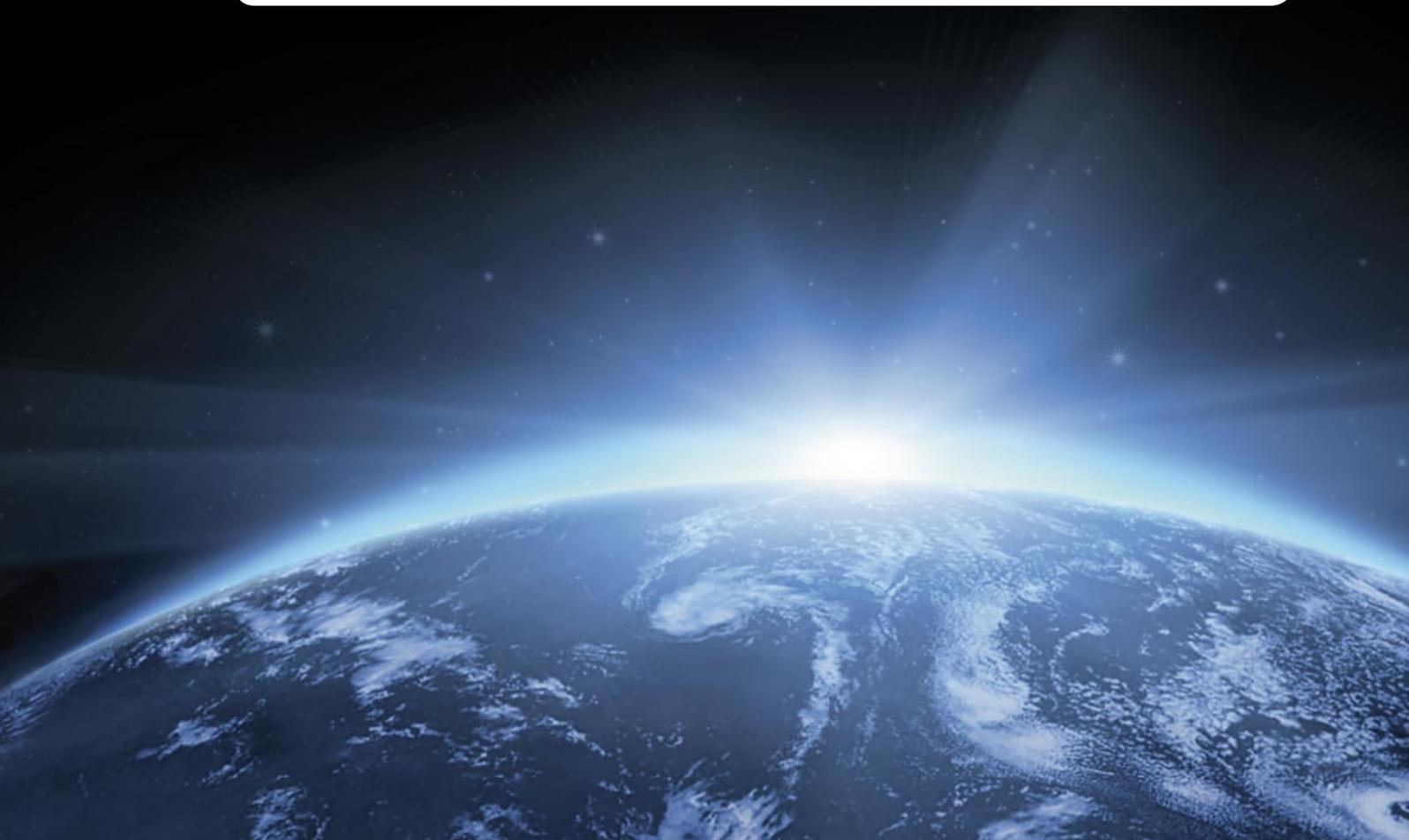


# Vom Licht zur Beleuchtung

## Teil 1: Lichttechnische Grundlagen

Licht ist die Grundlage unseres Lebens. Die gewaltigste, seit der Existenz unseres Planeten vorhandene Lichtquelle ist die Sonne. Ohne sie wäre die Erde eine kalte Wüste ohne Flora, Fauna und Atmosphäre. Denn Licht und Wärme sind die Voraussetzungen der Photosynthese und damit von sauerstoffbildendem Pflanzenwachstum als Existenzvoraussetzung für Mensch, Tier und Pflanzen. Vor Urzeiten, als der Mensch noch nicht über Feuer oder andere Lichtquellen verfügte, war er auf die Sonne als wärmende, erhellende Quelle am Himmel angewiesen. Erst als er selbst Licht erzeugen konnte, waren ihm Bergbau, nächtliche Aktivitäten und andere zivilisatorische Leistungen möglich. Doch mit kaum einem Phänomen hat der Mensch so viele Schwierigkeiten, es umfassend zu erklären und seine Wirkungen auf Körper, Geist und Psyche zu beschreiben.

Die moderne Physik hat durch zahlreiche Experimente nachgewiesen, dass Licht zwei – in letzter Konsequenz durchdacht – unvereinbare Wesensmerkmale hat. Manche Wirkungen des Lichts lassen sich nur erklären, wenn man seinen Wellencharakter voraussetzt, andere erfordern zwingend seine Partikelstruktur. Dieser Dualismus zwischen (elektromagnetischer) Welle und (geladenem) Teilchen ist bis heute noch nicht durch eine übergeordnete, geschlossene Theorie befriedet. Wir wollen in diesem Artikel unter Licht denjenigen Teil des elektromagnetischen Spektrums verstehen, den unsere Augen wahrnehmen können.



