

Licht- und Strahlungseinheiten

Um Licht bzw. Farbe messen zu können, werden physikalische Einheiten benötigt. Dieses Kapitel behandelt radiometrische und photometrische Einheiten sowie Materialeigenschaften. Mit radiometrisch werden Einheiten bezeichnet, die sich auf die gesamte elektromagnetische Strahlung beziehen, mit photometrisch die Einheiten, die sich nur auf die sichtbaren Anteile dieser Strahlung beziehen (also auf das Licht). Es muss aber auch erwähnt werden, dass die Begriffe, Bezeichnungen und Notationen in der Literatur und in der Praxis sehr uneinheitlich sind, teilweise inkonsistent und verwirrend.

1. Radiometrische Einheiten

Radiometrische Einheiten messen die gesamte elektromagnetische Strahlung (inkl. UV, IR)

Der *Strahlungsfluss* (radiant flux) wird auch *Strahlungsleistung* (radiant power) genannt und ist ein Energiemaß der elektromagnetischen Strahlung eines Lichtstrahls pro Zeiteinheit, dies ist die Energie(-menge), die von einem Punkt zu einem anderen fließt. Einheit: [**Watt**]; Notation: Φ_R



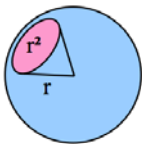
Die *Einstrahlung* (irradiance) \bar{W} gibt an, wieviel Energie auf eine Flächeneinheit fällt. Einheit: [Watt / m²]; Notation: \bar{W}

$$\bar{W} = \frac{\text{radiant flux}}{\text{area}} = \frac{d\phi_R}{dA}$$

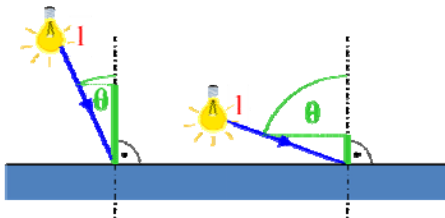


Die *spektrale Einstrahlung* (spectral irradiance) ist die Einstrahlung pro Wellenlängen-Intervall, d.h. die Einstrahlung einer bestimmten Wellenlänge. Notation: $W(\lambda)$

$$\bar{W} = \int_0^{\infty} W(\lambda) d\lambda$$



[Einschub: *Steradian sr* (steradian) ist die Einheit für den Raumwinkel. Ein sr ist der Raumwinkel, den eine Fläche der Größe 1 auf der Einheitskugel bewirkt. Da die Kugeloberfläche $4\pi r^2$ ist, beträgt der gesamte Raumwinkel somit 4π sr]



[Einschub: Das *Lambert'sche Gesetz* besagt, wenn Licht auf eine Oberfläche mit einem bestimmten Winkel eintrifft, dann ist der Wirkungsgrad proportional zum Cosinus des Winkels zwischen Lichteinfall und der Oberflächennormalen. Daher ist der Einfluß auf einer Fläche oder auch von einer Fläche proportional zum Cosinus zwischen Lichtrichtung und der Oberflächennormalen.]

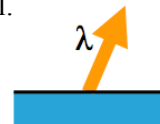
Die *Abstrahlung* (radiance) von einer Oberfläche misst den gesamten Strahlungsfluss für alle Wellenlängen pro Steradian. Einheit: [Watt / m² / sr]

$$\bar{P} = \frac{\text{radiant flux per steradian}}{\text{perceived area}} = \frac{1}{\cos \theta} \cdot \frac{d^2 \phi_R}{dA d\Omega}$$



Die *spektrale Abstrahlung* (spectral radiance) ist die Abstrahlung pro Wellenlängen-Intervall. Notation: $P(\lambda)$

$$\bar{P} = \int_0^{\infty} P(\lambda) d\lambda$$



2. Photometrische Einheiten

Photometrische Einheiten messen die sichtbare elektromagnetische Strahlung (exkl. UV, IR)

Der *Lichtfluss* (luminous flux) (auch Leuchtleistung oder Lichtstrom) ist ein Maß für die Zahl der Photonen im Licht. Mit anderen Worten entspricht der Lichtfluss der Leuchtleistung (Helligkeit) des Strahlungsflusses für sichtbares Licht. Die Maßeinheit ist das Lumen [lm]; Notation: Φ_L

