Lichtstrom, die A durchdringt jedoch konstant bleibt, ist es sinnvoll als Bezugsgröße das Verhältnis von A/r^2 zu verwenden. Diese Größe bezeichnen wir als **Raumwinkel**:



$$\Omega = \frac{A}{r^2} \qquad (1.11)$$

Abb. 1.5

Diese Definition ist analog zum ebenen Winkel $\varphi = s/r$. Die Einheit des Raumwinkels ist $[\Omega] = m^2/m^2 = sr$ (Steradiant) (wieder ähnlich wie beim ebenen Winkel $[\varphi] = m/m = rad$ (Radiant)). Der Raumwinkel einer vollen Kugeloberfläche ist dann: $\Omega = 4\pi r^2/r^2 = 4\pi$.

Wir definieren jetzt den Lichtstrom in einem bestimmten Raumwinkel als **Lichtstärke**:

$$\bar{I} = \frac{\Phi}{\Omega} \quad \text{oder} \quad I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \qquad (1.12)$$

Für die Einheit folgt: [I] = lm/sr = cd (Candela).

International wird diese Größe als „Brightness" also übersetzt „Helligkeit" bezeichnet.

Beispiele:

a) Eine Haushaltsglühlampe von 60 W strahlt ihren Lichtstrom von etwa 730 lm (siehe Tabelle) nahezu gleichmäßig in alle Raumrichtungen ab. Dies ergibt eine Lichtstärke von $I = 730\ lm/4\pi\ sr = 58\ cd$ in alle Raumrichtungen. Die auf die Leistung bezogene Lichtstärke beträgt also etwa 1 cd/W

b) Berechnung der Lichtausbeute einer weißen LED für Beleuchtungszwecke:

Folie Nr. 4b: LED W47-66-60-120

Angegeben im Datenblatt ist die maximale Lichtstärke I_0 (Brightness) mit 13 cd, die Strahlungsstärke (Radiant Intensity) I_e = 35 mW/sr sowie die Strahlungsleistung (Total Radianted Power) Φ_e = 60 mW. Hieraus lässt sich der gesamte Lichtstrom Φ berechnen:

$$I = \frac{\Phi}{\Omega};\ I_e = \frac{\Phi_e}{\Omega} \Rightarrow \frac{I}{I_e} = \frac{\Phi}{\Phi_e}$$

$$\Rightarrow \Phi = \Phi_e \cdot \frac{I}{I_e} = 60mW \cdot \frac{13cd}{35mW / sr} = 22lm$$

Für die Lichtausbeute ergibt sich dann:

$$\frac{\Phi}{P_{el}} = \frac{22lm}{19V \cdot 0{,}24A} = 4{,}8\frac{lm}{W}$$

Wir sehen, dass die Lichtausbeute einer LED recht bescheiden ist. Die auf die Leistung bezogene Lichtstärke beträgt hier 13 cd/4,6W = 2,85 cd/W. Dies ist auf die stärkere Bündelung des Lichtes zurück zu führen (±55˚).

Die besten weißen LEDs erreichen heute Lichtausbeuten von etwa 20 lm/W.

1.7 Die Beleuchtungsstärke

Betrachten wir jetzt eine Fläche der Größe A, die von einer Lichtquelle beleuchtet wird, so definieren wir als **Beleuchtungsstärke E** den auf die Fläche bezogenen Lichtstrom:

$$\overline{E} = \frac{\Phi}{A} \quad \text{oder} \quad E = \frac{d\Phi}{dA} \qquad (1.13)$$

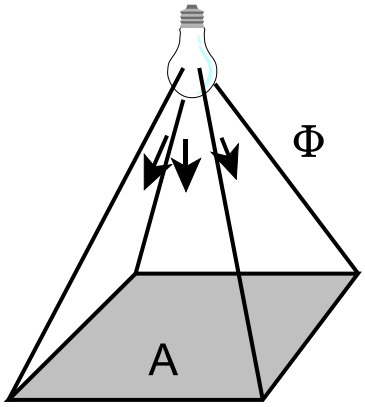


Abb. 1.6

Einheit [E] = lm/m² = lx (Lux)

Beispiel:

Die Bestrahlungsstärke der Sonne auf eine senkrecht zu ihr ausgerichtete Fläche beträgt bei wolkenlosem Sommerhimmel etwa 1kW/m². Welche Beleuchtungsstärke ergibt sich hieraus?

Die Bestrahlungsstärke ist genau so definiert wie die Beleuchtungsstärke, bezieht sich aber auf das gesamte Spektrum:

$$\overline{E}_e = \frac{\Phi_e}{A}$$

Soll hieraus die Beleuchtungsstärke ermittelt werden, so muss die Empfindlichkeit des Auges über die Tagwertkurve berücksichtigt werden:

$$E = \frac{\Phi}{A} = \frac{\int_\lambda 683\frac{lm}{W}\cdot V(\lambda)\cdot \Phi_{e\lambda}\cdot d\lambda}{A} = 683\frac{lm}{W}\cdot\int_\lambda V(\lambda)\cdot E_{e\lambda}\cdot d\lambda$$

Folie Nr. 2: Spektrum der Sonnenstrahlung

Während das Integral ohne V(λ) gerade den Wert 1 kW/m² liefert ergibt sich durch V(λ) ein wesentlich geringerer Wert, nämlich nur etwa 15% der Gesamtstrahlung der Sonne liegen im Bereich der Augenempfindlichkeit. Somit ergibt sich :

$$E = 683\frac{lm}{W}\cdot 150\frac{W}{m^2} \approx 100.000lx$$

Beispiel	Beleuchtungsstärke / lx
Operationsfeld-Beleuchtung	20 000 ... 120 000
Sonniger Sommertag	60 000 ... 100 000
Trüber Sommertag	20 000
Trüber Wintertag	3 000
gut beleuchteter Arbeitsplatz	500 ... 750
Fußgängerzone	5 ... 100
Vollmondnacht	0,25
Neumondnacht	0,01

Zwischen der Lichtstärke einer Quelle und der Beleuchtungsstärke einer Fläche gibt es natürlich einen festen Zusammenhang. Hierfür ersetzen wir in (1.13) den Lichtstrom durch die Lichtstärke:

$$E = \frac{\Phi}{A} = \frac{I\cdot\Omega}{A} = \frac{I\cdot A'}{r^2\cdot A}\cdot(1sr)$$

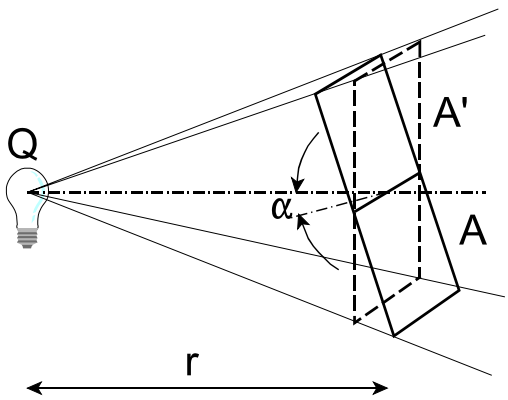


Abb. 1.7

Der Faktor 1sr wird für die korrekte Einheitenumrechnung benötigt:

$$lx = \frac{lm}{m^2} = \frac{cd\cdot 1sr}{m^2} \equiv \frac{cd}{m^2}$$

Da 1sr aber nur eine formale Einheit ist, wird sie oft weggelassen: 1sr ≡1.

Wird die Fläche A nicht senkrecht beleuchtet, so gilt zwischen A und A', der senkrecht be-

leuchteten Flächenkomponente, der Zusammenhang:

$$A' = A \cdot \cos\alpha$$

Damit ergibt sich :

$$E = \frac{I \cdot \cos\alpha \cdot A}{r^2 \cdot A} = \frac{I \cdot \cos\alpha}{r^2} \qquad (1.14)$$

Wir sehen hieran, dass die Beleuchtungsstärke mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt.

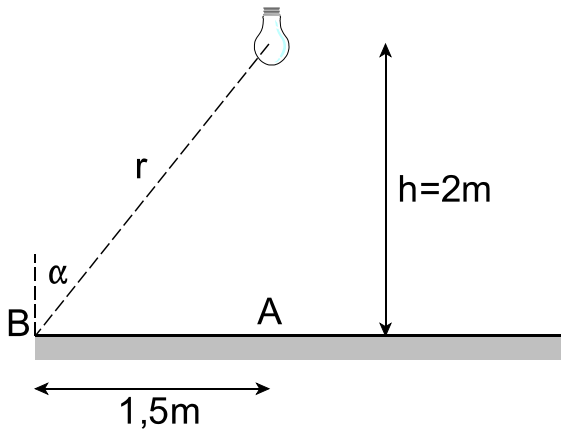
Beispiel:

In einem Raum hängt 2m über dem Boden eine 60W-Glühlampe. Welche Beleuchtungsstärke ergibt sich im Punkt A direkt unter der Lampe, welche im Punkt B?

Lichtstärke der Lampe: 58cd (siehe Beispiel in 1.6)

Punkt A:

$$E(A) = \frac{I}{h^2} = \frac{58cd}{4m^2} = 14{,}5lx$$



Punkt B:

r = 2,5 m, cos α = 2/2,5 = 0,8

$$E(B) = \frac{I \cdot \cos\alpha}{r^2} = \frac{58cd \cdot 0{,}8}{6{,}25m^2} = 7{,}4lx$$

Abb. 1.8

In B erhalten wir also nur noch die halbe Beleuchtungsstärke! Dabei wurde die Lichtreflexion an der Decke und den Wänden vernachlässigt.

An diesem Beispiel erkennt man, wie wichtig es ist, Licht gezielt abzustrahlen um dadurch die Lichtstärke in einer Richtung zu erhöhen.

1.8 Die Leuchtdichte

In der Regel sind die Lichtquellen keine Punkt quellen, sondern ausgedehnte Quellen. Die gesamte Lichtstärke (bzw. Strahlungsstärke), die in eine bestimmte Richtung ausgesandt wird setzt sich dann zusammen aus den Beiträgen der einzelnen Flächenelemente der Lichtquelle. Da von diesen Flächenelementen unter-

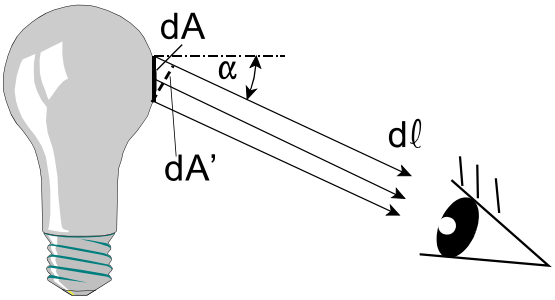


Abb. 1.9

schiedliche Lichtstärken ausgehen, definiert man für jedes Flächenelement die sogenannte **Leuchtdichte** :

$$\bar{L} = \frac{\bar{I}}{A \cdot \cos\alpha} \quad \text{oder} \quad L = \frac{dI}{dA \cdot \cos\alpha} \tag{1.15}$$

Dabei ist dI die Lichtstärke in die betrachtete Richtung und dA‘ = dA·cos α die scheinbare leuchtende Fläche.

Die Leuchtdichte ist quasi ein Maß für die Helligkeit, mit der uns eine Lichtquelle oder ein Flächenstück erscheint. Das Flächenstück kann auch eine reflektierende Wand oder eine Tischfläche sein. Der Begriff wird insbesondere wichtig, wenn wir über die Blendwirkung heller Flächen sprechen, aber auch bei der Beleuchtungssituation in einem Raum, wo die Wände wie leuchtende Flächen behandelt werden.

Für sehr viele Lichtquellen gilt dabei näherungsweise: L(α) = konst., d.h. die Leuchtdichte hängt nicht vom Betrachtungswinkel ab. Entsprechend (1.15) ist dies erfüllt, wenn die Lichtstärke wie folgt von der Betrachtungsrichtung abhängt:

$$I(\alpha) = I_0 \cdot \cos\alpha \tag{1.16}$$

Eine solche Lichtquelle bezeichnet man als **Lambert-Strahler**. Beispiele für solche Strahler sind von hinten beleuchtete Mattscheiben, wie sie häufig für die Raumbeleuchtung verwendet werden. Derartige Quellen nennt man auch **vollkommen diffus streuend**. Lambert-Strahler lassen sich nur näherungsweise realisieren, werden jedoch immer wieder gern bei theoretischen Betrachtungen zu Grunde gelegt, weil sie sich mathematisch einfach beschreiben lassen. So ist der Gesamtlichtstrom eines Lambert-Strahlers durch folgende einfache Beziehung gegeben:

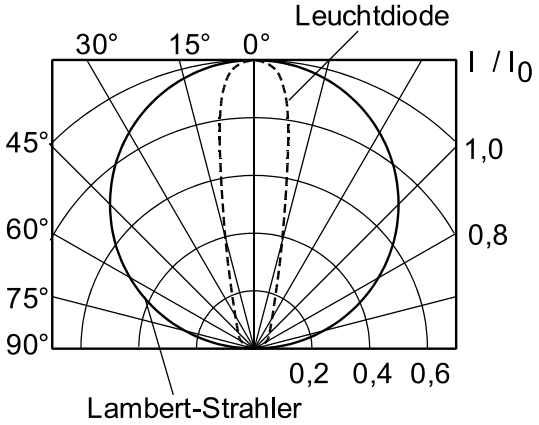


Abb. 1.10

$$\Phi = \pi \cdot I_0 \tag{1.17}$$

Dies lässt sich wie folgt zeigen:

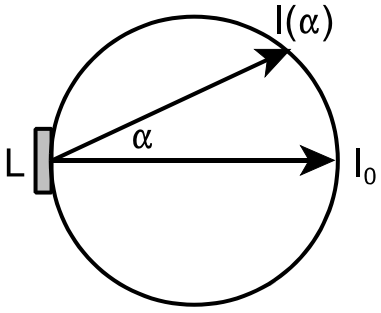


Abb. 1.11

$$\Phi = \int_0^{2\pi} I(\Omega) \cdot d\Omega$$

$$\Omega = 2\pi \cdot (1 - \cos\alpha) \quad \Rightarrow \quad d\Omega = 2\pi \cdot \sin\alpha \cdot d\alpha$$

$$\Phi = \int_0^{\pi} I(\alpha) \cdot 2\pi \cdot \sin\alpha \cdot d\alpha = 2\pi \cdot I_0 \cdot \int_0^{\pi} \cos\alpha \cdot \sin\alpha \cdot d\alpha$$

$$\Phi = \pi \cdot I_0$$

Die Sonne ist ein Lambert-Strahler mit der Fläche A = $D^2 \cdot \pi/4$.
An der Erdoberfläche beträgt die Beleuchtungsstärke 100.000 lx bei senkrechter Einstrahlung:

$$E = \frac{I \cdot \cos\alpha}{r^2} \quad \Rightarrow \quad I = E \cdot r^2 = I_0 \quad \alpha = 0$$

$$L = \frac{I_0}{A} = \frac{E \cdot r^2}{A} = \frac{100000lx \cdot \left(150 \cdot 10^6 km\right)^2}{\left(1{,}4 \cdot 10^6 km\right)^2 \cdot \pi / 4} = 1{,}5 \cdot 10^9 \frac{cd}{m^2} = 150000 \frac{cd}{cm^2}$$

Typische Leuchtdichten:

Sonne	150 000 cd/cm² ;	Vollmond	0,25 cd/cm²;
Blauer Himmel	0,5 cd/cm² ;	Leuchtstofflampe	0,5 - 3 cd/cm²;
Glühlampe, matt	3 - 30 cd/cm²;		

Beispiel:

An der Decke befinde sich eine Leuchtfläche von 0,25m² Größe, die das Licht in Art eines Lambert-Strahlers abgibt. Die Leuchtdichte betrage 0,5 cd/cm². Welche Beleuchtungsstärken ergeben sich in A und B? Welchen Lichtstrom sendet die Leuchtfläche aus?