## Das elektromagnetische Spektrum

Elektromagnetische Strahlung sind elektromagnetische Wellen, die aus gekoppelten elektrischen und magnetischen Feldern bestehen. Ihr Spektrum erstreckt sich von Längstwellen mit mehreren tausend Kilometern Wellenlänge bis zu höchstfrequenten kosmischen Strahlungen mit weniger als  $10^{-15}$  m ( $10^{-15}$  m = 1 Femtometer) Wellenlänge.

Die Frequenz der elektromagnetischen Strahlung ist über **Gleichung 1** mit ihrer Wellenlänge und der Lichtgeschwindigkeit verbunden.

$$c = \lambda \cdot f$$

mit  $c = 299.792.458 \frac{\text{km}}{\text{s}}$  Lichtgeschwindigkeit

$\lambda$  Wellenlänge in m

$f$  Frequenz in Hertz (Hz)

Gleichung 1

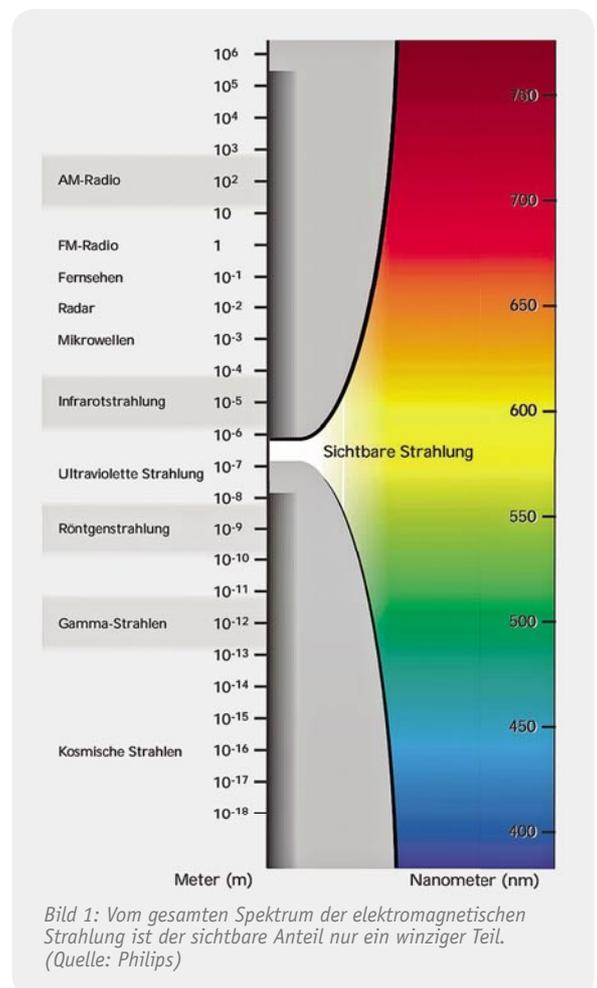
## Das sichtbare Spektrum

Schon Goethe hatte vor 200 Jahren in seiner Farbenlehre gesagt: „Das Licht überliefert das Sichtbare dem Auge, das Auge überliefert's dem ganzen Menschen.“ Damit hatte er voll ins Schwarze getroffen. Denn das Auge ist tatsächlich eine Empfangseinrichtung für elektromagnetische Strahlung, allerdings nur für einen kleinen Ausschnitt daraus – das sichtbare Licht.

Das sichtbare Lichtspektrum (**Bild 1**) beginnt vom Infrarot (Wärmestrahlung) kommend bei einer Wellenlänge von etwa 780 nm und geht bei 380 nm in Ultraviolett über. Mit **Gleichung 1** errechnen sich die zugehörigen Frequenzen zu 384,3 THz bzw. 788,9 THz ( $1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$ ). Ganz exakt lassen sich diese Grenzwerte nicht angeben, weil die Eigenschaften des menschlichen Auges von Mensch zu Mensch variieren.

Die wichtigsten Spektralfarben sind Rot (780–640 nm bzw. 384–468 THz) über Orange (640–600 nm bzw. 468–500 THz), Gelb (600–570 nm bzw. 500–526 THz), Grün (570–490 nm bzw. 526–612 THz), Blau (490–430 nm bzw. 612–697 THz) bis zu Violett (430–380 nm bzw. 697–789 THz).

Das menschliche Auge hat seine maximale Empfindlichkeit beim helladaptierten Sehen (Tagsehen) im Bereich von 555 nm (Gelb-Grün). Dieses Empfindlichkeitsmaximum verschiebt sich mit zunehmender Dunkelheit (Nachtsehen) bis zu 510 nm (Blau), weil dafür



andere Rezeptoren in der Netzhaut ins Spiel kommen. Bild 2 zeigt die auf einen Maximalwert von 1 normierten Empfindlichkeitskurven  $V(\lambda)$  des Auges für Tag- und Nachtsehen. Die nicht normierten Kurven werden auch als photometrisches Strahlungsäquivalent bezeichnet. Ihre Maximalwerte betragen 683 lm/W für Tagsehen und 1699 lm/W für Nachtsehen. Dies muss bei der Bewertung des sichtbaren Lichts berücksichtigt werden und schlägt sich in den fotometrischen Einheiten für den Lichtstrom Lumen (lm) und die Lichtstärke Candela (cd) nieder. Nicht sichtbare Strahlung hingegen wird durch strahlungsphysikalische Einheiten wie Strahlungsdichte (Watt/Sterad) u. a. beschrieben. Wir wollen auf die lichttechnischen Größen im Folgenden genauer eingehen.

