Hilfsblätter zur „Beleuchtungstechnik“

Empfohlene Literatur:

1. Beleuchtungstechnik für Praktiker
   von: Hans R. Ris — VDE-Verlag GMBH — ISBN 3-8007-2163-5
2. Beleuchtungstechnik, Grundlagen
   von: Roland Baer — Verlag Technik Berlin — ISBN 3-341-01115-3
3. Licht und Beleuchtung
   von: Hans-Jürgen Hentschel — Hüthig-Verlag — ISBN 3-7785-0734-6
4. Beleuchtungstechnik, Grundlagen
   von: Bruno Weis — Plaum Verl. München — ISBN 3-7905-0728-8
5. Moderne Beleuchtungssysteme
   von: Wilhelm Gerster — Compact-Verlag — ISBN 3-8174-2395-0
6. Handbuch der Beleuchtungstechnik für Film und Fernsehen
   von: Gerald Millerson — Fachbuchverl. A. Reil — ISBN 3-3932972-81-3
7. Lichttechnik – Systeme der Bühnen und Studiobeleuchtung
   von: Norbert Ackermann — Oldenbourg Verlag — ISBN 3-486-27042-7

Die empfohlene Literatur ist in der Bibliothek der FH vorhanden. Die Literaturangaben 1 und 2 unterstützen besonders die Vorlesung „Beleuchtungstechnik“.

Inhalt

1.	**Grundlagen**	**1**
1.1	Einleitung	1
1.2	Lichttechnische Grundlagen	3
1.3	Optische Grundgesetze	13
1.4	Licht und Farbe	16
1.5	Physiologische und psychologische Grundlagen	25
2.	**Lichttechnische Berechnungen und Messungen**	**29**
2.1	Berechnungen nach der Lichtstrommethode	29
2.2	Berechnungen nach der Lichtstärkemethode	31
2.3	Lichttechnische Messungen	37
3.	**Lampen**	**46**
3.1	Übersicht über die Lampensysteme	46
3.2	Temperaturstrahler	47
3.3	Niederdruck-Entladungslampen	53
3.4	Hochdruck-Entladungslampen	64
3.5	Helligkeitssteuerung	67
3.6	Leuchtdioden	70
4.	**Leuchten**	**79**
4.1	Materialeigenschaften	79
4.2	Leuchtenspezifikationen	81
4.3	Leuchtentypen	84
5.	**Beleuchtungssysteme im Innenraum**	**86**
5.1	Beleuchtungsplanung	86
5.2	Projektierung von Innenraumanlagen	87
5.3	Ausführung von Innenraumanlagen	95

1. Grundlagen

1.1 Einleitung

Künstliche Lichtquellen bis 1800:

- Kienspan, Kerze, Öle und Fette als Lichtquelle.

Zeit der Lichterzeugungstechnik (1800 - 1925):

- ca. 1800 Erfindung der Petroleumlampe,
- Gasbeleuchtung wurde mit der Erfindung des Glühstrumpfes 1886 wesentlich verbessert,
- Prinzip der elektrischen Glühlampe durch Heinrich Goebel 1854,
- Praktische Anwendung der Glühlampe 1881 durch Thomas Edison, ab 1889 industrielle Fertigung.

Zeit der Beleuchtungsstärketechnik (1925 - 1950):

- Güteanforderungen werden gestellt, neben den physikalischen sind auch physiologische und psychologische Kenntnisse für die Lichttechnik notwendig,
- 1932 - - - Quecksilberdampf-Hochdrucklampen und Natriumdampf-Niederdrucklampen,
- 1938 - - - Leuchtstofflampen.

Zeit der Leuchtdichtetechnik (ab 1950):

Beleuchtungsanlagen werden auf der Basis der Leuchtdichte geplant und berechnet,

- 1958 - - - Halogenglühlampen,
- 1964 - - - Halogen-Metalldampflampen,
- 1965 - - - Natriumdampf-Hochdrucklampen,
- 1980 - - - Kompakt-Leuchtstofflampen,
- 2000 - - - Leuchtdioden.