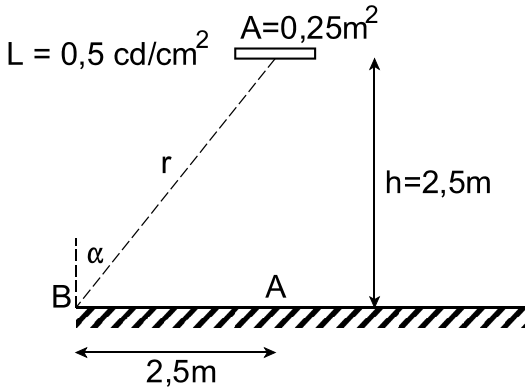


Abb. 1.12

Punkt A:

$$I_A = L \cdot A = 0{,}5 \frac{cd}{cm^2} \cdot 2500 cm^2 = 1250 cd$$

$$E_A = \frac{I_A}{r^2} = \frac{1250 cd}{6{,}25 m^2} = 200 lx$$

Punkt B:

$$I_B = L \cdot A \cdot \cos\alpha = 0{,}5\frac{cd}{cm^2} \cdot 2500cm^2 \cdot \cos 45° = 880cd$$

$$E_B = \frac{I_B \cdot \cos\alpha}{r^2} = \frac{880cd \cdot \cos 45°}{12{,}5m^2} = 50lx$$

Der Gesamtlichtstrom der Lichtquelle ergibt sich zu:

$$\Phi = \pi \cdot I_0 = \pi sr \cdot 1250cd = 3927lm$$

Wir sehen an diesem Beispiel den direkten Zusammenhang zwischen der Beleuchtungsstärke E und der Leuchtdichte L einer Quelle.

Für den einem Empfänger der Fläche A_2 zufließenden Lichtstrom gilt dann in guter Näherung (solange die Lichtstärke in Richtung α als konstant angenommen werden kann):

$$I = L \cdot A_1 \cdot \cos\alpha \quad ; \quad E = \frac{I \cdot \cos\beta}{r^2}$$

$$\Phi = E \cdot A_2 = L \cdot \frac{A_1 \cdot \cos\alpha \cdot A_2 \cdot \cos\beta}{r^2} \qquad (1.18)$$

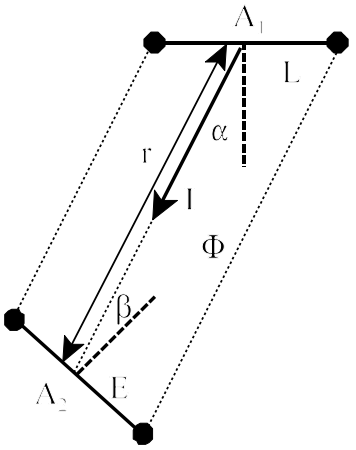


Abb. 1.13

Diese Gleichung wird als **photometrisches Grundgesetz** bezeichnet, da hier die Senderfläche A_1, die Empfängerfläche A_2, die Winkel α und β zwischen den Flächennormalen und der Strahlrichtung sowie der Abstand zwischen Sender und Empfänger eingeht.

Leuchtdichte des Himmels:

$$E = L \cdot \frac{A_1}{r^2} = L \cdot \Omega \quad \Rightarrow \quad L = \frac{E}{\Omega}$$

Die Winkel α und β können zu 0 gesetzt werden, E ist die gemessene Beleuchtungsstärke, Ω der Raumwinkel, aus dem Licht in das Messgerät fällt.

Die Basiseinheit aller lichttechnischen Größen ist die **Candela**. Sie ist wie folgt definiert:

Eine Candela ist die Lichtstärke einer Strahlungsquelle, die in einer bestimmten Richtung monochromatisches Licht der Wellenlänge 555nm mit der Strahlungsstärke 1/683 W/sr aussendet.

Praktisch realisiert wird diese Lichtstärke durch einen Hohlraumstrahler, der sich auf der Temperatur des erstarrenden Platins (2042,5K) befindet. Dieser Hohlraum besitzt eine Leuchtdichte von 60 cd/cm². Dieser Hohlraumstrahler wird als Normlichtquelle verwendet um andere Lichtquellen zu eichen.

Die Leuchtdichte ist nicht nur für die Beurteilung von Lichtquellen wichtig. Auch Flächen, die das auftretende Licht vollständig diffus streuen verhalten sich wie Lambert-Strahler. Ihre Leuchtdichte kann in einfacher Weise berechnet werden.

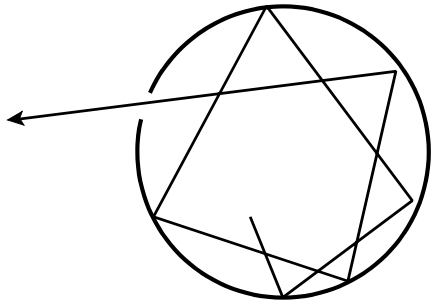


Abb. 1.14

Eine vollkommen diffus streuende Fläche werde mit dem Lichtstrom Φ_0 beleuchtet. Sie reflektiert dann auf Grund ihres Reflexionsgrades ρ den Lichtstrom

$$L = \frac{I}{A \cdot \cos\alpha} \quad \Rightarrow \quad L = \frac{I_0}{A} = \frac{\Phi_r}{\pi \cdot A} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\rho \cdot \Phi_0}{A} = \frac{1}{\pi} \cdot \rho \cdot E$$

$\Phi_r = \rho \cdot \Phi_0$. Nach Gleichung (1.17) ergibt sich dann als Leuchtdichte der Fläche:

(Für einen Lambertstrahler gilt: $I = I_0 \cdot \cos\alpha$)

Folie Nr. 8: Leuchtdichte beleuchteter Flächen

Der Mond wird von der Sonne beleuchtet, die Beleuchtungsstärke beträgt wie auf der Erde etwa E = 100.000 lx. Davon werden ca. 8% reflektiert:

$$L = \frac{1}{\pi} \cdot \rho \cdot E = \frac{1}{\pi} \cdot 0{,}08 \cdot 100000 lx = 2500 \frac{cd}{m^2} = 0{,}25 \frac{cd}{cm^2}$$

Die Leuchtdichte von Quellen und Flächen ist besonders wichtig hinsichtlich der Blendung der Augen. Diese setzt schon bei Leuchtdichten über 0,3 ... 1 cd/cm² ein und wird im Abschnitt 2 näher betrachtet.

1.9 Licht und Farbe

Für das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit eines Menschen ist nicht nur die Beleuchtungsstärke wesentlich sondern auch die Farbe des Lichtes. Jeder Helligkeitseindruck des Auges wird gleichzeitig auch mit einem Farbeindruck verbunden. Dabei zerlegt das Auge das Licht mit Hilfe der drei Zäpfchensorten und setzt aus dieses drei Farbreizen alle Farben im Gehirn zusammen.

Experiment: additive Farbmischung

Die Empfindlichkeit des Auges ist dabei nicht auf drei einzelne Spektralfarben fixiert sondern jede Zäpfchensorte besitzt eine charakteristische Empfindlichkeitskurve:

Folie 3: spektrale Empfindlichkeit des Auges

Will man eine Lichtquelle hinsichtlich seiner Farbe bewerten, so muss man die Empfindlichkeit des Auges nachbilden. Dafür wurden drei Normspektralwertkurven definiert, die im wesentlichen der Empfindlichkeit der Zäpfchen entsprechen:

Folie Nr. 7: Normspektralwertfunktionen

Wie bei der Bestimmung des Lichtstromes mit der Tageswertkurve muss die Lichtquelle mit diesen drei Filterkurven untersucht werden. Es ergeben sich quasi drei Lichtströme, genannt **Farbwerte**, die mit X für den Rotanteil, Y für den Grünanteil und Z für den Blauanteil bezeichnet werden. Der Grünanteil entspricht dabei gleichzeitig dem Lichtstrom, da diese Bewertungskurven identisch sind. Um zu einer von der Helligkeit unabhängigen Farbbeschreibung zu kommen, normiert man die Farbwerte:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}\ ; \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}\ ; \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}\ ; \tag{1.19}$$

Diese Größen werden als **Normfarbwerte** bezeichnet. Da zwischen ihnen die Beziehung

$$x + y + z = 1$$

besteht, reichen zwei der drei Werte aus, alle Farbeindrücke zu beschreiben. In einer zweidimensionalen Grafik können folglich alle Farben abgebildet werden. Wir sprechen von der **Normfarbtafel**

Folie Nr. 7: Normfarbtafel

Liefern alle drei Rezeptoren im Auge den gleichen Reiz, so empfinden wir die Lichtfarbe als weiß. in der Normfarbtafel muss daher der weiße Farbton bei den Koordinaten x = 0,33 und y = 0.33 liegen.

Ziel der Beleuchtung ist es, die Farbwerte so zu gestalten, dass sie möglichst nahe an dieses Zentrum heran kommen.

Bewertet man die schwarzen Strahler entsprechend ihrer Farbe, so erhält man in Abhängigkeit von der Temperatur den gelben Kurvenzug in der Normtafel. Dadurch ist es auch möglich, eine Farbe durch die zugehörige Temperatur des schwarzen Körpers zu beschreiben. Hierfür hat man den Begriff **Farbtemperatur** eingeführt. Da viele Lichtquellen dem schwarzen Strahler sehr ähnlich sind, lassen sie sich folglich durch die Angabe ihrer Farbtemperatur kennzeichnen. Lichtquellen, die nicht in der Nähe der Kurve der schwarzen Körper liegen, lassen sich trotzdem durch eine **ähnlichste Farbtemperatur** beschreiben, indem man den Farbpunkt der Quelle so auf die Kurve des schwarzen Strahlers projiziert, dass der Farbunterschied am minimalsten ist.

Folie Nr. 8: Farbtemperatur verschiedener Lichtquellen

Neben der Farbe des Lichtes kommt auch der **Farbwiedergabe** des Lichtes eine große Bedeutung zu. Wir merken dies z.B. bei der Farbbeurteilung von Stoffen, die uns bei Leuchtstofflampenlicht schwer, bei Sonnenlicht dagegen leicht fällt. Ursache ist, dass das Sonnenlicht und auch das Licht aller thermischen Strahler alle Wellenlängen des sichtbaren Lichtes enthält, während z.B. Leuchtstofflampen bestimmte Wellenlängen bevorzugt abstrahlen (siehe später).

Folie Nr. 15: Farbwiedergabe

Die Bewertung der Farbwiedergabe einer Lampe erfolgt durch vergleichende Untersuchung von acht Testfarben, die einmal mit einer Standardlichtquelle und einmal mit der zu bewertenden Lichtquelle bestrahlt werden. Die Standardlichtquelle muss dabei eine ähnliche Farbtemperatur besitzen wie die zu bewertende Lichtquelle. Die Abweichungen zwischen beiden Messungen werden mit einem festgelegten Rechenverfahren bewertet und ergeben den so genannten **Farbwiedergabeindex R_a**. Je näher dieser bei 100 liegt, um so besser ist die Farbwiedergabe unter dieser Lichtquelle.