### Sterad

Bei der Definition lichttechnischer Größen spielt der Steradian, auch Sterad (srad, sr) genannt, eine wichtige Rolle. Er ist definiert als ein Teil der Oberfläche einer Kugel, dividiert durch das Quadrat des Kugelradius. Der Begriff lässt sich veranschaulichen, wenn wir eine Kugel mit dem Radius  $r$  betrachten. Der Sterad beschreibt nun einen vom Mittelpunkt der Kugel aus gemessenen Raumwinkel, der eine gewisse Fläche  $A$  aus der Kugeloberfläche ausschneidet. Ein Raumwinkel von 1 sr umschließt auf der Oberfläche einer Kugel mit Radius 1 m eine Fläche von 1 m<sup>2</sup>. Weil die Oberfläche dieser Kugel  $4\pi r^2 = 4\pi \text{ m}^2$  beträgt, hat die gesamte Kugel einen Raumwinkel von  $4\pi$  sr. Bild 3 soll dies veranschaulichen. Darin sehen wir eine Kugel mit Radius  $r$ , in welcher der ebene Öffnungswinkel  $\alpha$  einen Konus beschreibt, dessen Kappe die Fläche  $A$  hat.

Der Zusammenhang zwischen dem ebenen Öffnungswinkel  $\alpha$  und dem Raumwinkel  $\Omega$  ist in Gleichung 2 abgeleitet.

#### Definition des Steradian $\Omega$

$$\frac{\Omega}{\text{sr}} = \frac{A}{r^2} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r^2 \left(1 - \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)}{r^2} = 2 \cdot \pi \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)$$

Gleichung 2

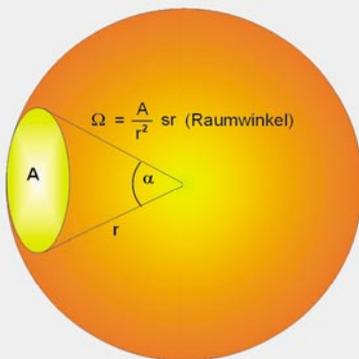


Bild 3: Der Raumwinkel  $\Omega$  ist im Dreidimensionalen das Gegenstück zum ebenen Winkel  $\alpha$ . Er ist der Quotient aus einem Teil einer Kugeloberfläche und dem Radius im Quadrat.

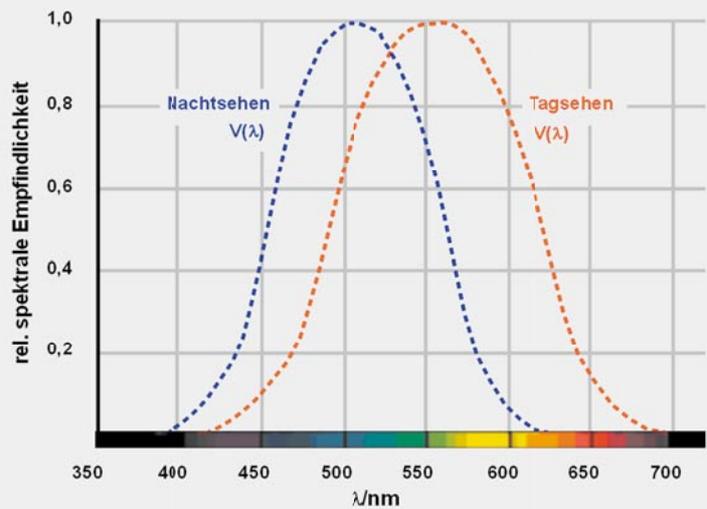


Bild 2: Für Tag- und Nachtsehen kommen beim Auge zwei Arten von Rezeptoren mit unterschiedlicher spektraler Empfindlichkeit zum Einsatz.

In Tabelle 1 sind einige Werte für  $\alpha$  berechnet.

### Lichtstrom, Lumen

Mit der Einheit Sterad (sr) für den Raumwinkel lassen sich die wichtigsten lichttechnischen Größen als physikalische sowie unter Berücksichtigung der Farbempfindlichkeitskurve des Auges als physiologische Größen mit ihren jeweiligen Einheiten beschreiben. Eine Zusammenstellung der wesentlichen Größen zeigt die Tabelle in Bild 4. Dabei muss man wissen, dass bei der höchsten Empfindlichkeit des hellsehenden Auges (555 nm) eine Strahlungsleistung von 1 W einem Lichtstrom von 683 Lumen entspricht. Die Strahlungsleistung bei anderen Wellenlängen ist entsprechend der normierten Empfindlichkeitskurve  $V(\lambda)$  in einen äquivalenten Lichtstrom umzurechnen.