BR Deutschland	9 %	Niederlande	18 %	Frankreich	11 %
Schweiz	8 %	Japan	13 %	USA	20 %

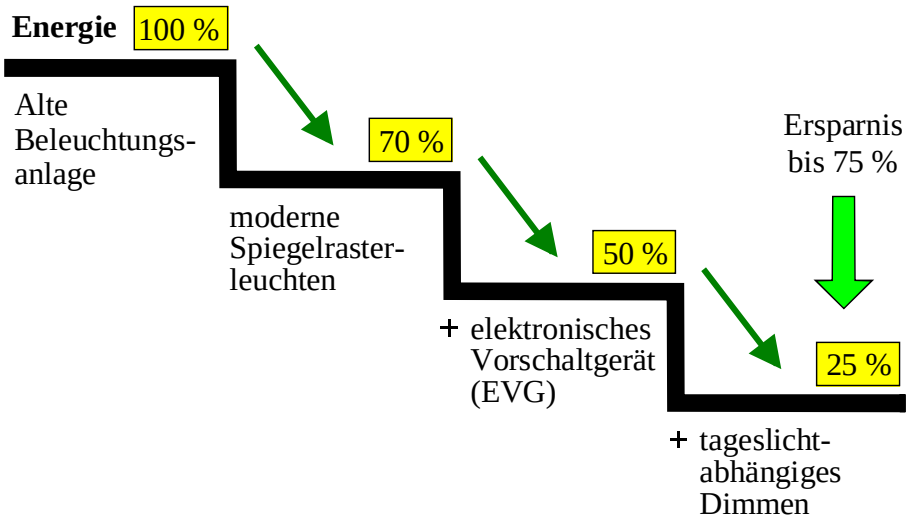
Anteil des Verbrauchs an Elektroenergie für die Beleuchtung am Gesamtelektroenergieverbrauch 1980

Lampentyp	Energieverbrauch	Lichterzeugung
Glühlampen	$14 \cdot 10^6$ MWh	$180 \cdot 10^6$ Mlm · h
Entladungslampen	$30 \cdot 10^6$ MWh	$2300 \cdot 10^6$ Mlm · h

Jährlicher Energieverbrauch für Beleuchtungszwecke 1991

83	84	87	86	89	79	76	78	77	71
2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017

Energieverbrauch für Beleuchtung in TWh der BRD



Energieeinsparung bei Beleuchtungsanlagen

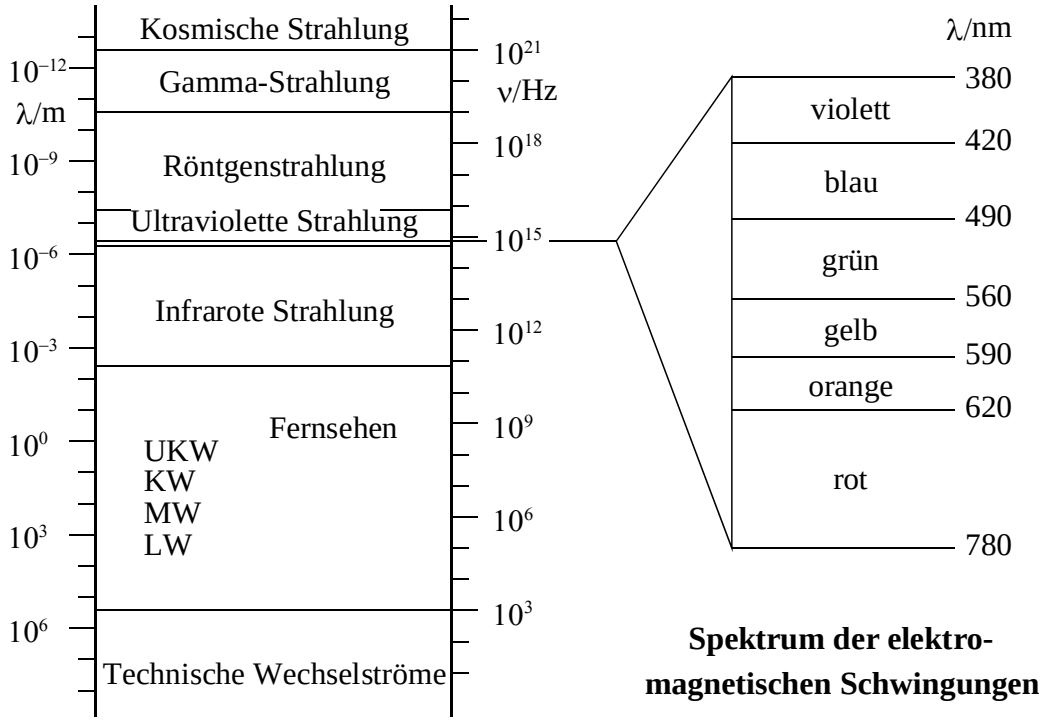
Die stärkere Beachtung des ökologischen Aspekts bei der Stromnutzung und der notwendige Sparzwang führen zum Einsatz energiesparender Beleuchtungstechnik. Energiesparende Beleuchtungstechnik ist nicht nur allein durch den Einsatz von Lampen hoher Lichtausbeute gegeben, hochwertige Spiegelrasterleuchten, elektronische Vorschaltgeräte und Konstantlicht-regelung gehören als wesentliche Maßnahme ebenso hierzu.