Folie Nr. 8: Farbwiedergabeindex verschiedener Quellen

Farbwiedergabe-eigenschaft	**Farbwieder-gabestufe**	**Farbwieder-gabeindex R_a**	**Lampenbeispiele**
Sehr gut	1A	>90	Halogenglühlampen, Lumilux de luxe Leuchtstofflampen HQL.../D
	1B	80 - 89	Lumilux Leuchtstofflampen HQL.../NDL oder WDL
Gut	2A	70 - 79	Standardleuchtstofflampen 10 und 25
	2B	60 - 69	Standardleuchtstofflampen 30
genügend	3	40 - 59	HQL
ungenügend	4	< 39	Na-Hochdruck und Niederdrucklampen

1.10 Zusammenfassung

Gegenüberstellung der Beleuchtungsgrößen:

physikalisch	optisch
Strahlungsleistung: Φ_e / W	Lichtstrom: Φ / lm
Strahlungsenergie: $W = \Phi_e \cdot t$ / Ws	Lichtmenge: $Q = \Phi \cdot t$ / lm·s
Strahlungsstärke: $I_e = \Phi_e/\Omega$ / W/sr	Lichtstärke: $I = \Phi/\Omega$ / lm/sr (cd)
Bestrahlungsstärke: $E_e = \Phi_e/A$ / W/m²	Beleuchtungsstärke: $E = \Phi/A$ / lm/m² (lx)
$E_e = I_e \cdot \cos\alpha / r^2$	$E = I \cdot \cos\alpha / r^2$

Strahlungsdichte: $L_e = I_e / A \cdot \cos \alpha$ Leuchtdichte: $L = I / A \cdot \cos \alpha$

2 Die Sehleistung des Auges

2.1 Leuchtdichte und Adaption

Damit das Auge ein Objekt erkennen kann, müssen eine Reihe von Bedingungen erfüllt sein, die alle mit der Beleuchtung in Beziehung stehen:

– die Gegenstände oder Details die zu erkennen sind müssen einen bestimmten Mindestkontrast gegen ihre unmittelbare Nachbarschaft aufweisen, entweder als Helligkeitskontrast, Farbkontrast oder beides,

– die Gegenstände müssen eine bestimmte Mindestgröße besitzen,

  Die Sehobjektgröße wird dabei im Winkelmaß angegeben, da es nicht auf die Absolutgröße des Objektes ankommt, sondern darauf, wie groß es dem Auge erscheint. Dies ist aber entfernungsabhängig. Für kleine Winkel gilt $\alpha = D/R$, wobei D die wahre Objektgröße darstellt und R den Abstand vom Auge. Wir sprechen hier vom **Sehwinkel**.

  Beispiel: Objektdurchmesser = 1,7 m, Entfernung 100 m ergibt einen Sehwinkel von $0{,}017 = 2\pi / 360^\circ$ entspricht also genau $1^\circ = 60'$.

– es ist eine bestimmte Mindestleuchtdichte erforderlich,

– das Auge muss an die herrschende **Gesichtsfeld-Leuchtdichte** adaptiert sein,

– der Gegenstand muss lange genug sichtbar sein.

Wichtig für das Sehen ist die Helligkeit der Umgebung. Diese kann durch die Gesichtsfeld-Leuchtdichte ausgedrückt werden. Warum?

Wichtig für den Reiz der Zäpfchen und Stäbchen im Auge ist der Lichtstrom, der durch die Pupille ins Auge gelangt. Dieser Lichtstrom kommt aus einem bestimmten Raumwinkel Ω, dem **Gesichtsfeld**, in die Pupille mit der Fläche A‘. Für den Lichtstrom gilt die Photometrische Grundgleichung (1.23):

$$\Phi = E \cdot A' = L \cdot \frac{A \cdot \cos\alpha \cdot A' \cdot \cos\beta}{r^2}$$

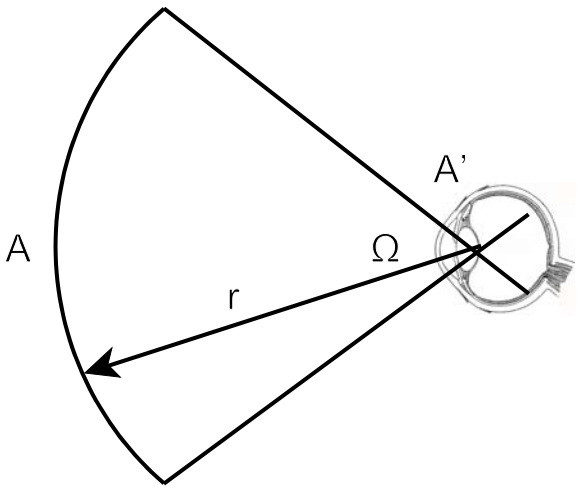


Abb. 2.1

E ist die Beleuchtungsstärke am Eintritt in die Pupille. Die Winkel können zu 0˚ gesetzt werden und die Senderfläche A hängt mit dem Raumwinkel wie folgt zusammen: $A = \Omega \cdot r^2$.

Damit ergibt sich;

$$\Phi = L \cdot \Omega \cdot A' \tag{2.1}$$

L ist die sogenannte Gesichtsfeld-Leuchtdichte, d.h. eine mittlere Leuchtdichte der Umgebung. Dabei ist es nicht wichtig, in welcher Entfernung sich die leuchtenden oder reflektierenden Flächen befinden, da zwar E mit r² abnimmt, aber die Senderfläche (Umgebungsfläche) wieder mit r² zunimmt. Mit dieser Gleichung kann z.B. auch die Leuchtdichte des Himmels bestimmt werden, obwohl weder die Entfernung noch die Größe der „Himmelsfläche“ definiert werden kann.

Das Auge ist in der Lage sich an eine großen Bereich der Gesichtsfeld-Leuchtdichte anzupassen. Dieser reicht von 10^{-6} cd/m² bis zu 10^{5} cd/m². Diese Anpassung nennt man **Adaption** des Auges. Ein Teil der Adaption wird dabei über die Größe des Pupillenöffnung A‘ geregelt. Hierdurch ist allerdings bestenfalls eine Änderung von 1:16 möglich. Die restliche Adaption erfolgt direkt in den Zäpfchen und Stäbchen der Netzhaut. Bei hohen Leuchtdichten sind die Zäpfchen, die auch für das Farbensehen wichtig sind, aktiv. Sie decken den Leuchtdichtebereich von etwa 3 cd/m² bis 10^{5} cd/m² allein ab. Die Stäbchen dagegen sind im unteren Leuchtdichtebereich aktiv: 10^{-6} cd/m² bis 0,01 cd/m². Zwischen 0,01 und 3 cd/m² werden sowohl Zäpfchen wie auch Stäbchen durch den Lichtreiz angesprochen.

Die Adaption an Leuchtdichtewechsel erfolgt dabei nicht sehr schnell:

Folie Nr. 9: Dunkeladaption

Die Zäpfchen passen sich recht schnell an die verringerte Leuchtdichte an. Schon nach 0,1 s können Objekte wahrgenommen werden deren Leuchtdichte etwa 100fach geringer ist als die ursprüngliche Gesichtsfeldleuchtdichte, nach etwa 10 min haben sie ihre höchste Empfindlichkeit erreicht. Die Stäbchen benötigen dagegen etwa 1h um ihre höchste Empfindlichkeit zu erreichen.

2.2 Kontrast und Unterschiedsempfindlichkeit

Um Gegenstände in einer Umgebung wahrnehmen zu können, muss zwischen dem Gegenstand und der Umgebung ein Unterschied in der optischen Erscheinung vorliegen. Im einfachsten Fall ist dies ein Unterschied in der Leuchtdichte. Dazu können auch noch Farbunterschiede hinzukommen. Man definiert als **physiologischen Kontrast**:

$$K = \frac{L_{Ob} - L_U}{L_U} \tag{2.2}$$

K kann Werte zwischen -1 und +∞ annehmen, oft wird K auch in Prozent angegeben, dies ist aber nur für positive Werte zulässig.

Die folgende Folie zeigt den Einfluss des Kontrastes auf die Wahrnehmbarkeit bestimmter Objektgrößen:

Folie Nr. 10: Physiologischer Kontrast und Sehobjektgröße

Eingetragen in der Folie sind die Linien, die den sichtbaren Bereich vom unsichtbaren Bereich trennen. Wir sehen, dass die Sichtbarkeit mit zunehmender Umgebungsleuchtdichte zunimmt, d.h. bei gleichem Kontrast können kleinere Objekte erkannt werden.

Hierzu ein Beispiel:

Das Objekt O weist bei einer Umgebungsleuchtdichte L_U = 5 cd/m² einen Kontrast von 15% auf. Seine Sehwinkelgröße betrage 2' (z.B. 6mm Durchmesser = Erbse in 10 m Entfernung). Die Folie zeigt, das O unterhalb der Kurve für L_U = 5 cd/m² liegt. Damit ist O unsichtbar. Welche Möglichkeiten hat man O sichtbar zu machen?

- Der Kontrast des Objektes wird so stark vergrößert, dass die Grenzkurve überschritten wird (O_1). Hierzu sind 40% Kontrast notwendig, d.h. zusätzliche Beleuchtung des Objektes.
- Der Sehwinkel, unter dem das Objekt erscheint, muss vergrößert werden auf mindestens 4' (O_2). Dies gelingt z.B. durch Abstandsverringerung auf die Hälfte, oder mit Hilfe von Lupe, Mikroskop oder Fernglas.
- Die Umgebungsleuchtdichte muss gesteigert werden, bis O oberhalb der Grenzkurve liegt. Dies ist etwa bei L_U = 200 cd/m² erreicht. Dabei muss natürlich der Kontrast erhalten bleiben, d.h. das Sehobjekt muss ebenfalls seine Leuchtdichte steigern. Sonst erhalten wir den gegenteiligen Effekt, wie wir ihn jeden Morgen am Himmel sehen, wo die Umgebungsleuchtdichte zunimmt und die Sterne dadurch unsichtbar werden.

Die **Unterschiedsempfindlichkeit** L/ΔL ist jetzt der Kehrwert des Kontrastes an der Grenze zwischen sichtbar und unsichtbar:

Folie Nr. 10: Unterschiedsempfindlichkeit

Sie ist in der Folie für verschiedene Objektgrößen dargestellt. Große Objekte führen zu einer großen Unterschiedempfindlichkeit, d.h. ΔL kann sehr klein sein. Für das oben behandelte Objekt errechnet sich ein L/ΔL von etwa 7

$$\frac{\Delta L}{L} = 0{,}15 \quad \Rightarrow \quad \frac{L}{\Delta L} = \frac{1}{0{,}15} \approx 7$$

und damit kann eine notwendige Umgebungsleuchtdichte von 200 cd/m² abgelesen werden. Auffallend ist, das die Unterschiedempfindlichkeit mit der Umgebungsleuchtdichte zunächst zunimmt, dann aber wieder abnimmt. Bei hohen Leuchtdichten setzt hier die Blendung ein. Der optimale Bereich der Umgebungsleuchtdichte liegt etwa zwischen 100 und 5000 cd/m².

Die Kurven der Folie Nr. 10 hängen sehr stark vom verwendeten Bewertungsverfahren ab und sind daher nur als Richtwerte zu sehen.

2.3 Sehschärfe

Als Sehschärfe bezeichnet man das Vermögen, zwei eng benachbarte Objekte noch getrennt wahrnehmen zu können. Als Messwert verwendet man den Kehrwert des kleinsten Sehwinkels zwischen zwei Punkten, die gerade noch getrennt werden können. Der Winkel wird dabei in Bogenminuten angegeben:

$$S = \frac{1}{\alpha\,(')} \tag{2.3}$$

Der kleinst mögliche Sehwinkel ist durch den Abstand der Zäpfchen in der Netzhautgrube gegeben und beträgt 0,37'. Hieraus ergibt sich eine maximale theoretische Sehschärfe von S = 2,7. Als Messobjekte werden z.B. sogenannte Landoltsche Ringe verwendet. Das Sehobjekt ist in diesem Fall der Spalt.

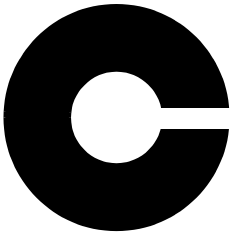


Abb. 2.2

Folie Nr. 9: Sehschärfe

Wie die Folie zeigt, nimmt die Sehschärfe stark mit der Umgebungsleuchtdichte zu und erreicht wiederum zwischen 100 und 5000 cd/m² ihr Maximum.

2.4 Wahrnehmungsgeschwindigkeit

Bei den vorhergehenden Betrachtungen blieb die Beobachtungsdauer unberücksichtigt. Die Wahrnehmungszeit, bzw. die Beobachtungsgeschwindigkeit spielt jedoch eine große Rolle. Kurz dauernde periodische Lichtreize werden bei geringer Frequenz als Einzelreize wahrgenommen. Bei steigender Frequenz geht die Wahrnehmung zunächst in ein Flackern und dann in ein Flimmern über, bis von einer bestimmten Frequenz (Verschmelzungsfrequenz) an ein kontinuierlicher Lichteindruck entsteht. Die Verschmelzungsfrequenz f_s ist abhängig von der Leuchtdichte, aber unabhängig von der Farbe des Lichtes.

Im Bereich des Zapfensehens bei etwa 30 cd/m^2 ist bei schroffem Hell-Dunkel-Wechsel f_s = 48 Hz. Das Maximum von f_s = 60 Hz wird erst bei über 3000 cd/m^2 erreicht. Die Stäbchen sind flimmerempfindlicher als die Zäpfchen. Nach dem Talbotschen Gesetz ist nach der Verschmelzungsfrequenz der resultierende Helligkeitseindruck aus der Hell-Dunkel-Periode demjenigen gleich, der sich einstellen würde, wenn sich der Lichtreiz des Hellintervalles über die gesamte Hell-Dunkel-Periode verteilen würde. Dies bedeutet umgekehrt, dass das Auge Ereignisse differenzieren kann die einige 10 ms andauern. Dies hängt auch mit der Dunkeladaption zusammen, die auf Folie Nr. 9 dargestellt ist.

Folie Nr. 9: Dunkeladaption

Trotzdem kann das Auge auch auf extrem kurze Reize reagieren, wenn auch nur unbewusst. So wurde in einem Kinofilm mehrfach für eine tausendstel Sekunde die Schrift „esst mehr Popcorn“ eingeblendet. Der Umsatz an Popcorn stieg hierdurch um 30%.

2.5 Farbwahrnehmung

Farbwahrnehmung ist nur mit Hilfe der Zäpfchen im Auge möglich. Diese benötigen eine Mindestleuchtdichte von etwa 3 cd/m² zur Farbunterscheidung, beste Farberkennung ist aber erst oberhalb von 50 cd/m² möglich.

Das Auge ist nicht in der Lage, die einzelnen spektralen Anteile einer Lichtart zu erkennen. Es besitzt drei unterschiedlich empfindliche Rezeptoren, die sich in ihren Empfindlichkeitsbereichen deutlich überlappen.