Der Lichtstrom (auch Strahlungsfluss genannt), gemessen in Lumen (lm), ist das physiologische Gegenstück zur physikalischen Strahlungsleistung (gemessen in Watt). Er berücksichtigt die Empfindlichkeitskurve des Auges, die oft mit dem Formelzeichen  $V(\lambda)$  bezeichnet wird und eine Funktion der Wellenlänge ist. Diese wird mit dem spektral verteilten energetischen Lichtstrom  $\Phi_e(\lambda)$  multipliziert und wichtet ihn damit wellenlängenabhängig. So ist die Definitionsgleichung für den gesamten Lichtstrom  $\Phi_v$  über das Sehspektrum plausibel (Gleichung 3). Man beachte, dass die Indizes  $v$  für visuell und  $e$  für energetisch stehen.

$$\Phi_v = K_m \cdot \int_{\lambda=380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \Phi_e(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad \text{visueller Lichtstrom in Lumen (lm)}$$

mit

$$K_m \quad \text{Maximalwert des photometrischen Strahlungsäquivalents}$$

$$\left( K_m = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \text{ für Tagsehen und } K_m = 1699 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \text{ für Nachtsehen} \right)$$

$V(\lambda)$  normierte spektrale Empfindlichkeitsfunktion des menschlichen Auges

Gleichung 3

Für monochromatisches Licht (z. B. eines Lasers) der Wellenlänge  $\lambda_{\text{mono}}$  vereinfacht sich Gleichung 3, weil es jetzt nur noch eine Frequenz zu berücksichtigen gibt. Dadurch wird das Integral überflüssig (Gleichung 4).

$$\Phi_v = K_m \cdot \Phi_e(\lambda_{\text{mono}}) \cdot V(\lambda_{\text{mono}}) \quad \text{visueller Lichtstrom eines Lasers in Lumen (lm)}$$

Gleichung 4

### Lichtstärke, Candela

Die Lichtstärke  $I_v$  ergibt sich gemäß **Gleichung 5** als Quotient aus Lichtstrom  $\Phi_v$  in lm und durchstrahltem Raumwinkel  $\Omega$  in sr (vergl. Bild 3).

$$I_v = \frac{\Phi_v}{\Omega} \quad \text{Lichtstärke in } \frac{\text{lm}}{\text{sr}} = \text{Candela}$$

Gleichung 5

Eine Haushaltskerze gibt näherungsweise ihr Licht gleichmäßig in alle Richtungen des Raums ab (isotroper Strahler). Bei einem Lichtstrom  $\Phi_v$  von ca. 12 lm, verteilt über den vollen Raumwinkel  $4\pi \text{ sr} \approx 12 \text{ sr}$ , ergibt sich nach **Gleichung 5** eine Lichtstärke von ca. 1 lm/sr, was den Begriff Candela (Kerze) erklärt.

Die Lichtstärke ist unabhängig vom Abstand zur Lichtquelle. Sie hängt ausschließlich vom durchstrahlten Raumwinkel ab und berücksichtigt dabei ein unterschiedliches Abstrahlverhalten der Lichtquelle in verschiedene Richtungen. Dieses kann beispielsweise durch einen Reflektor oder eine Bündelungsoptik bewirkt werden.

### Beleuchtungsstärke, Lux

Während die Lichtstärke beschreibt, wie viel Lichtleistung (Lichtstrom) in einen bestimmten Raumwinkel abgestrahlt wird, sagt die Beleuchtungsstärke  $E_v$  aus, wie viel davon auf einer bestimmten Fläche  $A$  ankommt. Sie ist also eine sehr sinnvolle empfangsbezogene Größe, denn es interessiert z. B. weniger, welcher Lichtstrom eine Deckenlampe im Büro verlässt, sondern ob dadurch eine Schreibtischoberfläche gut ausgeleuchtet wird. Das führt zur Definition der Beleuchtungsstärke gemäß **Gleichung 6**.

$$E_v = \frac{\Phi_v}{A} = \frac{I_v \cdot \Omega}{A} = \frac{I_v}{r^2} \quad \text{Beleuchtungsstärke in Lux} = \frac{\text{lm}}{\text{m}^2}$$

Gleichung 6

Die Beleuchtungsstärke  $E_v$  nimmt im Quadrat des Abstands zur Lichtquelle ab, wogegen die Lichtstärke  $I_v$  unabhängig vom Abstand zur Lichtquelle ist.

Um ein gewisses Gefühl für die abstrakte Größe „Beleuchtungsstärke in Lux“ zu entwickeln, sollte man sich die Tabelle in **Bild 5** gut ansehen und einige wichtige Werte einprägen. Damit kann man ungefähr einordnen, welchen Lichtverhältnissen ein bestimmter Lux-Wert entspricht. Die Tabelle macht den gewaltigen Dynamikumfang des menschlichen Auges deutlich.

Es ist anschaulich, dass die Neigung der beleuchteten Oberfläche gegenüber dem einfallenden Licht eine Rolle für deren Beleuchtungsstärke spielt. Am höchsten ist die Beleuchtungsstärke, wenn das Licht senkrecht auf die beleuchtete Fläche auftrifft. Abweichungen vom rechten Winkel führen zu einem Rückgang der Beleuchtungsstärke nach der Kosinusfunktion (**Bild 6**).