1.2 Lichttechnische Grundlagen

Die elektromagnetische Strahlung, die im Auge eine Helligkeitsempfindung hervorruft, bezeichnet man als Licht. Die Lichtquanten haben entsprechend ihrer Frequenz ν die Energie:

$$E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} \qquad (1.1)$$

$h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ Ws^2 Plancksches Wirkungsquantum, ν Frequenz,
$c = 2{,}998 \cdot 10^{8}$ m/s Lichtgeschwindigkeit, λ Wellenlänge.



Spektrum der elektro-magnetischen Schwingungen

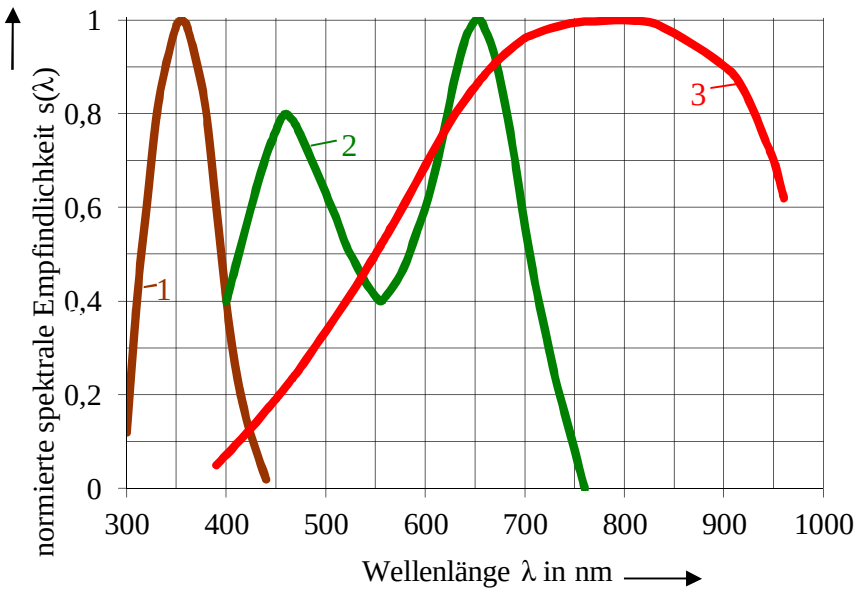
Im Allgemeinen sind im Licht verschiedene Wellenlängen enthalten. Die Verteilung der Strahlung auf die einzelnen Wellengebiete nennt man Spektrum. Das sichtbare Licht liegt im Spektrum der elektromagnetischen Schwingungen zwischen der ultravioletten Strahlung (UV) und der infraroten Strahlung (IR). Die UV-Strahlung wird unterteilt in die Bereiche UV-C (100 nm ... 280 nm), UV-B (280 nm ... 315 nm) und UV-A (315 nm ... 380 nm). Die IR-Strahlung wird unterteilt in die Bereiche IR-A (780 nm ... 1400 nm), IR-B (1400 nm ... 3000 nm) und IR-C (3 µm ... 1000 µm).

Aus der spektralen Strahlungsgröße $X_{e\lambda}$ eines bestimmten Wellenlängenbereiches lässt sich nach Gl. 1.2 die integrale Strahlungsgröße X_e bestimmen.

$$X_e = \int_{\lambda_u}^{\lambda_o} X_{e\lambda} \cdot d\lambda \qquad (1.2)$$

λ_o = obere Wellenlängengrenze λ_u = untere Wellenlängengrenze

Die einzelnen Strahlungsbereiche haben unterschiedliche Wechselwirkungen mit der Materie (Hellempfindung des Auges (sichtbares Licht), Bräunung der Haut (UV-A-Strahlung), Oberflächenerwärmung (IR-A-Strahlung), Filmempfindlichkeit).