Folie Nr. 3: Empfindlichkeit der Zäpfchen

Erst aus den unterschiedlichen Anregungen der drei Zäpfchenarten wird im Gehirn die Farbinformation zusammengesetzt. Objekte mit unterschiedlicher spektraler Reflexion können dadurch vom Auge durchaus als gleichfarbig bewertet werden. Auch Lampen mit unterschiedlicher spektraler Emission können die gleiche Lichtfarbe ergeben. Das Auge ist in der Lage etwa 120 verschiedene Farbtöne zu unterscheiden.

2.6 Blendung

Ist die Leuchtdichte der Umgebung (Gesichtsfeld) ausgewogen, so adaptiert das Auge derart auf eine mittlere Leuchtdichte, dass sich der geringst mögliche Leuchtdichteunterschied ΔL zwischen Sehobjekt und Umgebung einstellt, d.h. die Objektwahrnehmung wird optimal für diese mittlere Umgebungsleuchtdichte.

Befindet sich im Gesichtsfeld eine unabgeschirmte Lichtquelle, so erzeugt diese im Auge Streulicht, welches sich wie ein Schleier auf die Netzhaut legt:

Folie Nr. 11: physiologische Blendung

Diese zusätzliche Schleierleuchtdichte L_S, welche sich zur Umgebungsleuchtdichte L_a addiert, ist der Beleuchtungsstärke der Störquelle am Auge proportional, nimmt aber mit zunehmenden Winkel Θ zwischen der Blickrichtung und der Blendquelle ab:

$$L_S \sim \frac{E}{\Theta^2} \tag{2.4}$$

Wir betrachten einen Gegenstand der Winkelgröße 10' mit einem Leuchtdichteunterschied von 0,5 cd/m². Wie die folgende Folie zeigt, ist dieser bei einer Umgebungsleuchtdichte von 10 cd/m² gut zu erkennen ($L/\Delta L = 20$).

Folie Nr. 10: Leuchtdichteunterschied

Erhöht sich die mittlere Leuchtdichte der Umgebung durch eine zusätzliche Schleierleuchtdichte auf 20 cd/m², so wird dieser Gegenstand unsichtbar ($L/\Delta L = 40$).

Der häufigste Blendungsfall in der Praxis ist die **Relativblendung**. Hierbei liegen zu hohe

Kontrastunterschiede im Gesichtsfeld vor (z.B. Autoscheinwerfer bei Nacht). Durch Anhebung der Umgebungsleuchtdichte kann diese Blendung vermindert werden (z.B. Autoscheinwerfer bei Tag).

Bei sehr hohen Leuchtdichten kommt es zur **Absolutblendung**. Jetzt kann eine Anhebung der Umgebungsleuchtdichte keine Verbesserung bewirken. Dies tritt ab Leuchtdichten von etwa 10000 cd/m² bzw. 1 cd/cm² auf.

Neben der physiologischen Blendung tritt auch eine **psychologische Blendung** auf, die zu Unbehaglichkeiten führt, ohne dass hierfür eine messbare Ursache vorliegt.

3 Lichtmessung

3.1 Grundlagen

Grundlage jeder beleuchtungstechnischen Messung ist die Hellempfindlichkeitskurve V(λ) des Auges.

Bei der **visuellen Photometrie** wird das Auge selbst als Messgerät verwendet, bei der **physikalischen Photometrie** verwendet man Lichtempfänger in Verbindung mit elektrischen Messgeräten. Dabei muss die Empfindlichkeitskurve des Auges durch entsprechende Filter nachgebildet werden.

Wir wollen im folgenden nur die physikalischen Messmethoden beschreiben. Alle photometrischen Verfahren beschränken sich dabei auf reine Helligkeitsmessungen, Farbeinflüsse werden nicht berücksichtigt. Jede lichttechnische Größe Y (= I, E, Φ oder L) muss dabei aus der jeweiligen Messgröße X (z.B. Photostrom) nach einer eindeutigen Funktion bestimmt werden: Y = f(X). Die Messgröße X wiederum muss die Hellempfindlichkeitskurve berücksichtigen:

$$X = K \cdot \int_0^\infty X_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \tag{3.1}$$

K = 683 lm/W

Dies kann auf zweierlei Weisen geschehen:

- Es wird die spektrale Verteilung $X_{e\lambda}$ der Messgröße bestimmt und daraus unter Verwendung von K und V(λ) die lichttechnische Größe berechnet. Wir sprechen vom **radiometrischen Verfahren**.
- Die spektrale Empfindlichkeit des Empfängers wird durch Filter an die V(λ)-Kurve angepasst, es muss nur noch mit K und f(X) umgerechnet werden. Wir sprechen vom **photometrischen Verfahren mit V(λ)-Empfängern**.

Jeder in der Photometrie verwendete Empfänger ist nur in der Lage eine bestimmte Messgröße direkt zu bewerten:

- das menschliche Auge bewertet Leuchtdichten L
- physikalische Empfänger bewerten Beleuchtungsstärken E
- photografische Schichten bewerten die Lichtmenge Q

Wir werden uns im folgenden nur mit den physikalischen Empfängern beschäftigen. Hierzu gehören zum einen die photoelektronischen Bauelemente, wie die Si-Photodiode, der CdS-Photowiderstand, der Sekundärelektronenvervielfacher, und auf der anderen Seite die ther-

mischen Empfänger, wie die Thermosäule nach Moll.

In der Präzisionsphotometrie werden vor allem Silizium-Planar-Photoelemente verwendet. Ihre spektrale Empfindlichkeit lässt sich gut an die V(λ)-Funktion anpassen:

Folie Nr. 12: spektrale Empfindlichkeit von Si-Photoelementen

Sie zeigen einen sehr linearen Zusammenhang zwischen dem Kurzschlussstrom und der Beleuchtungsstärke und weisen auch bei hohen Photoströmen kaum Ermüdung auf. Die wichtigsten Kenngrößen eines Photoempfängers sind dabei:

- absolute Empfindlichkeit s
- spektrale Empfindlichkeit s(λ)
- Lichteintrittsfläche A
- Dunkelstrom I_0

2.2 Messung lichttechnischer Größen

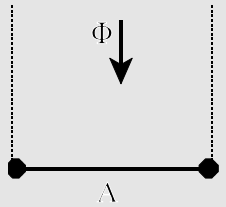
a) Messung der Beleuchtungsstärke

Alle physikalischen Messgeräte messen die Beleuchtungsstärke, d.h. den Lichtstrom, der durch die Eintrittsfläche fällt.

Wichtigste Voraussetzungen für ein gutes Messgerät sind:

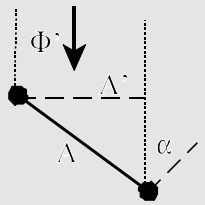
- eine gute V(λ)-Anpassung
- bei schräg einfallendem Lichtstrom muss die Beleuchtungsstärke mit dem cos des Einfallswinkels abnehmen, wir sprechen von der cos-getreuen Bewertung.

zur cos-getreuen Bewertung:
- senkrechter Einfall:



$$E_0 = \frac{\Phi}{A}$$

- schräger Einfall:



$$\frac{\Phi'}{\Phi} = \frac{A'}{A} = \cos\alpha \;\Rightarrow\; \Phi' = \Phi \cdot \cos\alpha$$

$$E = \frac{\Phi'}{A} = \frac{\Phi}{A} \cdot \cos\alpha = E_0 \cdot \cos\alpha$$

Letzteres ist bei Labormessgeräten von untergeordneter Bedeutung, da hier in der Regel senkrecht gemessen wird. Bei Feldmessgeräten dagegen muss dies gewährleistet sein.

b) Messung der Lichtstärke

In der Praxis wird die Lichtstärke einer Quelle fast ausschließlich über eine Messung der Beleuchtungsstärke E und der Berechnung nach dem photometrischen Entfernungsgesetz bestimmt (1.19):

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} = \frac{\Phi}{A} \cdot r^2 = E \cdot r^2 \left(\cdot \frac{1}{sr} \right) \tag{3.2}$$

Die Größe 1/sr wird dabei zur Einheitenumrechnung von lm in cd benötigt.

Strenggenommen gilt dieses Gesetz nur für punktförmige Lichtquellen und kleine Empfängerflächen. Daher muss der Abstand zwischen der Quelle und dem Messgerät hinreichend groß sein. Wir sprechen von der **Grenzentfernung**. Für Lambertstrahler beträgt diese etwa den 10-fachen Strahlerdurchmesser, für sehr gerichtete Lichtstärkeverteilungen (z.B. LED) muss der Abstand deutlich höher gewählt werden.

Der typische Aufbau einer Lichtstärkemessung einer Quelle ist in der folgenden Folie zu finden:

Folie Nr. 12: Lichtstärkemessung auf optischer Bank

Zur Messung der Lichtstärkeverteilung muss entweder die Quelle oder das Messgerät oder beides in zwei Ebenen schwenkbar angeordnet werden.

c) Messung des Lichtstromes

Hat man die räumliche Verteilung der Lichtstärke einer Quelle gemessen, so kann man durch Integration über den gesamten Raumwinkel $\Omega = 4\pi$ den Gesamtlichtstrom der Quelle bestimmen:

$$\Phi = \int_{\Omega = 4\pi} I \cdot d\Omega \tag{3.3}$$

Hat man dagegen die Beleuchtungsstärke im Abstand r für alle Raumrichtungen ausgemessen, so ergibt sich:

$$\Phi = \int_{Kugel} E \cdot dA \tag{3.4}$$

Es muss über eine Kugeloberfläche mit dem Radius r integriert werden. Die Schwierigkeit dabei ist, dass hier mit Einzelmesswerten eine numerische Integration durchgeführt werden muss.

Eine direkte Messung des Lichtstromes gestattet die **Ulbricht-Kugel**:

Folie Nr. 13: Ulbricht-Kugel

Dabei wird die zu untersuchende Lichtquelle in das Zentrum einer Kugel gebracht, die mit einer diffus streuenden Oberflächenbeschichtung versehen ist. Mit einem Beleuchtungsmesser wird dann an einer Stelle der Wand die Beleuchtungsstärke des indirekten Lichtes gemessen. Das direkte Licht muss mit einer Blende abgedeckt sein. Bei Quellen mit „spitzer“ Lichtstärkeverteilung (z.B. Reflektorlampe) wird die Quelle in die Kugelwand eingelassen. Es ergibt sich dann:

$$\Phi = E_{indirekt} \cdot \frac{1-\rho}{\rho} \cdot A \tag{3.5}$$

Dabei ist ρ der Reflexionskoeffizient der Kugelwandung und A die Kugelfläche. Ist ρ nicht bekannt, so muss mit Hilfe einer Normallampe die Anlage geeicht werden. Die Hilfslampe H dient dazu, den Einfluss der Blenden und anderer Fremdkörper, wie Lampenhalterungen, heraus zurechnen.

d) Messung der Leuchtdichte

Die Messung der Leuchtdichte nutzt das Photometrische Grundgesetz aus:

$$\begin{aligned} \Phi = E \cdot A_2 &= L \cdot \frac{A_1 \cdot \cos\alpha \cdot A_2 \cdot \cos\beta}{r^2} \\ \Rightarrow \quad E &= L \cdot \frac{A \cdot \cos\varepsilon}{r^2} \cdot 1sr \quad \text{mit } \alpha = \varepsilon, \beta = 0 \end{aligned} \tag{3.6}$$

A ist dabei die Fläche, deren Leuchtdichte bestimmt werden soll, ε der Winkel, unter dem gemessen werden soll und r der Abstand zwischen der Quelle und dem Messgerät. Die Größe 1sr wird wieder zur Umrechnung zwischen lm und cd benötigt.

Die Messfläche A kann dabei durch zwei verschiedene Verfahren festgelegt werden:

– Messung durch Abdeckung

Folie Nr. 13: Leuchtdichtemessung mit Blende

Damit ergibt sich:

$$L = E \cdot \frac{r^2}{A \cdot \cos\varepsilon} \cdot \frac{1}{sr} \tag{3.7}$$

– Messung durch Tubus oder Optik

Mit Hilfe eines Tubus oder einer Optik wird der zu untersuchende Raumwinkel Ω definiert, wobei gilt $\Omega = A/r^2$:

Folie Nr. 14: Leuchtdichtemessung mit Tubus oder Optik

Damit ergibt sich:

$$L = \frac{E}{\Omega \cdot \cos\varepsilon} \tag{3.8}$$

Zwischen dem Messfeldwinkel α und dem Raumwinkel Ω ergibt sich dabei für kleine α der Zusammenhang:

$$\Omega = \frac{\pi}{4} \cdot \alpha^2 \tag{3.9}$$

Der Messfeldwinkel selbst wird durch die Größe des Messempfängers D und der Tubuslänge bzw. der Brennweite der Linse f festgelegt.

4 Lichterzeugung

4.1 Allgemeines über Lampen

Video Nr.2: Licht und Farbe

Die Lichterzeugung geschieht in der Lichttechnik in den Lampen, den technischen Ausführungen künstlicher Lichtquellen.

Folie Nr.15: künstliche Lichtquellen

Folgende Merkmale sind für die Auswahl von Lampen von Bedeutung:

- der ausgesandte Lichtstrom Φ
- die Lichtausbeute Φ/P_{el}
- die Lichtfarbe und die Farbwiedergabeeigenschaften
- die Lebensdauer und das Betriebsverhalten
- die Ausführungsformen, die Leistungsstufung, die Anschaffungs- und Betriebskosten

Die Lichtausbeute verschiedenen Lampenarten ist in folgender Folie dargestellt:

Folie Nr. 16: Lichtausbeute

Es zeigt sich, dass alle thermischen Strahler weniger als 25 lm/W an Lichtausbeute liefern. Ursache ist die zugrunde liegende Strahlungsverteilung eines schwarzen Körpers mit einer Temperatur von etwa 3000 K. Zur Erinnerung: wird die gesamte Energie einer Quelle bei der Wellenlänge λ = 555 nm (grünes Licht) abgestrahlt, so ergibt sich eine Lichtausbeute von 683 lm/W, wird die Energie einer Quelle gleichmäßig auf den sichtbaren Bereich λ = 380 ... 780 nm verteilt, so beträgt die Lichtausbeute dieses „weißen“ Lichtes 199 lm/W. Diesem Ideal sollten Lampen nahe kommen. Wie die Folie zeigt erreichen die besten Quellen eine Lichtausbeute von etwa 130 lm/W.