Tabelle 1: Berechnung einiger Werte für  $\alpha$

$\alpha$	0	1	10	15	20	30	40	45	50	60	65,54107	90	120	180	360
$\Omega$	0	0,00024	0,0239	0,0538	0,0954	0,2141	0,3789	0,4783	0,5887	0,8418	1,0000	1,8403	3,1416	6,2823	12,566

Physikalische Größe	Physikalische Einheit	Physiologische Größe	Physiologische Einheit
Strahlungsleistung $\Phi_e$	W	Lichtstrom $\Phi_v$	Lumen (lm)
Strahlungsstärke $I_e$	$\frac{W}{\text{sr}}$	Lichtstärke $I_v$	$1 \frac{\text{lm}}{\text{sr}} = 1 \text{ Candela (cd)}$
Bestrahlungsstärke $E_e$	$\frac{W}{\text{cm}^2}$	Beleuchtungsstärke $E_v$	$1 \frac{\text{lm}}{\text{m}^2} = 1 \text{ Lux}$
Emissionsdichte $= \frac{I_e}{\text{cm}^2}$	$\frac{W}{\text{sr} \cdot \text{cm}^2}$	Leuchtdichte $L = \frac{I_v}{\text{m}^2}$	$\frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$

Bild 4: Die wichtigsten energie- und lichttechnischen Größen im Überblick

### Lichtverhältnis

Lichtverhältnis	Beleuchtungsstärke
Bewölkter Nachthimmel ohne Mond und Fremdstern	0,00013 Lux
Mondloser Sternenhimmel	0,0005 Lux
Klare Vollmondnacht	0,2 Lux
Kerze im Dunkeln, ca. 1 Meter entfernt	1 Lux
Straßenbeleuchtung	10 Lux
Treppenhausbeleuchtung	100 Lux
Wohnzimmerbeleuchtung	300 Lux
Bürobeleuchtung	500 Lux
TV-Studiobeleuchtung	1.000 Lux
Bedeckter Wintertag	3.000 Lux
Bedeckter Sommertag, Operationssaal	10.000 Lux
Mittagssonne im Sommer	100.000 Lux

Bild 5: Einige Beispiele für Beleuchtungsstärken sollte man sich einprägen, um ein Gefühl für diese Größe zu entwickeln.

Bei Luxmetern ist deshalb oft ein Kosinuskorrelator vor dem Messsensor angebracht, um die Winkelabhängigkeit einer Messung zu reduzieren.

Um die durchschnittliche Beleuchtungsstärke in einem Raum zu ermitteln, muss seine Grundfläche in mehrere gleich große, möglichst quadratische Gebiete eingeteilt werden. Dann wird die Beleuchtungsstärke in der Mitte jedes Quadrats gemessen und der Durchschnitt der Ergebnisse ermittelt. Die Mindestzahl an Gebieten bestimmt die Genauigkeit der Messung. Sie wird über die Zahl  $n$  gemäß **Gleichung 7** und der darin enthaltenen Tabelle berechnet (Quelle: Benning GmbH & Co. KG, Bocholt).

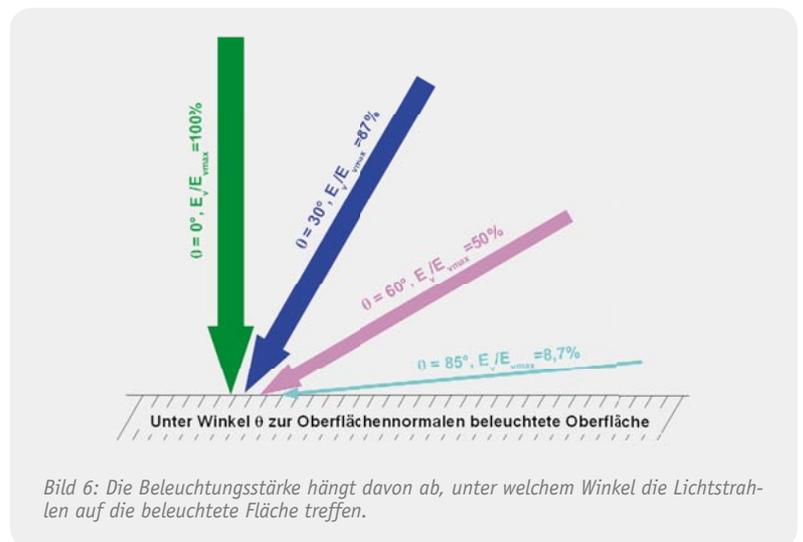


Bild 6: Die Beleuchtungsstärke hängt davon ab, unter welchem Winkel die Lichtstrahlen auf die beleuchtete Fläche treffen.