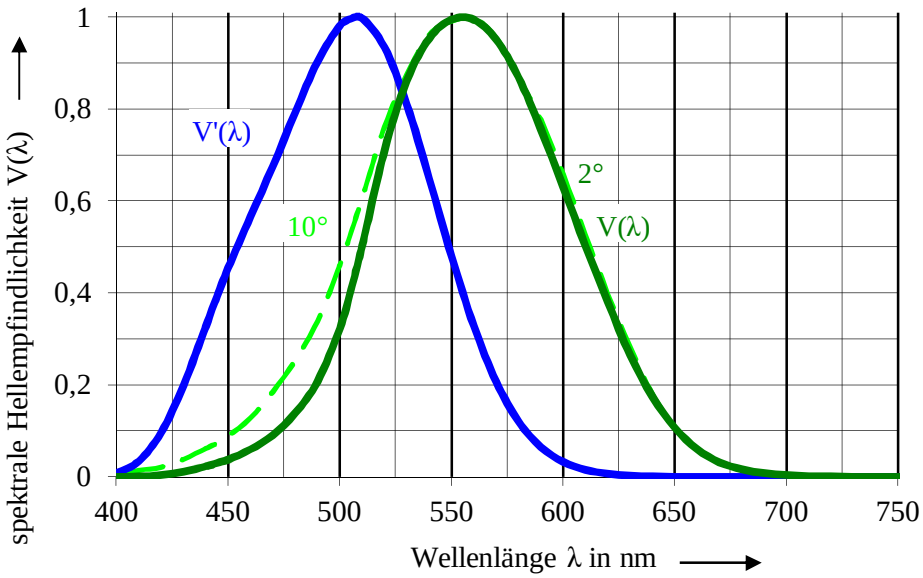
1 - Hautbräunung
2 - Fotosynthese
3 - Fotoeffekt in Silizium

Spektrale Empfindlichkeit verschiedener Prozesse

Die Wirkung der Strahlung erhält man, indem die spektrale Größe mit der spektralen Wirksamkeit s(λ) bewertet wird.

$$X = \int s(\lambda) \cdot X_{e\lambda} \cdot d\lambda \qquad (1.3)$$

Eine besondere Bedeutung für die Beleuchtungstechnik hat die spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges, die sogenannte V(λ)-Kurve. Die V(λ)-Kurve des helladaptierten Auges gilt für Adaptionsleuchtdichten L > 30 cd/m^2. Im blaugrünen Bereich besteht ein Unterschied zwischen dem 2°- und dem 10°-Gesichtsfeld (Tagsehen). Die V'(λ)-Kurve des dunkeladaptierten Auges gilt für Adaptionsleuchtdichten L < 0,01 cd/m^2 (Nachtsehen).



Hellempfindlichkeitskurven des menschlichen Auges nach DIN 5031

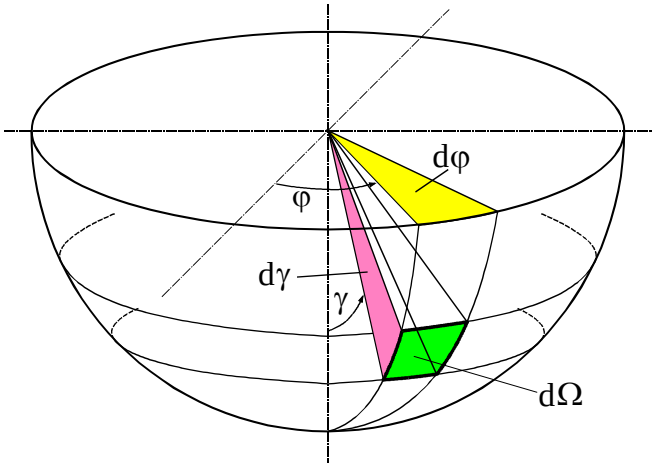
Raumwinkel und Raumwinkelprojektionen

Der Raumwinkel Ω ist als Quotient eines Teils der Kugeloberfläche A_K zum Quadrat des Kugelradius definiert.