Die Lichtfarbe einer Lampe wird durch die **ähnlichste Farbtemperatur** angegeben:

Folie Nr. 8: Farbtemperatur

Die DIN teilt die Lichtfarben nach ihrer ähnlichsten Farbtemperatur in drei Gruppen ein:

Ähnlichste Farbtemperatur	**Lichtfarbe**
unter 3300 K	Warmweiß (ww)
3300 bis 5500 K	Neutralweiß (nw)
über 5500 K	Tageslichtweiß (tw)

Glühlampen haben daher ein warmweißes Licht, Leuchtstofflampen erreichen neutralweißes Licht, Leuchtstofflampe mit spezieller Leuchtschicht können auch tageslichtweiß erreichen.

Die Farbwiedergabe von Lampen wird in einem Vergleich an Normfarben ermittelt und durch den Farbwiedergabeindex R_a angegeben.

Folie Nr. 15: Farbwiedergabe

Nach diesem Index werden Farbwiedergabestufen vergeben:

Folie Nr. 8: Farbwiedergabeindex

Lampen für eine Innenraumbeleuchtung sollten mindestens die Farbwiedergabestufe 3 erreichen, also $R_a > 40$.

4.2 Lampentypen

Lampen werden generell nach drei Hauptgruppen der Lichterzeugung unterschieden:

Folie Nr. 15: Lichtquellen

- Temperaturstrahler (Glühlampen, Halogenlampen)
- Niederdruck-Entladungslampen (Leuchtstofflampen, Energiesparlampen, Natriumdampf-Niederdrucklampen
- Hochdruck-Entladungslampen (Halogen-Metalldampflampe, Natrium-Hochdrucklampe)

a) Glühlampe

Video Nr. 5: Kohlefadenlampe

Glühlampen sind typische Temperaturstrahler, in denen ein auf ca. 2600 - 3000 K erhitzter Wolframdraht unter Vakuum oder in einer inerten Gasatmosphäre zum Glühen gebracht wird, Der Hauptanteil der abgegebenen Strahlung liegt dabei im infraroten Bereich.

Folie Nr. 17: Strahlung des schwarzen Körpers und Farbanteile

Die Verteilung der Spektralfarben mit einem starken Rotanteil führt dazu, dass das Licht als warm empfunden wird (warmweiß).

Die Lebensdauer ungedimmter Glühlampen liegt bei 1000 h. Bei höherer Wendeltemperatur verbessert sich die Lichtausbeute, verkürzt sich jedoch ist die Lebensdauer. Die Verkürzung der Lebensdauer ist eine Folge der mit der Temperatur steigenden Verdampfungsgeschwindigkeit der Wolframatome, die einerseits zur Kolbenschwärzung und andererseits letztendlich zum Bruch der Glühwendel führt.

Folie Nr. 17: Lebensdauer der Glühlampe

Ein hoher Fülldruck eines möglichst schweren Gases (Argon, Krypton, Xenon) vermindert die Verdampfungsgeschwindigkeit des Wolframs und damit die Kolbenschwärzung. Krypton-Lampen besitzen, dasie mit einer höheren Temperatur betrieben werden, eine ca. 10% höhere Lichtausbeute als normale Glühlampen, deren Lichtausbeute mit 9-19 lm/W insgesamt sehr niedrig liegt.

Die hohen Oberflächentemperaturen führen zu Staubverschmorungen.

Mattierte Glaskolben dämpfen die Schattenbildung und Blendung. Kuppenverspiegelte Lampen schützen vor Blendung und sorgen für ein indirektes Licht. Aus Gründen der Energieersparnis sollten dauerbrennende Glühlampen sukzessive durch andere Lichtquellen ersetzt werden.

b) Halogenlampen

Halogenlampen arbeiten mit etwas höherer Wendeltemperatur als Glühlampen. Die Halogengase im Inneren verhindern, dass sich die aus der Glühwendel verdampfenden Metallgase auf der Kolbeninnenfläche niederschlagen und diesen schwärzen.

Folie Nr. 18: Halogenprozess

Video Nr. 6: Halogenlampe

Das beim Lampenbetrieb von der Wendel abdampfende Wolfram gelangt durch Diffusion oder Konvektion in Temperaturgebiete mit T < 1400 K nahe der Glaskolbenwand, wo sich stabile Halogenverbindungen bilden. Mit der thermischen Strömung gelangen diese Verbindungen wieder in die Nähe der heißen Wendel und zerfallen dort wieder. Ein Teil des Wolframs wird wieder auf die Wendel zurücktransportiert, allerdings nicht an seine Herkunftsstelle.

Die Halogene - früher Iod, heute häufig Brom - verhindern somit nicht das Verdampfen des Wolframs sondern nur die Schwärzung des Glaskolbens. Die Lebensdauer von 2000 - 3000 h endet mit der Wendelunterbrechung an entstehenden "hot spots". Dimmen von Halogenlampen erhöht die Lebensdauer und führt zu einer Verschiebung der Farbtemperatur. Desweiteren führt es zeitweilig zu einer leichten Schwärzung des Kolbens, die jedoch bei Volllast wieder verschwindet.

Durch die höhere Temperatur der Glühwendel ist das Spektrum der Halogenlampen gegenüber den Glühlampen etwas in den kürzerwelligen Bereich verschoben und im Uhrzeigersinn gekippt. Es enthält einen geringeren Infrarotanteil, einen höheren UV- und Blauanteil. Auch die Wellenlängen der UV-Strahlung verschieben sich in Richtung der gefährlicheren kurzwelligen UV-Strahlung. So erklärt es sich, dass Halogenlampen zwar nur etwa 50% mehr UV-Strahlung aussenden als Glühlampen, die Lichtschäden aufgrund die kurzwelligeren Strahlen jedoch viermal so stark sind wie bei Glühlampen.

Die Lichtausbeute liegt mit 15 - 25 lm/W ca. 100 % höher als bei Glühlampen. Die Farb-

wiedergabequalität liegt je nach Art des Reflektors in der Gegend von ca. 94 - 97.

Halogenlampen mit IR-Beschichtung verfügen über eine um ca. 30% höhere Lichtausbeute. Die IR-reflektierende Beschichtung reflektiert die abgegebene IR-Strahlung großenteils auf die Wendel zurück, die dort zum Teil absorbiert wird. Dies bewirkt eine Erhöhung der Wendeltemperatur, wodurch die Zufuhr elektrischer Energie reduziert werden kann. Die Lichtausbeute steigt an.

Folie Nr.18: Halogenlampe mit IR-Beschichtung

Es ist zu unterscheiden zwischen Hochvolt (230V)- und Niedervolt (12V)-Lampen und zwischen Hochdruck- und Niederdruck-Halogenlampen. Nur Niederdruck-Lampen dürfen in freibrennendem Betrieb eingesetzt werden.

Neben den kleinen Stiftsockellampen sind vor allem die kleinen Reflektorlampen üblich, die in Lampen ohne Reflektor eingesetzt werden. Bei den heutigen Qualitäten ist meist eine Schutzscheibe aus Borsilikat integriert. Die Schutzscheibe hält UV-B Strahlung zurück, schützt bei explodierenden Lampen und verhindert Staubverschmorungen auf der heißen Kolbenoberfläche.

Reflektorlampen werden in 20-50 Watt, in Abstrahlwinkeln von 8 -60˚ und verschiedenen Sockelweiten angeboten. Die Farbtemperatur liegt bei 2900 ... 4000 K und lässt sich durch Dimmen beeinflussen. Die Lampen um 5 % zu dimmen, erhöht die Lebensdauer bereits erheblich. Starkes Dimmen führt allerdings zunehmend zu einer gelblichen Lichtverfärbung.

c) Leuchtstofflampen

In einer Leuchtstoffröhre befindet sich bei sehr niedrigem Druck etwas Quecksilberdampf und ein Edelgas - meinst Argon oder eine Mischung aus Argon und Neon. An den Rohrenden befinden sich Kathoden aus Wolframdraht. Beim herkömmlichen Startprozess erhitzt eine hohe Spannung kurzfristig die Kathoden so weit, bis diese Elektronen aussenden und dadurch das Gas elektrisch aufladen (ionisieren). Das ionisierte Gas wird elektrisch leitend und es kommt zu einem starken Elektronenfluss durch die Röhre.

Folie Nr. 19: Leuchtstoffröhre

Video Nr. 7: Leuchtstofflampe

Die Elektronen kollidieren auf ihrem Weg mit den Quecksilberatomen. Die Quecksilberatome werden dadurch angeregt und senden bei der Rückkehr in den Normalzustand daraufhin hauptsächlich UV-B Strahlung mit der Wellenlänge 254 nm aus (diese Energie wird frei, wenn Quecksilber von seinem untersten angeregten Zustand in den Grundzustand zurückkehrt). Damit sichtbares Licht entsteht, wird die UV-Strahlung durch die phosphorhaltigen Leuchtstoffe auf der Innenseite der Röhre in sichtbares Licht umgewandelt.

Ein nicht unerheblicher Teil der UV-Strahlung gelangt durch die Leuchtstoffschicht und die Glasröhre hindurch nach außen (typisch: 50µW/lm UV-A), darunter auch ein kleiner Teil

UV-B Strahlung (ca. 10 µW/lm).

Folie Nr. 19a: Funktion der Leuchtstofflampe

Eine Leuchtstoffröhre benötigt ein **Vorschaltgerät** und einen **Starter**. Diese liefern die kurzzeitig hohe Zündspannung und regeln den Stromfluss während des weiteren Betriebs. Nach einigen Augenblicken schaltet der Starter ab und die Elektroden bleiben durch das Auftreffen der Elektronen genügend warm, um die Gasentladung aufrechtzuerhalten. Falls dies beim ersten Mal nicht der Fall ist, startet der Starter einen zweiten Versuch - daher blinken Lampen beim Start bisweilen einige Male auf. Ist die Gasentladung einmal in Gang gekommen, würde der Stromfluss sofort unkontrolliert stark ansteigen. Die Vorschaltgeräte sorgen daher für einen weitgehend konstanten Stromfluss von einer Umpolung des Wechselstroms bis zur nächsten. Bei herkömmlichen Vorschaltgeräten geschieht dies durch eine Magnetspule, bei elektronischen durch transistorartige Schaltungen. Bei manchen Vorschaltgeräten sind beide Funktionen in einem Gerät vereint. Bei Sofortstart-Vorschaltgeräten geschieht die Zündung anstatt über das Vorheizen der Elektroden über eine sehr hohe Zündspannung.

Ist die Gasentladung gezündet, so ist die Gasstrecke sehr niederohmig, der Widerstand der Glühdrähte ist ein Vielfaches höher als der Widerstand der Gasstrecke und die Spannung an der Leuchtstoffröhre ist durch die Vorschaltdrossel sehr gering. Daher erwärmt sich der Starter nicht mehr und der Zündvorgang findet nicht mehr statt.

Leuchtstofflampen sind in den Lichtfarben tageslichtweiß (>5000 K), neutralweiß (4000 K) und warmweiß (<3300 K) erhältlich. Letzteres ist zu empfehlen, wenn Leuchtstofflampen mit gewöhnlichen Halogenlampen oder Glühlampen kombiniert auftreten. Warmweiß wird bei niedrigen Beleuchtungsstärken am angenehmsten empfunden. Neutralweiß ist ein guter Kompromiss, wenn Leuchtstofflampenlicht in Kombination mit Tageslicht auftritt.

Folie Nr. 19: Spektren von Leuchtstofflampen

Der hohe Peak im Bereich Grüngelb ist charakteristisch für das **Lichtspektrum** von Leuchtstofflampen. Er beruht auf dem Emissionsspektrum des in allen Leuchtstoffröhren enthaltenen Phosphors und zeigt sich besonders ausgeprägt bei billigen Leuchtstoffröhren. Da er im Bereich Gelb-Grün liegt, erzeugt er einen starken Helligkeitseindruck - mit anderen Worten, er sorgt für eine hohe Lichtausbeute. Durch Mischung mehrerer (3 - 5, bisweilen 7 - 9) Leuchtstoffe und Gase versuchte man, die Farbwiedergabe zu verbessern. Sogenannte 3-Banden Strahler erreichen die Farbwiedergabestufe 1B und sind für viele Anwendungen brauchbar.

Die besten Farbwiedergabewerte erreichen 5-Banden-Strahler wie Osram Lumilux de luxe tageslichtweiß und Philips Tageslicht de luxe (R_a 98), Warmton-Leuchtstoffröhren "de luxe" sind unwesentlich schlechter. Die Lichtausbeute ist notgedrungen geringer als die billigerer Röhren. Sie werden als 16 mm oder 26 mm-Röhren angeboten. Sogenannte Vollspektrum-Leuchtstoffröhren (Osram Biolux) enthalten neben dem sichtbaren Licht auch einen extra hohen UV-Anteil.

Die Lichtausbeute liegt bei manchen 16 mm - Leuchtstoffröhren und bei Einsatz eines elek-

tronischen Vorschaltgeräts z.T. über 100 lm/W, bei Röhren mit sehr guter Farbwiedergabe liegt sie etwa zwischen 60 und 70 lm/W. Die **Lebensdauer** ist mit bis über 10 000 h sehr hoch. Sie hängt zum großen Teil davon ab, wie häufig die Röhre eingeschaltet wird: durch die hohe Spannung beim Einschalten verbrauchen sich die Elektroden vergleichsweise besonders schnell. Wird die Leuchtstofflampe nur für 1 Minute ausgeschaltet, wird die Stromersparnis durch die verkürzte Lebensdauer wieder aufgewogen, erst ab einer Ausschaltdauer von 10 Minuten überwiegt in jedem Fall die Stromersparnis. Die Lichtausbeute hängt zudem stark von der **Umgebungstemperatur** der Lampe ab. Normalerweise liefern die Röhren zwischen 20˚C und 30˚C am meisten Licht. Außerhalb dieses Bereichs wird der Quecksilberdruck zu groß oder zu klein. Es gibt jedoch auch Spezialröhren für tiefe oder hohe Temperaturen.