Beispiel: Für einen Raum mit den Grundmaßen 5 x 6 m und einem Abstand zwischen Mess- und Leuchtmittellebene von 1,8 m berechnet sich  $n$  zu 1,5. Daraus folgt, dass für eine 5%ige Genauigkeit der gemittelten Beleuchtungsstärke an 18 Stellen gemessen werden muss.

$$n = \frac{L \cdot B}{(L + B) \cdot H_m}$$

$L, B$ : Länge und Breite des Raums in m,  
 $H_m$ : Abstand der Leuchtmittellebene über der Messebene in m

$n$	min. Messstellenanzahl für 5% Genauigkeit	min. Messstellenanzahl für 10% Genauigkeit
$n < 1$	8	4
$1 \leq n < 2$	18	9
$2 \leq n < 3$	32	16
$n > 3$	50	25

Gleichung 7

## Leuchtdichte

Reale Lichtquellen sind nicht punktförmig, sondern haben eine gewisse Ausdehnung (Bild 7). Die vollständige, in eine Richtung ausgesandte Lichtstärke ist dann die Summe der Beiträge der einzelnen Flächenelemente der Lichtquelle. Für jedes dieser Flächenelemente kann man nun die sogenannte Leuchtdichte angeben (Gleichung 8). Dabei ist  $dA' = dA \cos(\alpha)$  die scheinbar leuchtende Fläche, weil sie senkrecht zu den Sehstrahlen steht.

$$L(dA) = \frac{dI_v}{dA \cdot \cos(\alpha)} \quad \text{Leuchtdichtebeitrag eines Flächenelements auf der Glühlampenoberfläche}$$

Gleichung 8

Werden alle Leuchtdichtebeiträge im für den Beobachtersichtbaren Bereich der Glühlampe aufintegriert, erhält man deren gesamte Leuchtdichte.

Wenn die Leuchtdichte eines Strahlers vom Betrachtungswinkel unabhängig sein soll, muss die Lichtstärke (wie an Gleichung 8 zu sehen) eine kosinusförmige Abhängigkeit vom Blickwinkel haben (Gleichung 9). Ein derartiger Strahler (Lambert-Strahler) ist z. B. eine von hinten beleuchtete Milchglasscheibe, die das durchgeleitete Licht vollkommen diffus streut.

$$I_v(\alpha) = I_{vmax} \cdot \cos(\alpha) \quad \text{Lichtstärkenabhängigkeit eines Lambert-Strahlers vom Betrachtungswinkel}$$

Gleichung 9

Das Strahlungsverhalten eines Lambert-Strahlers zeigt Bild 8. Der gesamte Lichtstrom eines Lambert-Strahlers ergibt sich durch Integration der Lichtstärke über den vor ihm liegenden Raum zu  $\Phi_v = \pi I_{vmax}$ .

Die Leuchtdichte ist ein Maß für die Helligkeit einer Lichtquelle. Dem Auge scheint eine konzentrierte Lichtquelle (Leuchtdiode) heller als eine ausgedehnte (Glühlampe), auch wenn beide die gleiche Lichtstärke haben. Damit beide Lichtquellen den gleichen Helligkeitseindruck erzeugen, muss deren Lichtstärke erst auf die Licht emittierende Fläche bezogen werden und dabei zu einem gleichen Wert führen. Wie schon gesagt, ist die Leuchtdichte  $L$  der Quotient aus Lichtstärke und ausstrahlender Fläche (Gleichung 10).

$$L = \frac{I_v}{A} \quad \text{Leuchtdichte in } \frac{cd}{m^2}$$

$A$  ist die Fläche, die den Lichtstrom in einen Raumwinkel emittiert (Lichtstärke)

Gleichung 10

Strahler mit gleicher Leuchtdichte emittieren den gleichen Lichtstrom aus einem gleich großen Teil ihrer Oberfläche (oder einen doppelt so großen Lichtstrom aus einer doppelt so großen Fläche) und werden deshalb als gleich hell empfunden.

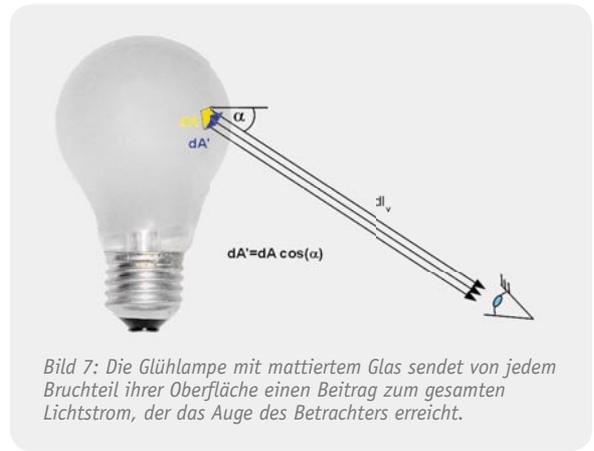


Bild 7: Die Glühlampe mit mattiertem Glas sendet von jedem Bruchteil ihrer Oberfläche einen Beitrag zum gesamten Lichtstrom, der das Auge des Betrachters erreicht.

Ein Beispiel: Die Helligkeit eines Monitor-Displays mit einer Fläche von 0,25 m<sup>2</sup> wird mit 1000 cd/m<sup>2</sup> angegeben. Das Display strahlt demnach mit 250 Candela in den Raum. Ein Display mit der doppelten Fläche müsste also mit der doppelten Candelazahl abstrahlen, um ein gleich helles Bild zu haben.

Die Tabelle in Bild 9 gibt einen Überblick über verschiedene Lichtquellen und ihre Leuchtdichten.