$$d\Omega = \frac{dA_K}{r^2} \cdot \Omega_0 \tag{1.4}$$

Der Raumwinkel hat die Einheit Steradiant (sr). Ω_0 ist der Einheitsraumwinkel 1 sr. In polarer Darstellung kann man den Raumwinkel aus dem Meridianwinkel φ und dem Breitenwinkel γ berechnen:

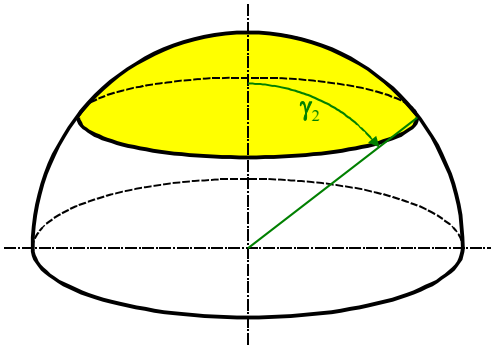
$$\Omega = \Omega_0 \cdot \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \sin\gamma \cdot d\gamma \cdot d\varphi \tag{1.5}$$



Darstellung zum Raumwinkel Ω

Für den Kugelabschnitt $\Delta\Omega_{ab}$ gilt nach Gl. 1.5:

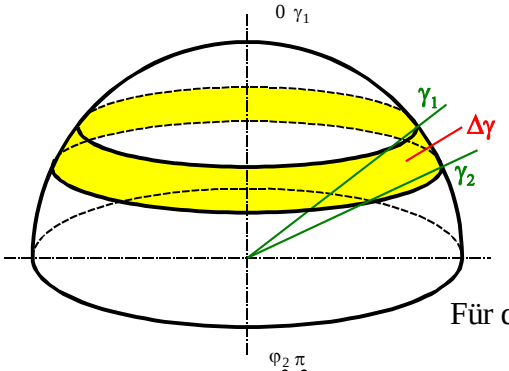
$$\Delta\Omega_{ab} = \Omega_0 \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{\gamma_2} \sin\gamma \cdot d\gamma \cdot d\varphi = 2\,\pi \cdot (1 - \cos\gamma_2) \cdot \Omega_0 \qquad (1.6)$$



Kugelabschnitt

Für die Kugelschicht $\Delta\Omega_{sch}$ gilt nach Gl. 1.5:

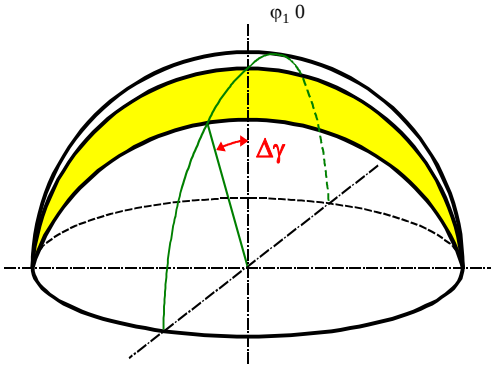
$$\Delta\Omega_{sch} = \Omega_0 \cdot \int_0^{2\pi} \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \sin\gamma \cdot d\gamma \cdot d\varphi = 2\,\pi \cdot (\cos\gamma_1 - \cos\gamma_2) \cdot \Omega_0 \qquad (1.7)$$



Kugelschicht

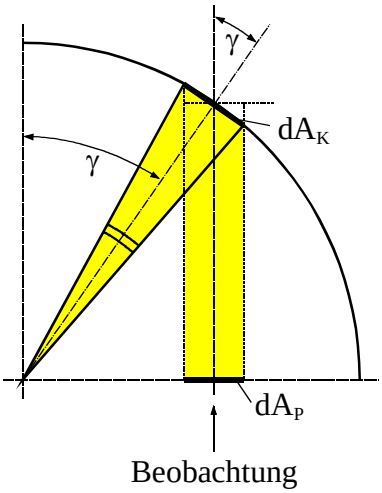
Für das Kugelsegment $\Delta\Omega_{seg}$ gilt nach Gl. 1.5:

$$\Delta\Omega_{seg} = \Omega_0 \cdot \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_0^{\pi} \sin\gamma \cdot d\gamma \cdot d\varphi = 2 \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) \cdot \Omega_0 \qquad (1.8)$$



Kugelsegment

Betrachtet man den Raumwinkel Ω nicht in Richtung auf das Lot der Kugelfläche hin, sondern unter dem Winkel γ, so wird von einem kleinen Kugelelement dA_K nur noch dessen Projektion dA_P wirksam.