Der **Druck** in einer Leuchtstoffröhre liegt normalerweise bei ca. 1/1000 Atmosphären, weshalb Leuchtstoffröhren implodieren und nicht explodieren.

Durch den Quecksilberanteil von ca. 0,5 mg pro kg Lampe gehören verbrauchte Leuchtstoffröhren zum **Sondermüll.**

d) Energiesparlampen (Kompakt-Leuchtstofflampen)

Folie Nr. 20: Energiesparlampen

Kompakt-Leuchtstofflampen erschienen etwa 1980 auf dem Markt als eine energieeffiziente Alternative zu den herkömmlichen Glühlampen. Sie liefern konzentrierteres Licht als die Leuchtstoffröhren, das Licht lässt sich dennoch weit weniger gut bündeln als bei Glühlampen oder Halogenlampen. Zur Spotbeleuchtung sind sie daher weniger gut geeignet, auch wenn sie z.T. mit integriertem Reflektor angeboten werden. Kompakt-Leuchtstoffröhren sind entweder mit Zwei- oder Vierstiftsockel (mit oder ohne eingebauten Starter) oder mit Schraubsockel und integriertem Vorschaltgerät erhältlich.

Video Nr. 9: Energiesparlampe 1

Die Helligkeit nimmt bei geringen Temperaturen ab. Die Temperatur an der kühlsten Stelle der Röhre (häufig an den Ecken) ist ausschlaggebend für den Gasdruck und damit die Helligkeit. Aus diesem Grund entscheidet die **Brennlage** mit über den Lichtstrom. Besonders bei niedrigen Umgebungstemperaturen macht es einen enormen Unterschied, ob eine Kompakt-Leuchtstoffröhre stehend (18% geringerer Lichtstrom bei -10˚C) oder hängend bzw. waagerecht eingesetzt ist (80% geringerer Lichtstrom bei -10˚C, für Osram Dulux L).

Elektronische Kompakt-Leuchtstofflampen bzw. Vorschaltgeräte sind wiederum wirtschaftlicher als konventionelle. Elektronische Systeme können bei Wechselstrom wie bei Gleichstrom betrieben werden und eignen sich daher auch für Notstrombeleuchtung. Die Lampe sollte vor dem Wiedereinschalten abgekühlt sein, häufiges Wiedereinschalten in warmem Zustand ver-kürzt die Lebensdauer, die 8000 - 14000 h beträgt (bei Billigmarken z.T. weit weniger). Die Helligkeit nimmt im Laufe der Lebenszeit etwas ab, auf ca. 87% nach 8000 h. Nur wenige Typen sind mit entsprechenden Vorschaltgeräten dimmbar (z.B. Osram Dulux L).

Die Lichtausbeute liegt etwas niedriger als bei langen Leuchtstoffröhren. Die Farbwiedergabequalität entspricht normalerweise der Stufe 1B, einige Typen ohne integriertes Vorschaltgerät sind auch in der Stufe 1 A erhältlich (Osram Dulux L lumilux de luxe).

Video Nr. 8: Energiesparlampe 2

e) Entladungslampen

Entladungslampen beruhen wie Leuchtstofflampen auf einer Gasentladung, Bei Leuchtstofflampen wird das sichtbare Licht im wesentlichen erst von der Leuchtstoffschicht erzeugt.

Folie Nr. 21: Entladungslampen

Bei Entladungslampen dagegen entsteht das sichtbare Licht sofort bei der Gasentladung. Man unterscheidet Metalldampflampen und Gasentladungslampen. Alle Lampen benötigen eine bestimmte **Anlaufzeit** von einigen Minuten, bis der richtige Dampfdruck aufgebaut ist und die Lampe ihre volle Leistung entwickelt. Da die Zündspannung über der Betriebsspannung liegt, ist stets ein Zündgerät erforderlich.

Entladungslampen sind mit Stiftsockeln oder Schraubsockeln erhältlich, auch in Form kleiner Reflektorlampen, die z.B. in faseroptischen Systemen eingesetzt werden können. Da die Lichtquelle sehr punktförmig ist, lässt sich das Licht von Entladungslampen sehr gut **bündeln**.

Die Lampen sind z.T. nur für spezielle **Brennstellungen** zugelassen, z.B. horizontal oder vertikal, mit bestimmten Toleranzen..

Die **Metalldampflampen** enthalten im Unterschied zu Leuchtstofflampen Quecksilberdampf <u>unter hohem Druck</u> sowie kleine Mengen von Halogenverbindungen, um die Farbbalance zu verbessern. Zwischen den beiden dicht beieinander stehenden Elektroden entsteht ein dichter Stromfluss (Bogenentladung) durch das Gas und die Elektronen stoßen heftig auf die Gasatome. Bei den Kollisionen erhalten die Quecksilber- und anderen Atome viel Energie, die sie in Form von Licht und Wärme wieder abgeben.

Entladungslampen gehören zu den energieeffizientesten Lampen, denn sie haben wenig Möglichkeit, Energie in Form von Wärme abzugeben. Bei Leuchtstofflampen sendet das Quecksilber hauptsächlich UV-Strahlen aus, die von den Leuchtstoffen in energieärmeres Licht umgewandelt werden. Der Differenzbetrag an Energie wird in Form von Wärme frei. Beim Start von Entladungslampen, wenn der Quecksilberdruck noch gering ist, wird ebenfalls hauptsächlich UV-Strahlung erzeugt (welche vom Glaskolben absorbiert wird). Je höher Temperatur und Druck in der Lampe ansteigen, desto weißer wird das Licht. Die anfangs gebildete UV-Strahlung trifft dann sehr häufig auf bereits angeregte Quecksilberatome und befördert diese auf noch höhere Energieniveaus. Die UV-Strahlung kann somit kaum aus der Gaswolke entkommen, denn sobald ein Atom ein 254 nm-Photon abgibt, wird diese Energie vom Nachbaratom absorbiert (radiation trapping). Diese höheren Energieniveaus bauen sich dann durch Abgabe sichtbaren Lichts ab. Durch die häufigen Kollisionen zwischen angereg-

ten Quecksilberatomen wird außerdem Licht auch in Wellenlängen frei, die ohne Kollisionen unmöglich wären. Quecksilber allein würde bläulich-weißes Licht erzeugen, die Metall-Halogenide in der Lampe tragen Rottöne und andere Farbnuancen bei und machen das Licht wärmer und tageslichtähnlicher.

Von den Entladungslampen besitzen lediglich einige **Halogen-Metalldampflampen** eine akzeptable Farbwiedergabe. Hierbei sind dem Quecksilber im Brennraum verschiedene Metallhalogenide seltener Erden beigemischt, welche die Farbwiedergabe positiv beeinflussen. Nur wenige, wie Radium RCI-TS... NDL oder Osram Powerstar HQI tageslichtweiß, erreichen die Farbwiedergabestufe 1A (Lichtausbeute: 70 - >100 lm/W). Die Farbtemperatur der Metalldampflampen nimmt bei jeder Betriebsstunde und bei jedem Einschalten etwas ab, so dass in der Praxis nicht unbedingt die gesamte Lebensdauer nutzbar ist. Bei neueren Typen mit Keramikbrenner (z.B. Osram Powerstar HCI, Farbwiedergabestufe 1B) sowie bei Natrium-Xenonlampen (Farbwiedergabestufe bis 1B) soll die Farbtemperatur weitgehend konstant bleiben (Osram). Alle Entladungslampen emittieren einen erheblichen Anteil UV-Licht und benötigen einen UV-Sperrfilter. Die meisten benötigen zudem eine bruchsichere Abdeckscheibe, für den Fall, dass eine Entladungslampe explodiert.

f) Schwefellampen

Folie Nr. 22: Schwefellampen

Schwefellampen sind ein revolutionärer Lampentyp für große Hallen. Eine Schwefelkugel wird durch einen Mikrowellengenerator angeregt und erzeugt ein sonnenlichtähnliches (6000 K) weißes Licht mit geringem IR-und UV-Anteil. Der Lichtkolben besteht aus einer hohlen, 35 mm großen Quarzkugel, die mit Schwefel- und Argongas gefüllt ist. Die Lichtausbeute ist etwa mit 80 - 135 lm/W bis zu doppelt so hoch wie bei anderen weißen Lichtquellen, die Lebensdauer der Lampe liegt bei 60 000 h, die des Mikrowellengenerators bei ca. 20 000 h.

Die Lichtleistung einer einzelnen 1000W Schwefellampe ist mit 135 000 lumen extrem hoch - sie kann bis auf 20% gedimmt werden. Um das Licht gleichmäßig auf den Raum zu verteilen, werden spezielle Uplighter oder bis 27 m lange Lichtröhren (3M) eingesetzt, aus denen das Licht gleichmäßig austritt. Die hohlen Lichtröhren sind mit einem speziellen Reflexionsfilm mit mikroskopischen Prismen ausgestattet. Hiermit können größte Räume diffus und schattenfrei ausgeleuchtet werden.

Video Nr. 10: weiße LED

5 Beleuchtung mit Tageslicht

5.1 Anforderungen

- Allgemeines

Aufenthalts- und Arbeitsräume müssen mit ausreichend großen, durchsichtigen Fenstern in Augenhöhe der im Raum sitzenden bzw. stehenden Personen ausgestattet werden, um eine angemessene Sichtverbindung zwischen Innen- und Außenraum und im Innenraum bei Tage ein angenehmes Helligkeitsniveau sicherzustellen. Diese aus psychologischen Gründen unabdingbaren Wirkungen von Tageslicht und Fenster können weder durch eine künstliche Beleuchtung noch durch etwaige andere technische Einrichtungen ersetzt werden. Oberlichter tragen zum Sichtkontakt zwischen Innen- und Außenraum nur sehr wenig bei und sind deshalb kein Ersatz für (Seiten-)Fenster, wenn es um Belange der Behaglichkeit und des Sichwohlfühlens im Innenraum geht.

- Sichtverbindung nach außen

In Arbeitsräumen (Raumtiefe bis 6,0 m und Raumfläche bis 50 m^2) wird die notwendige Sichtverbindung zwischen Innenraum und Außenraum in der Regel sichergestellt, wenn

- die Oberkante der Fensterbrüstung höchstens 0,9 m über dem Fußboden liegt
- die Fensterhöhe im Rohbau mindestens 1,3 m beträgt
- die Summe der Breiten aller durchsichtigen Teile des Fensters (der Fenster) 55% der Raumbreite mindestens erreicht
- die durchsichtige Fensterfläche insgesamt 30% der Fensterwandfläche einnimmt.

- Helligkeit

Wohnräume und vergleichbare Arbeitsräume erhalten genug Tageslicht, wenn der Tageslichtquotient bei bedecktem Himmel an den Bezugspunkten P_1 und P_2 im Mittel **wenigstens** 0,9% und am ungünstigsten dieser Punkte wenigstens 0,75% beträgt

Folie Nr. 23: Bestimmung des Tageslichtquotienten

In Wohnräumen mit Fenstern in zwei aneinander grenzenden Wänden muss der Quotient am ungünstigsten Punkt mindestens 1% betragen.

- Besonnung

Ob die Möglichkeit einer Besonnung eines Aufenthaltsraumes erwünscht oder unerwünscht ist, hängt in der Regel von dessen Verwendungszweck ab. Vor allem für Wohnräume ist ein Mindestmaß an Besonnung ein wichtiges Qualitätsmerkmal.

Ein Raum gilt als besonnt, wenn Sonnenstrahlen bei einer Sonnenhöhe von mindestens 6° in

den Raum einfallen können. Als Nachweisort gilt die Fenstermitte in Brüstungshöhe und Fassadenebene. Ein Wohnraum gilt als ausreichend besonnt, wenn seine Besonnungsdauer am 17. Januar mindestens 1 h beträgt. Eine Wohnung gilt als ausreichend besonnt, wenn in ihr mindestens ein Wohnraum ausreichend besonnt wird.

In der Regel ist die Besonnung von Arbeitsräumen jedoch unerwünscht, denn dies führt zu

- Blendung
- sehr hohen Kontrasten im Gesichtsfeld
- Belästigung der arbeitenden Personen durch übermäßige Raumaufheizung sowie direkte Wärmeeinstrahlung auf die Körperoberfläche.

- Erfüllung der Sehaufgabe

Zur Erfüllung der in Innenräumen anfallenden Sehaufgaben muss eine angemessene funktionelle Beleuchtung sichergestellte werden. Die aus psychologischen Gesichtspunkten geforderte Helligkeit (s.o.) reicht hierzu in der Regel nicht aus, so dass es erforderlich ist, unter Berücksichtigung der jeweiligen Raumfunktionen ausreichende Beleuchtungsverhältnisse entweder mit künstlichem Licht oder mit Tageslicht oder gegebenenfalls mit beiden zu schaffen.

Eigentlich müssen bei der Tageslichtbeleuchtung in Abhängigkeit von der jeweiligen Sehaufgabe bzw. Tätigkeit entsprechende Beleuchtungsstärken gefordert werden, wie sie bei der künstlichen Beleuchtung hinreichend sind (vgl. DIN 5035). Allerdings können die bei künstlicher Beleuchtung möglichen Beleuchtungsarten mit dem Tageslicht nur beschränkt realisiert werden:

- eine Allgemeinbeleuchtung, die im ganzen Raum gleich gute Sehbedingungen schafft, kann nur mit Oberlichter erreicht werden!
- eine arbeitsplatzorientierte Allgemeinbeleuchtung kann fast nur bei Oberlichtern realisiert werden
- eine Einzelplatzbeleuchtung ist durch Tageslicht in der Regel nicht möglich.