An einem weiteren Beispiel wollen wir unser Verständnis vertiefen. Die Sonne emittiert mit einer Fläche von  $A = \pi D^2/4$  in Richtung Erde. Die Sonne hat einen Durchmesser von  $D = 1,4$  Mio. km und „zeigt“

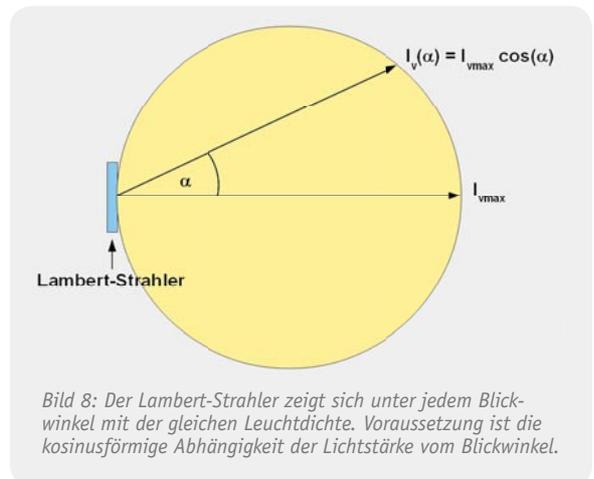


Bild 8: Der Lambert-Strahler zeigt sich unter jedem Blickwinkel mit der gleichen Leuchtdichte. Voraussetzung ist die kosinusförmige Abhängigkeit der Lichtstärke vom Blickwinkel.

Lichtquelle	Leuchtdichte
Nachthimmel	0,01 $\frac{cd}{m^2}$
Vollmond, klare Nacht	3.000 $\frac{cd}{m^2}$
Kerzenflamme	5.000 $\frac{cd}{m^2}$
Blauer Himmel, mittags	8.000 $\frac{cd}{m^2}$
Glühlampe matt, 100 W	200.000 $\frac{cd}{m^2}$
Glühlampe klar, 100 W	10.000.000 $\frac{cd}{m^2}$
Sonne im Zenit, klarer Himmel	1.000.000.000 $\frac{cd}{m^2}$

Bild 9: Die Leuchtdichte beschreibt, wie hell wir eine Lichtquelle empfinden.

uns eine Fläche von  $A = 1,5394 \times 10^{12} \text{ km}^2$ . Bei senkrechter Einstrahlung und klarem Himmel beträgt die Beleuchtungsstärke 100.000 Lux (vergl. Bild 5). Die restliche Rechnung demonstriert Gleichung 11:

$$L = \frac{I_v}{A} = \frac{E_v \cdot r^2}{A} = \frac{100.000 \text{ Lux} \cdot (150 \cdot 10^6 \text{ km})^2}{1,5394 \cdot 10^{12} \text{ km}^2} = 1,462 \cdot 10^6 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2} = 146.200 \frac{\text{cd}}{\text{cm}^2}$$

Gleichung 11

Dieser Wert stimmt recht gut mit dem in Bild 5 mit  $100.000 \text{ cd/m}^2$  angegebenen überein, denn bei unserer Rechnung haben wir keinerlei Dämpfung des Sonnenlichts im interstellaren Raum und durch die Erdatmosphäre angenommen, wodurch der berechnete Wert etwas höher ausfällt.

In Bild 10 ist der Unterschied zwischen Beleuchtung und Leuchtdichte noch einmal veranschaulicht. Die Beleuchtung beschreibt die Lichtverhältnisse am bestrahlten Objekt, die Leuchtdichte die Strahlungsstärke der Lichtquelle bezogen auf ihre emittierende Fläche.

Bild 11 belegt qualitativ, dass der Helligkeitseindruck von der Leuchtdichte abhängt. Wir sehen hier eine Energiesparlampe mit 12 W Leistungsaufnahme (links) und eine LED mit etwa 70 mW (rechts). Obwohl die LED nur ein knappes Prozent der Leistung der Energiesparlampe aufnimmt, kann sie beim Helligkeitseindruck mithalten, weil sie ihren vergleichsweise schwachen Lichtstrom über eine kleine Fläche aussendet. Ein weiteres Beispiel sind Laser-Pointer (Lichtzeiger für Vorträge) der Klasse 2 mit maximal 1 mW Strahlungsleistung. Diese wird als Licht aus einer winzigen Emissionsfläche abgestrahlt. Durch den extrem kleinen Öffnungswinkel des Strahls können wir den Laser-Lichtpunkt mit seinem rund 5 mm Durchmesser trotz der geringen Abstrahlleistung noch in einigen Metern Entfernung gut sehen. Dividiert man die Leistung durch die Lichtpunktfläche, erhält man eine Leistungsflussdichte der Strahlung von ca.  $50 \text{ W/m}^2$ .

### Leuchtkraft und Leistungsaufnahme

Für die Charakterisierung der Leuchtkraft einer Lichtquelle ist es erforderlich, das gesamte Spektrum der von ihr emittierten sichtbaren Strahlung zu berücksichtigen. Nicht sichtbare Spektralanteile im Lichtstrom tragen nichts zur Leuchtkraft bei, erfordern gleichwohl Energie zu ihrer Erzeugung.