Die *Leuchtdichte* (luminance) ist eine Maß für den gesamten abgestrahlten Lichtfluss in eine bestimmte Richtung (Winkel) und der dadurch aus dieser Richtung sichtbar ist. Einheit: $\text{cd}/\text{m}^2 = \text{candela pro m}^2$ ($\text{cd}=\text{lm}/\text{sr}$); Notation: \bar{L}

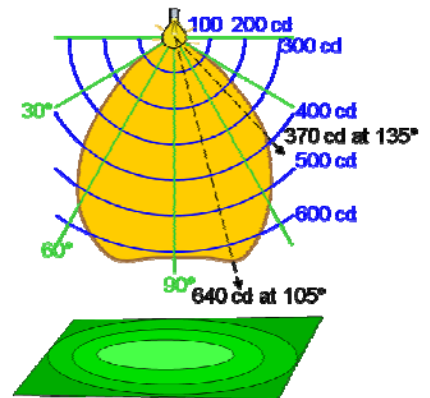
$$L = \frac{\text{luminous_flux_per_steradian}}{\text{perceived_area}} = \frac{1}{\cos \theta} \cdot \frac{d^2 \phi_L}{dA d\Omega}$$

Die *spektrale Leuchtdichte* (spectral luminance) ist die Leuchtdichte pro Wellenlänge.

$$\bar{L} = \int_0^\infty L(\lambda) d\lambda$$

Candela, Lumen, Lux

Candela ($\text{cd} = \text{lm} / \text{sr}$) ist das Maß für Leucht-Intensität (in eine Richtung). Ursprünglich galt die Helligkeit einer Kerze als Candela, doch später wurde exakter die Helligkeit, die eine monochrome Lichtquelle mit 540 THz (555 nm in Luft) mit 1/683 W/sr abstrahlt, als ein Candela definiert. 1 Candela entspricht der Emission von 1 cm^2 Platin genau am Schmelzpunkt (2045°K). In der Abbildung entspricht das der braunen Kurve.



Lumen ($\text{lm} = \text{cd} \cdot \text{sr}$) ist das Maß für Lichtfluss (aus einer Quelle) und gibt an, wieviel Licht eine Lampe insgesamt ausstrahlt. In der Abbildung entspricht das der gelben Fläche.

Lux ($\text{lx} = \text{lm} / \text{m}^2$) ist das Maß für Beleuchtung, misst das Licht, das auf eine Einheitsfläche trifft. In der Abbildung entspricht das der grünen Fläche.

Lichtausbeute

Die *Lichtausbeute* (luminous efficiency) ist die Lichteffizienz einer Lampe, also das Verhältnis von Leuchtdichte zu Abstrahlung („wieviel Prozent der abgestrahlten Energie sieht man?“ oder auch „wieviel Watt Licht bekomme ich aus wieviel Watt Strom?“)

$$\sigma = \frac{\bar{L}}{P}$$

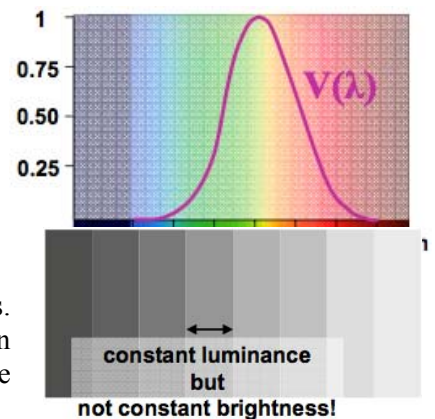
Die *spektrale Lichtausbeute* (spectral luminous efficiency) ist das Verhältnis von spektraler Leuchtdichte (spectral luminance) zur spektralen Abstrahlung (spectral radiance).

$$\sigma(\lambda) = \frac{L(\lambda)}{P(\lambda)}$$

Die Funktion $P(\lambda)$ beschreibt dabei, welchen Helligkeitswirkungsgrad jede Wellenlänge λ hat. Aus dieser lässt sich die *relative spektrale Lichtausbeute* $V(\lambda)$ (auch *Helligkeits-Sensitivitätskurve* bzw. *luminous sensitivity*, siehe Abb.) des Menschen berechnen, indem man $P(\lambda)$ durch ihren Maximalwert dividiert, also auf $\text{max}=1$ skaliert. Entsprechend des für den Menschen visuell wahrnehmbaren Bereiches der elektromagnetischen Strahlung ergibt sich natürlich:

- $\lambda < 400 \text{ nm}$: 0 Ausbeute
- $\lambda = 555 \text{ nm}$: max. Ausbeute, höchste Empfindlichkeit
- $\lambda > 780 \text{ nm}$: 0 Ausbeute

Gemäß Definition produziert ein Strahlungsfluss von 1W bei 555 nm genau 683 lm. Die spektrale Lichtausbeute einer Lichtquelle mit einer Wellenlänge λ ist daher $\sigma(\lambda) = 683 V(\lambda) \text{ lm}/\text{W}$.



Die *Helligkeit* (brightness), auch *Leuchtwirkung* genannt, ist die subjektiv *empfundene* Helligkeit und Wirkung des Lichts. Dieser Begriff unterscheidet sich von der tatsächlichen Helligkeit (Lichtfluss) oft stark, man denke an diverse optische Täuschungen oder an den Mach-Band-Effekt.

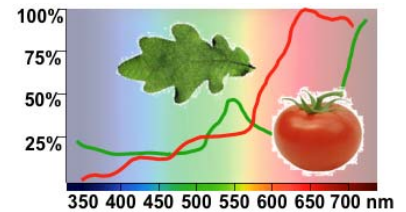
3. Material-Eigenschaften

Die *Reflexion* (reflectance) $\bar{\rho}$ eines diffusen Objektes ist das Verhältnis von Abstrahlung (gesamter reflektierter Strahlungsfluss in alle Richtungen) und Einstrahlung (gesamter einfallender Strahlungsfluss auf dem Objekt). Jedes Objekt absorbiert Licht, daher gilt $0 < \bar{\rho} < 1$.

Die *spektrale Reflexion* (spectral reflectance) $\rho(\lambda)$ ist die Reflexion pro

Wellenlänge. $\bar{\rho} = \int_0^{\infty} \rho(\lambda) d\lambda$

Die spektrale Reflexionskurve (auch *Reflexionsspektrum*) eines Materials bestimmt die Farbe eines Objektes. Kombiniert mit der Farbe des Lichts ergibt sich die Farbe der Reflexion.

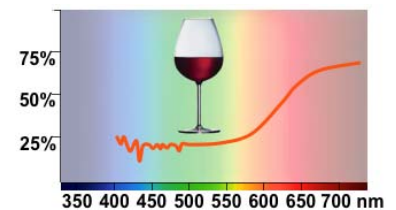


Der *Durchlässigkeitsgrad* (transmittance) $\bar{\tau}$ von transparenten Objekten ist das Verhältnis von Ausstrahlung (gesamter durchgelassener Strahlungsfluss des Objektes) zu Einstrahlung (gesamter einfallender Strahlungsfluss auf das Objekt). $\bar{\tau}$ beschreibt also, wieviel Prozent des einfallenden Lichtes bei einem transparenten Objekt hinten wieder herauskommt ($0 \leq \bar{\tau} < 1$).

Der *spektrale Durchlässigkeitsgrad* (spectral transmittance) $\tau(\lambda)$ ist der

Durchlässigkeitsgrad pro Wellenlänge. $\bar{\tau} = \int_{-\infty}^{\infty} \tau(\lambda) d\lambda$

Das *Transmittanzspektrum* (transmittance spectrum) beschreibt die Farbe eines transparenten Objektes.



Wenn man diese Begriffe explizit auf das sichtbare Licht einschränkt, so erhält man:

Die *Lichtreflexion* R und der *Lichtdurchlässigkeitsgrad* T (luminous reflectance, luminous transmittance) können mit einer Standard-Illuminante gemessen werden.

Die *spektrale Lichtreflexion* $R(\lambda)$ und der *spektrale Lichtdurchlässigkeitsgrad* $T(\lambda)$ (spectral luminous reflectance, spectral luminous transmittance) beschreiben diese Eigenschaften pro Wellenlänge.