- Position im Raum und Blickrichtung

Bei Tage kann in Innenräumen Blendung durch Tageslicht auftreten, verursacht durch den im Blickbereich liegenden Teil des Himmels, durch direktes Sonnenlicht, helle und spiegelnde Fassenden der Verbauung und glänzende oder spiegelnde Flächen im Innenraum. So sind entsprechende Blendschutzeinrichtungen oft zwingend erforderlich. Zur Vermeidung von Reflexblendung sind Arbeitsplätze im Raum so anzuordnen, dass die Blickrichtung möglichst parallel zu den Fenstern verläuft.

5.2 Berechnung der Tageslichtbeleuchtung

a) Der Tageslichtquotient

Tageslicht im Sinne der DIN 5034 ist das Licht des vollständig bedeckten Himmels bei schneefreiem Erdboden. Der Tag beginnt im beleuchtungstechnischen Sinn mit einer Beleuchtungsstärke E_a im Freien ohne Verbauung von mindestens 5000 lx.

Die Beleuchtungsstärke im Freien ist dabei starken täglichen und jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen:

Folie Nr. 24: Beleuchtungsstärke im Freien

Der **Tageslichtquotient D (Daylight Factor)** wird in DIN 5034 Teil 1 erläutert:

$$D = \frac{E_p}{E_a} \tag{5.1}$$

Der Tageslichtquotient ist das Verhältnis der Beleuchtungsstärke E_p in einem Punkt einer gegebenen Ebene, die durch direktes und/oder indirektes Himmelslicht bei angenommener oder bekannter Leuchtdichteverteilung des Himmels erzeugt wird, zur gleichzeitig vorhandenen Horizontalbeleuchtungsstärke E_a im Freien bei unverbauter Himmelshalbkugel.

Die durch direktes Sonnenlicht bewirkten Anteile beider Beleuchtungsstärken bleiben unberücksichtigt. Für den Anwendungsbereich nach dieser Norm gilt der Tageslichtquotient für die Beleuchtung durch den bedeckten Himmel. In diesem Fall ist der Tageslichtquotient für jeden Raumpunkt eine konstante Größe. In der Praxis wird der Tageslichtquotient aber für verschiedene Beleuchtungssituationen bestimmt und miteinander verglichen.

Der Tageslichtquotient D setzt sich aus drei Anteilen zusammen:

- dem Himmelslichtanteil D_H zur Berücksichtigung des direkt vom Himmel zum Bezugspunkt gelangenden Tageslichtes,
- dem Außenreflexionsanteil D_V zur Berücksichtigung der Reflexionen des Tageslichtes an Flächen im Außenraum, das direkt zum Bezugspunkt gelangt,
- dem Innenreflexionsanteil D_R zur Berücksichtigung des direkt von außen kommenden Tageslichtes, das an den Flächen des Innenraumes nach Reflexion zum Bezugspunkt gelangt.

$$D = D_H + D_V + D_R \tag{5.2}$$

b) Die Messung des Tageslichtquotienten

Die Messpunkte nach DIN 5034 für den Tageslichtquotienten sind folgende:

Folie Nr. 23: Messung des Tageslichtquotienten

Die <u>Messebene</u>, DIN 5034 sagt <u>Bezugsebene</u>, liegt bei Wohnräumen <u>immer **85 cm** über Ober-</u>

kante fertigem Fußboden. Gleiches gilt auch für Arbeitsräume.

Die **Messpunkte** im Raum liegen immer

- bei Wohnräumen in halber Raumtiefe und in 1 m Entfernung von den Seitenwänden,
- bei Arbeitsräumen, mit Wohnräumen vergleichbar, in halber Raumtiefe und in 1 m Entfernung von den Seitenwänden,
- bei Arbeitsräumen, nicht mit Wohnräumen vergleichbar, in 1 m Abstand vor der Rückwand und in 1 m Entfernung von den Seitenwänden.

Arbeitsräume sind in ihren Abmessungen Wohnräumen vergleichbar, wenn die folgenden Abmessungen nicht wesentlich überschritten werden:

- Raumhöhe 3,5 m;
- Raumtiefe 6,0 m;
- Raumfläche 50 m².

Zur Bestimmung von D muss die Horizontalbeleuchtungsstärke E_a bei vollständig bedecktem Himmel gemessen werden. Dies kann im allgemeinen nur auf dem Dach (kein Einfluss der umgebenden Bebauung!) gemessen werden. Deshalb wird E_a (meist) über die Messung der Leuchtdichte L_δ des (bedeckten) Himmels bestimmt, die unter dem Winkel δ gegen den Horizont am Fenster vorliegt. Es gilt nach DIN 5034:

$$E_a = \frac{7{,}330 \cdot L_\delta \cdot (1sr)}{1 + 2\sin\delta} \tag{5.3}$$

c) Die Güte der Tageslichtbeleuchtung

Je nach Verwendung des betreffenden Raumes sind Tageslichtquotienten von 1 – 10% in halber Raumtiefe, bzw. am ungünstigsten Platz anzustreben. Dabei soll das Verhältnis zwischen minimalem und maximalem Tageslichtquotient im Raum nicht kleiner als 1/6 sein!

Folie Nr. 24: Gefühlsmäßige Bewertung der Tageslichtbeleuchtung

d) Berechnung des Tageslichtquotienten

Für Neubauvorhaben muss der Tageslichtquotient rechnerisch ermittelt werden. Dabei gibt es umfängliche Berechnungsmethoden, um für einen Raum nach den äußeren Gegebenheiten den Tageslichtquotienten zu bestimmen.

Bei der Berechnung von D ist es zweckmäßig, zunächst die verschiedenen Anteile für die Rohbauöffnung des Fensters zu ermitteln. Anschließend wird der Einfluß von Verglasung, Versprossung und Verschmutzung durch zusätzliche Korrekturfaktoren berücksichtigt (DIN 5034):

$$D = (D_{Hr} + D_{Vr} + D_{Rr}) \cdot \tau_{D65} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \qquad (5.4)$$

Dabei bedeuten:

τ_{D65} Lichttransmissionsgrad des Verglasungsmaterials, z. B. bei Einfachverglasung 0,9, bei Doppelverglasung 0,8, bei Dreifachverglasung 0,7. Für Sonnenschutz- und Wärmeschutzverglasung gilt τ_{D65} = 0,1 bis 0,8.

k_1 Schwächungsfaktor zur Berücksichtigung der Fensterkonstruktion; Rahmen und Versprossung:

k_1 = (lichtdurchlässige Fläche)/(Fläche der Rohbauöffnung).

k_2 Schwächungsfaktor zur Erfassung der Verschmutzung, z. B. 0,95.

k_3 Korrekturfaktor für nicht senkrechten Lichteinfall; für die übliche Doppelverglasung gilt 0,85.

D_{Hr} Dieser Himmelslichtanteil ist abhängig von der Lage und Größe des vom Bezugspunkt aus sichtbaren Himmelsausschnittes

D_{Vr} Der Außenreflexionsanteil ist von der Lage, Größe und Reflexionsgrad der vom Bezugspunkt aus sichtbaren Verbauung abhängig.

D_{Rr} Der Innenreflexionsanteil ist vom Verhältnis der Fensterflächen zur Summe aller anderen Raumbegrenzungsflächen sowie den Reflexionsgraden der Raumbegrenzungsflächen abhängig.

6 Innenraumbeleuchtung mit künstlichem Licht

6.1 Allgemeine Vorbemerkungen

a) Nutzung der Räume

Die Gütemerkmale einer Beleuchtungsanlage hängen vom Zweck und von der Nutzung der beleuchteten Räume ab. Man unterscheidet im wesentlichen zwischen Arbeitsräumen, Verkaufs- und Ausstellungsräumen, stimmungsbetonten Räumen und Verkehrszonen. Je nachdem werden unterschiedliche Anforderungen an die Beleuchtungsanlage gestellt.

b) Beleuchtungsart

Bei der Beleuchtung in Räumen unterscheidet man im wesentlichen nach drei Beleuchtungsarten:

- Allgemeinbeleuchtung
- Einzelplatzbeleuchtung
- Arbeitsplatzorientierte Allgemeinbeleuchtung

Bei der Allgemeinbeleuchtung wird der ganze Raum im wesentlichen gleichmäßig beleuchtet. Bei der Einzelplatzbeleuchtung werden bestimmte Ausschnitte der gesamten Nutzfläche des Raumes – die Arbeitsplätze – den spezifischen Ansprüchen entsprechend beleuchtet. Allgemein ist eine solche Beleuchtungsart nur zulässig, wenn andere wichtige Raumzonen wie etwa die Verkehrszonen ausreichend beleuchtet werden, wozu oft eine Allgemeinbeleuchtung mit relativ niedrigem Niveau dient. Die Arbeitsplatzorientierte Allgemeinbeleuchtung ist sozusagen ein Kompromiss zwischen den beiden anderen Beleuchtungsarten.

6.2 Gütemerkmale einer Innenraumbeleuchtung

Folie Nr. 26a: Lichtplanung

Die Güte einer Beleuchtungsanlage kann durch folgende Gütemerkmale bewertet und gekennzeichnet werden:

- Beleuchtungsniveau
- Leuchtdichteverteilung im Gesichtsfeld
- Blendungsbegrenzung
- Lichtrichtung und Schattigkeit
- Lichtfarbe und Farbwiedergabe

Richtlinien für die Berücksichtigung dieser Gütemerkmale bei der Beleuchtungsplanung sind

in Normen und Empfehlungen (z. B. DIN 5035) zusammengestellt.

- **Das Beleuchtungsniveau**

• Leuchtdichte und Beleuchtungsstärke

In Innenräumen lassen sich die Beleuchtungsstärken recht gut und genau vorausberechnen. Die daraus folgenden Leuchtdichten können nur bestimmt werden, wenn die Reflexionseigenschaften der beleuchteten Objekte bekannt sind. Da bei der Nutzung von Innenräumen extreme Beobachtungsbedingungen nicht vor kommen, kann man näherungsweise die Leuchtdichte L leicht aus der Beleuchtungsstärke E und dem Reflexionsgrad ρ der beleuchteten Oberflächen nach Lambert berechnen

$$L = \frac{1}{\pi} \cdot \rho \cdot E \tag{6.1}$$

• Sehleistung

Optimale Sehleistungen werden bereits bei etwa 500 lx erreicht. Bei sehr kleinen Objekten können bis über 10000 lx dafür nötig werden.

• Annehmlichkeit der Beleuchtung

Folie Nr. 25: Beleuchtungsstärken in Innenräumen

Wie die Folie zeigt, wird von den meisten Testpersonen eine Beleuchtungsstärke von etwa 2000 lx in Arbeitsräumen als optimalster Wert empfunden.

• Empfohlene Beleuchtungsstärken

Folie Nr. 25: empfohlene Beleuchtungsstärken

In der Norm DIN 5035 werden die mittleren Werte für die Beleuchtungsstärken, die Nennbeleuchtungsstärken E_n, festgelegt. Dabei darf in Arbeitsräumen an keinem Arbeitsplatz die 0,6-fache Nennbeleuchtungsstärke unterschritten werden. Der Mittelwert der örtlichen Beleuchtungsstärken aller Arbeitsplätze im Raum soll nicht unter 0,8-fachen Nennwert absinken.

Auch ohne Messgerät kann bei einer Beleuchtung mit Leuchtstofflampen grob abgeschätzt werden, ob diese geforderten Werte eingehalten werden:

Abschätzung: **Bei 30 W Lampenleistung je Quadratmeter Grundfläche in einer Höhe von etwa 3 m sind näherungsweise 500 lx eingehalten.**

– **Leuchtdichteverteilung im Gesichtsfeld**

Die DIN 5035 empfiehlt, dass im Gesichtsfeld eines Beschäftigten Mindestanforderungen für

die Leuchtdichtegleichmäßigkeit erfüllt werden sollten. Die Leuchtdichte des Arbeitsfeldes L_A sollte von der des Umfeldes L_U um nicht mehr als um den Faktor 3 überschritten werden, bzw. um einen Faktor nicht kleiner als 1/3 unterschritten werden:

$$\frac{L_A}{3} \leq L_U \leq 3 \cdot L_A \tag{6.2}$$

Entsprechend soll für die Leuchtdichte L_G größerer ausgedehnter Flächen im weiteren Umfeld gelten:

$$\frac{L_A}{10} \leq L_G \leq 10 \cdot L_A \tag{6.3}$$

Die Wandleuchtdichten sollten zwischen etwa 50 – 100 cd/m^2, die der Decken zwischen 100 – 300 cd/m^2 liegen.

Folie Nr. 26: Leuchtdichteverteilungen

Neuere Untersuchungen für Bildschirmarbeitsplätze empfehlen ein Verhältnis von höchstens 5:1 zwischen der Arbeitsfläche und Flächen im entfernten Umfeld:

$$\frac{L_A}{5} \leq L_G \leq L_A \tag{6.4}$$

– **Blendungsbegrenzung**

Bei der Innenbeleuchtung mit künstlichem Licht spielt die physiologische Blendung in der Regel keine Rolle. Dagegen ist die psychologische Blendung in mehr oder minder großem Ausmaß oft anzutreffen. Normen und Empfehlungen geben Hinweise darauf, wie diese Blendungen zu begrenzen sind. Die DIN 5035 teilt die Anforderungen an die Leuchten in vier Güteklassen auf:

Folie Nr. 27: Güteklassen der Blendbewertung

Des weiteren unterscheiden wir zwischen der **Direktblendung** und der **Reflexblendung**. Letztere ist insbesondere bei Bildschirmarbeitsplätzen von großer Bedeutung, da sie das Bildschirmbild überdeckt und unkenntlich macht:

Folie Nr. 27: Blendungsarten

Folie Nr. 29: Reflexblendung am Bildschirm

Wie die beiden Folien zeigen, ist die Blendung einerseits abhängig von der Leuchtdichte der Quelle in Richtung zum Beobachter bzw. zum Bildschirm, andererseits spielt der Ausstrahlungswinkel γ eine sehr große Rolle.