Ein Beispiel für eine besonders unwirtschaftliche Verwertung der Speiseenergie ist die klassische Glühlampe. Sie wandelt den Löwenanteil (ca. 95 %) davon in Wärmestrahlung, also nicht sichtbares Licht, das einen Wärmeindruck auf unserer Haut erzeugt. Nur ca. 5 % strahlt sie im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts aus und regt damit die Rezeptoren in der Netzhaut des Auges an. Die Lichtausbeute  $\eta$  als Quotient aus Lichtstrom  $\Phi_v$  und eingesetzter elektrischer Leistung  $P_e$  beschreibt die Effizienz des Leuchtmittels (Gleichung 12).

$$\Phi_v = \eta \cdot P_e \quad \text{Lichtstrom in Lumen}$$

mit  $\eta$ : Lichtausbeute in Candela =  $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$

$P_e$ : Aufgenommene Leistung in W

Gleichung 12

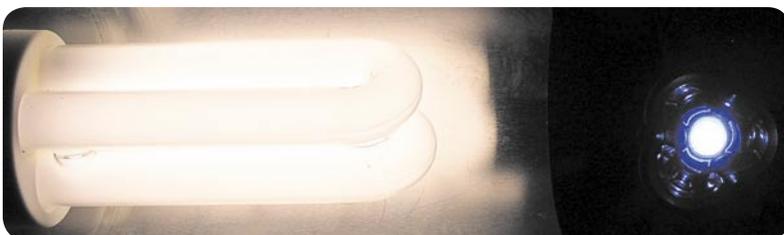


Bild 11: Obwohl die Leuchtdiode nur ein Prozent der Lichtstärke einer Glühlampe hat, erscheint sie uns heller als eine Energiesparlampe.

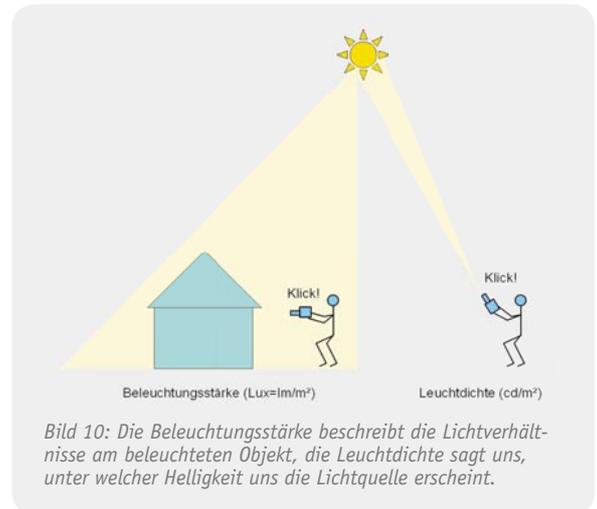


Bild 10: Die Beleuchtungsstärke beschreibt die Lichtverhältnisse am beleuchteten Objekt, die Leuchtdichte sagt uns, unter welcher Helligkeit uns die Lichtquelle erscheint.

Es ist also nicht sinnvoll, die aufgenommene Leistung eines Leuchtmittels in Watt (W) als Maß für seine Helligkeit heranzuziehen, sondern den von ihm abgegebenen Lichtstrom in Lumen (lm). Darin sind der Wirkungsgrad des Leuchtmittels und der visuelle Eindruck des menschlichen Beobachters berücksichtigt.

### ANSI-Lumen

Zur objektiven Beschreibung des Lichtstroms einer Lampe für Projektoren wurde vom American National Standards Institute (ANSI) in der Norm IT7.227-1998 ein Verfahren angegeben, dessen Ergebnis den ANSI-Lumen-Wert des Leuchtmittels liefert. Die 2003 zurückgezogene Norm wird durch die Europeanorm EN 61947-1, Teil 1 in Zusammenhang mit der Norm IEC 61966-6 der International Electrotechnical Commission (IEC) und der DIN EN 61966, Teil 6 ersetzt. Dennoch hat sich der Begriff „ANSI-Lumen“ erhalten.

Das in der DIN 19045, Teil 8 genau beschriebene Verfahren teilt die Projektionsfläche in neun Felder ein, in deren Mitte die jeweilige Beleuchtungsstärke mit einem Lux-Meter gemessen wird (Bild 12).

Aus den neun Messwerten wird der Mittelwert gebildet. Dieser hängt von der Größe der Projektionsfläche ab. Den davon unabhängigen Lumen-Wert als gesamten vom Leuchtmittel ausgehenden Lichtstrom erhält man durch Multiplikation der Projektionsfläche mit dem Lux-Mittelwert. Der ANSI-Lumen-Wert hat den Vorteil, etwas über die tatsächlich an der Leinwand ankommende Lichtstrahlung auszusagen. So sind qualitätsmindernde Einflüsse von Projektoroptik, Lampe und Spiegel eliminiert. Natürlich gibt dieser ANSI-Lumen-Wert keine Auskunft über die Homogenität der Ausleuchtung des Projektionsfeldes. **ELV**

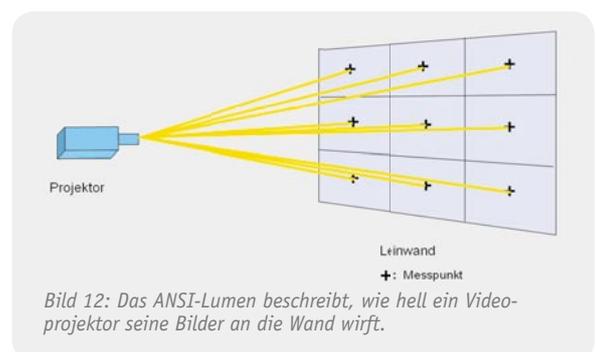


Bild 12: Das ANSI-Lumen beschreibt, wie hell ein Videoprojektor seine Bilder an die Wand wirft.