Raumwinkelprojektion

$$dA_P = dA_K \cdot \cos\gamma \tag{1.9}$$

Dividiert man Gleichung 1.9 durch das Quadrat des Kugelradius und multipliziert mit dem Einheitsraumwinkel Ω_0, so ergibt sich die sogenannte Raumwinkelprojektion.

$$d\Omega_P = \frac{dA_P}{r^2} \cdot \Omega_0 = \frac{dA_K \cdot \cos\gamma}{r^2} \cdot \Omega_0 = d\Omega \cdot \cos\gamma \cdot \Omega_0 \tag{1.10}$$

Es gilt:

$$\Omega_P = \int d\Omega_P = \int_{\Omega_1}^{\Omega_2} \cos\gamma \cdot d\Omega \tag{1.11}$$

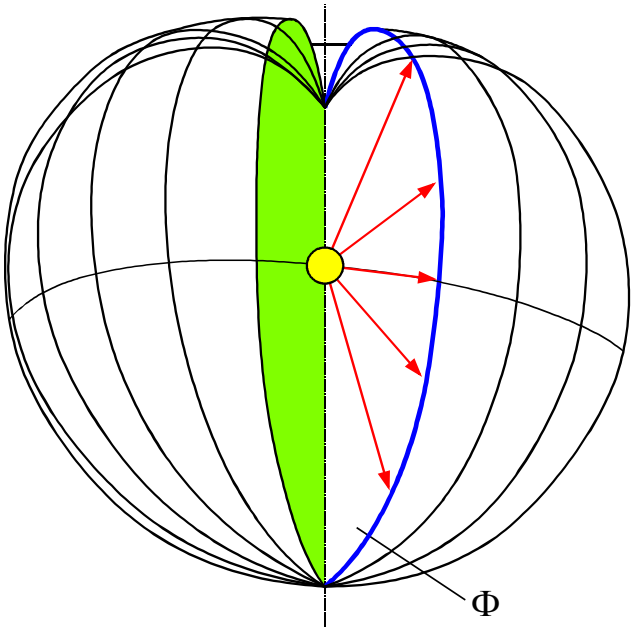
Lichtstrom Φ

Die von einem Strahler in den gesamten Raum abgegebene Strahlungsleistung bezogen auf die Wellenlänge bezeichnet man als spektralen Strahlungsfluss $\Phi_{e\lambda}$. Für beleuchtungstechnische Belange interessiert nur der Helligkeitseindruck. Der Lichtstrom Φ des Strahlers mit der Einheit Lumen (lm) ist mit dem fotometrischen Strahlungsäquivalent K_m = 683 lm/W definiert:

$$\Phi = K_m \cdot \int_{380nm}^{780nm} V(\lambda) \cdot \Phi_{e\lambda} \cdot d\lambda \tag{1.12}$$

Lichtstromwerte einiger Lichtquellen:

- Glühlampe 100 W
  - ➔ Φ = 1380 lm
- Leuchtstofflampe 58 W
  - ➔ Φ = 5200 lm
- Natriumdampf-Hochdrucklampe 70 W
  - ➔ Φ = 6000 lm
- High-Power-LED-Modul 100 W
  - ➔ Φ = 8000 lm



Darstellung des Lichtstromes Φ und seine Verteilung

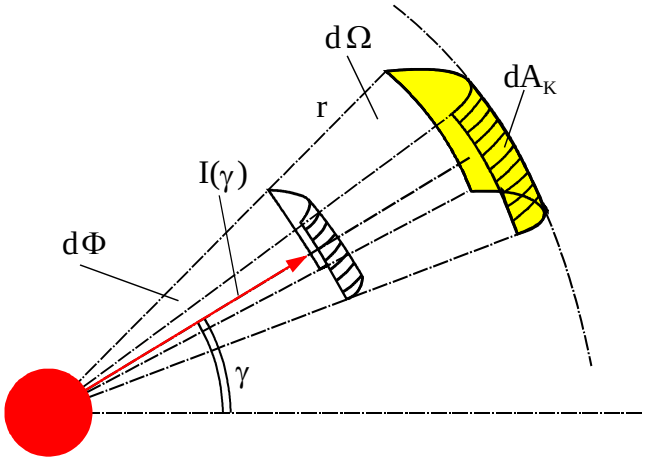
Der in einem bestimmten Zeitraum abgestrahlte Lichtstrom wird Lichtmenge (Lichtarbeit) Q genannt:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \Phi \cdot dt \qquad (1.13)$$