Die **Direktblendung** ist im Winkelbereich $45^\circ < \gamma < 85^\circ$ am unangenehmsten und wird daher

für diesen Bereich bewertet.

Die **Reflexblendung** wird insbesondere für Ausstrahlungswinkel $\gamma > 50^\circ$ kritisch.

In beiden Fällen stören daher weiter entfernte Lichtquellen stärker, als die direkt über dem Arbeitsplatz montierten Quellen.

Die **Direktblendung** kann auf zweierlei Weisen bewertet und eingeschränkt werden:

– Abschirmung der Lichtquelle

  Beim direkten Anblick einer freistrahlenden Lampe besteht die Gefahr der Direktblendung durch zu hohe Leuchtdichten. Zur Vermeidung der Direktblendung besitzen Leuchten undurchsichtige Gehäuseteile und Lamellen bzw. Raster, um die Lampen abzuschirmen oder aber die hohen Leuchtdichten der Lampen werden durch vorgesetzte opale oder prismatische Abdeckungen reduziert.

  Folie Nr. 29: Mindestabschirmwinkel

  Der Abschirmwinkel α einer Leuchte, der gegen die Horizontale gemessen wird, bezeichnet den größten Winkel, unter dem ein direkter Einblick auf die Lampe gerade noch nicht möglich ist. Bei Rasterleuchten dienen im einfachsten Fall längs und quer zur Lampenachse orientierte Metall- oder Kunststoffstreifen zur Abschirmung. Steghöhe h und Stegabstand a ergeben den Abschirmwinkel. Die DIN 5035, Teil 1, schreibt Mindestabschirmwinkel (α_{min}) je nach Lampenart und Güteklasse der Blendungsbegrenzung vor.

– Leuchtdichtebewertung nach Söllner

  Wird der Mindestabschirmwinkel nicht eingehalten, so ist die Leuchte als freistrahlende Leuchte anzusehen und man muss eine Bewertung der Leuchtdichteverteilung nach Söllner vornehmen.

  Folie Nr. 28: Blendungsbewertung nach Söllner

  - Je nach notwendiger Güteklasse und notwendiger Beleuchtungsstärke wird die entsprechende Grenzkurve ausgewählt: z.B. Güteklasse A und Beleuchtungsstärke 500 lx ergibt dritte Grenzkurve von links.
  - In das Diagramm werden die Leuchtdichteverteilungen der verwendeten Lichtquellen eingetragen und zwar jeweils für die vorliegende Leuchtenorientierung. Diese Verteilung erhält man vom Leuchtenhersteller aus den Lichtverteilungskurven: z.B. Lampentyp 2xTC-D13, 1800 lm der Fa. POPP für beide Orientierungen.
  - Die Leuchtdichten der Leuchten müssen geringer sein als es die entsprechende Grenzkurve vorgibt, also links unterhalb der Grenzkurve liegen. Für die verwendete Leuchte ergibt sich daher ein maximaler Abstrahlungswinkel von γ =

65˚ oder ein Seiten- zu Höhenverhältnis von etwas mehr als 2. Weiter entfernt als der sich hieraus ergebende Wert für a darf die Lampe nicht montiert sein.

Die Eindämmung der **Reflexblendung** ist wesentlich schwieriger, da Reflexe viel störender wirken als eine Direktblendung. Kann man eine Leuchte nicht abschirmen, wie es oben beschrieben wurde, so muss man Leuchten mit sehr geringer Leuchtdichte wählen. Als Richtwerte ergeben sich sowohl für Fensterflächen wie auch für Leuchten eine maximale mittlere Leuchtdichte von 200 cd/m². Bei Leuchten wird zusätzlich ein Abschirmwinkel von mehr als 30˚ gefordert.

6.3 Planung und Berechnung der Innenbeleuchtung mit künstlichem Licht

Zur Berechnung der Beleuchtungsstärke auf einer Nutzfläche kann man verschiedene Verfahren anwenden, die einen unterschiedlichen Rechenaufwand benötigen. Mit der heutigen Computertechnik und ihrer Rechenleistung ist es leicht möglich eine Vielzahl von Lichtstrahlen zu verfolgen und an jeder Begrenzungsfläche die Reflexion des Lichtes sowie den Energieverlust (Absorption) zu berücksichtigen. Dieses Verfahren bezeichnet man als „Ray-Tracing“ (Strahlverfolgung).

Wegen des hohen Rechenaufwandes hat sich schon früher ein Verfahren etabliert, welches mit einfachen Berechnungen und Abschätzungen auskommt um die notwendige Anzahl von Lichtquellen in einem Raum mit hinreichender Genauigkeit zu bestimmen: das „Wirkungsgradverfahren“ der Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft (LiTG). Dieses ist auch heute noch Grundlage der meisten Computerprogramme zur Berechnung von Innenbeleuchtungen und soll hier im folgenden vorgestellt werden.

Folie Nr. 30: Flächeneinteilung

Das Wirkungsgradverfahren ist dazu geeignet die mittlere Beleuchtungsstärke E_k auf einer Fläche A_k zu berechnen. Dabei werden folgende Voraussetzungen gemacht:

- der Raum hat eine rechteckige Grundfläche und konstante Höhe, der **Raumfaktor** liegt im Bereich $0{,}6 \leq k \leq 5{,}0$
- der Raum ist vollkommen leer
- die Oberflächen reflektieren vollkommen diffus
- die Reflexionseigenschaften größerer zusammenhängender Flächen (Decke, Wände, usw.) sind ortsunabhängig konstant, und die Lichtströme verteilen sich gleichmäßig auf diese Teilflächen
- die Leuchten sind gleichmäßig an der Decke verteilt, dabei können sie auch abgehängt sein (Leuchtenebene).

Die Zahl der Leuchten berechnet sich dann nach einer einfachen Beziehung:

$$\Phi_n = \eta_R \cdot n \cdot \Phi_L = \eta_R \cdot n \cdot \eta_{LB} \cdot z \cdot \Phi_{LA}$$

dabei ist:

- Φ_n der Lichtstrom auf die Nutzfläche

- Φ_{LA} der Lichtstrom einer Lampe (Herstellerangabe)

- z die Zahl der Lampen pro Leuchte (Herstellerangabe)

- n die Zahl der Leuchten

- η_R der sogenannte Raumwirkungsgrad (s.u.)

- η_{LB} der Leuchtenwirkungsgrad (Herstellerangabe)

η_R und η_{LB} werden zum so genannten Beleuchtungswirkungsgrad zusammengefasst:

$\eta_B = \eta_R \cdot \eta_{LB}$

Weiter gilt:

$$\Phi_n = E_n \cdot A = E_n \cdot L \cdot B$$
$$\Rightarrow \quad E_n \cdot L \cdot B = \eta_B \cdot n \cdot z \cdot \Phi_{LA}$$

mit L = Raumlänge und B = Raumbreite.

Damit ergibt sich für die notwendige Anzahl der Leuchten:

$$n_L = \frac{p \cdot E_n \cdot L \cdot B}{\eta_B \cdot z \cdot \Phi_{LA}} \tag{6.5}$$

- p ist der so genannten **Planungsfaktor**, der Lichtstromrückgang und Verschmutzung der Beleuchtungsanlage berücksichtigt. Meist wird er zu p = 1,25 gesetzt

- E_n ist die geforderte **Nennbeleuchtungsstärke** auf der Arbeitsfläche, abhängig von der Tätigkeit im Raum

  Folie Nr. 25: geforderte Beleuchtungsstärken

- L ist die Raumlänge, B die Raumbreite; beide Größen gehen noch in den so genannten **Raumfaktor k** ein:

$$k = \frac{L \cdot B}{h \cdot (L + B)} \tag{6.6}$$

  Dabei stellt h die Höhe der Leuchten über der Nutzfläche dar. Arbeitsflächen werden

dabei 0,85 m über dem Boden angenommen, bei Verkehrswegen wird die Beleuchtungsstärke in einer Höhe von max. 0,2 m über dem Boden berechnet, bei Sportstätten gilt 1,0 m über dem Boden.

- η_B ist der so genannten **Beleuchtungswirkungsgrad**; er errechnet sich nach

$$\eta_B = \eta_R \cdot \eta_{LB} \tag{6.7}$$

Dabei stellt η_R den **Raumwirkungsgrad** und η_{LB} den **Leuchtenbetriebswirkungsgrad** dar.

Der Raumwirkungsgrad η_R ist definiert als das Verhältnis des auf die interessierende Fläche A_k (z. B. die Nutzfläche) fallenden Lichtstrom Φ_k zu dem von allen Leuchten ausgestrahlten Lichtstrom $n \cdot \Phi_L$:

$$\eta_R = \frac{\Phi_k}{n \cdot \Phi_L} \tag{6.8}$$

Diese Größe hängt ab von der Raumgeometrie, erfasst durch den Raumfaktor k, von den Reflexionseigenschaften der Wände, der Decke und des Bodens sowie von der speziellen Lichtausstrahlung der Leuchte. Die Leuchtenhersteller liefern dem Nutzer Raumwirkungsgradtabellen, aus denen er den Raumwirkungsgrad der Leuchten ermitteln kann:

Folie Nr. 32: Raumwirkungsgradtabelle

In der linken Spalte findet sich der Raumfaktor k. Für Werte außerhalb des aufgeführten Bereiches liefert das Wirkungsgradverfahren keine zuverlässigen Ergebnisse.

In den oberen drei Zeilen sind verschiedene Kombinationen von Reflexionsgraden angegeben, wie sie typischer Weise auftreten können. Diese Reflexionsgrade können entweder gemessen werden, aus Tabellen abgeschätzt werden

Folie Nr. 31: Reflexionsgrade

oder mit Hilfe von Vergleichsfarbmustern bestimmt werden. Für die Arbeitsfläche setzt man den Wert 0,3 an, wenn Boden und Arbeitsfläche sehr hell sind, ansonsten setzt man hier 0,1 an.

Wie die oberste Zeile zeigt, gilt die Tabelle für eine ganz spezielle Lichtverteilungskurve. Diese sind von der LiTG klassifiziert worden und in diesem Beispiel mit A40.2 gekennzeichnet worden:

Folie Nr. 30: OSRAM DULUX CARRÉ

Der Leuchtenbetriebswirkungsgrad wird ebenfalls vom Hersteller angegeben und kann aus dem Katalog bezogen werden:

Folie Nr. 30: OSRAM DULUX CARRÉ

- Φ_L ist der von der Leuchte ausgesandte Lichtstrom. Dieser berechnet sich aus dem Lichtstrom der eingesetzten Lampen und der Anzahl der Lampen je Leuchte.

Berechnungsbeispiel:

Es soll ein Besprechungszimmer mit folgenden Abmaßen beleuchtet werden:

L = 15,00 m; B = 8,00 m; H = 3,40 m

Folgende lichttechnische Forderungen werden gestellt:

Lichtfarbe ww oder nw, Farbwiedergabe R_a = 2A, Beleuchtungsstärke E_n = 300 lx

Folien Nr. 8, Nr. 25

Es wird eine Leuchte der Firma OSRAM ausgewählt: DULUX CARRÉ EL/D mit zwei Kompakt-Leuchtstofflampen 24 W, Φ_L = 1800 lm je Lampe, Lichtverteilungskurve A40.2, Leuchtenbetriebswirkungsgrad η_{LB} = 0,58

Folie Nr. 30: Lichtplanung

Berechnung der notwendigen Leuchtenzahl:

Raumfaktor:

$$k = \frac{L \cdot B}{h \cdot (L + B)} = \frac{15m \cdot 8m}{(3{,}4m - 0{,}85m) \cdot (15m + 8m)} = 2{,}05 \approx 2$$

Die Reflexionsgrade des Raumes werden wie folgt bestimmt:

ρ_{Decke} = 0,8; ρ_{Wand} = 0,5; $\rho_{Nutzfläche}$ = 0,3;

Folie Nr. 32: Raumwirkungsgrad

Aus der Tabelle ergibt sich ein Raumwirkungsgrad von 0,91. Der Beleuchtungswirkungsgrad errechnet sich dann zu: $\eta_B = 0{,}91 \cdot 0{,}58 = 0{,}53$.

Damit ergibt sich als Leuchtenzahl:

$$n_L = \frac{1{,}25 \cdot E_n \cdot L \cdot B}{\eta_B \cdot \Phi_L \cdot z} = \frac{1{,}25 \cdot 300lx \cdot 15m \cdot 8m}{0{,}53 \cdot 1800lm \cdot 2} = 23{,}6 \approx 24$$

Es werden also 24 Leuchten dieses Typs benötigt, die gleichmäßig über die Deckenfläche verteilt werden sollten. Empfehlung: 3 Reihen à 8 Leuchten.

Regel für Verteilung: Die Leuchten sollten gleichverteilt sein im Abstand h und mindestens h/2 von den Wänden entfernt angeordnet sein.

Abschließende Bemerkungen:

- Mit dem Wirkungsgradverfahren kann man die Anzahl der Leuchten und Lampen in einem Projekt bestimmen.
- Anschließend kann damit die zu erwartende Beleuchtungsstärke E_{erw} auf den Nutzebenen bestimmt werden, indem (6.5) nach E_n umgestellt wird.
- Setzt man jeden der Reflexionsgrade mit 0 an, so kann man für die geplante Beleuchtungsanlage die direkte Beleuchtungsstärke E_{dir} auf der Nutzebene errechnen. Diese Beleuchtungsstärke rührt von dem Licht her, das direkt von den Leuchten zur Nutzebene gelangt.
- Die erwartete Beleuchtungsstärke ist die Summe aus der direkten und der indirekten Beleuchtungsstärke: $E_{erw} = E_{dir} + E_{indir}$. Das Verhältnis der direkten und der indirekten Beleuchtungsstärke ist ein weiteres Gütemerkmal einer Beleuchtungsanlage. Damit kann eine Aussage über die Schattigkeit am Arbeitsplatz gemacht werden.