Lichtstärke I

Die Lichtstärke I mit der Einheit Candela (cd) ist der Quotient aus Lichtstrom und Raumwinkel:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \qquad (1.14)$$



Die Angabe der Lichtstärke ist nur bei (nahezu) punktförmigen Lichtquellen sinnvoll.

Lichtstärkedefinition

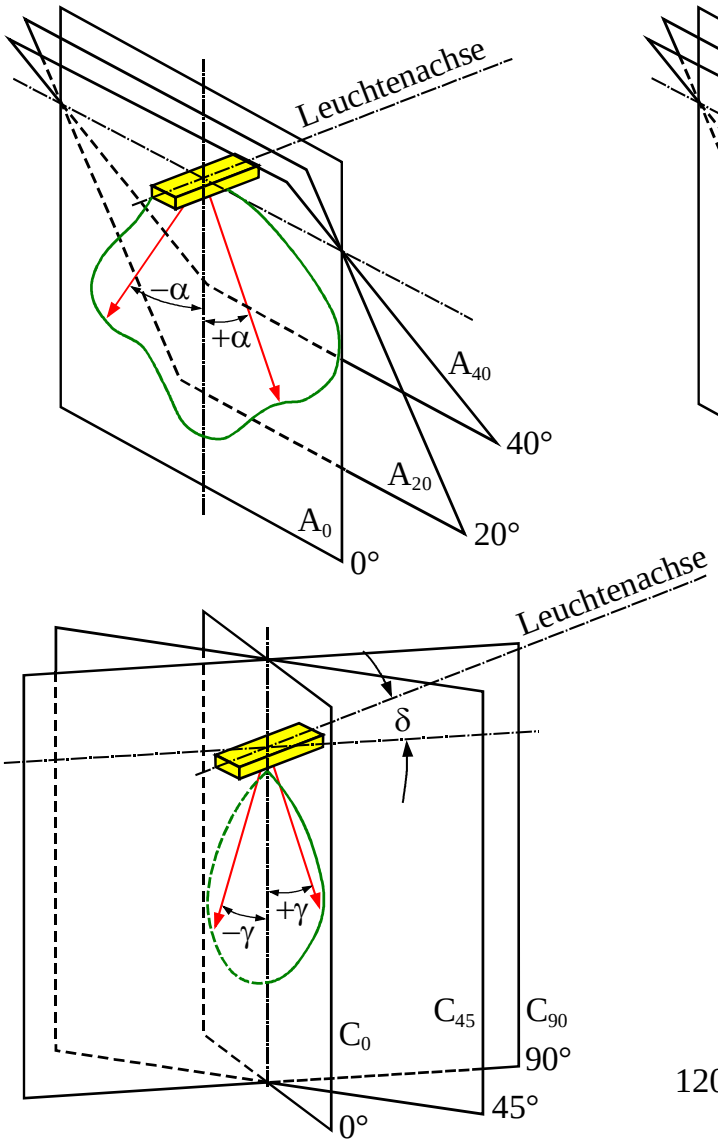
Die Einheit Candela (Kerze) ist die Grundeinheit der Beleuchtungstechnik. Als Grundeinheit im SI-System ist sie definiert:

- **1 Candela entspricht der Strahlungsleistung von 1/683 Watt einer monochromatischen Strahlung der Frequenz von $540 \cdot 10^{12}$ Hz.**

Zur vollständigen Charakterisierung des Lichtfeldes der meisten Lichtquellen muss die Lichtstärkeverteilung in allen Richtungen angegeben werden. Die polare Lichtstärkeverteilung in einer Ebene wird als Lichtstärkeverteilungskurve LVK bezeichnet.

Die Lichtstärkeverteilungskurven werden im Allgemeinen in ausgewählten Ebenen dargestellt (A-, B- und C-Ebene).

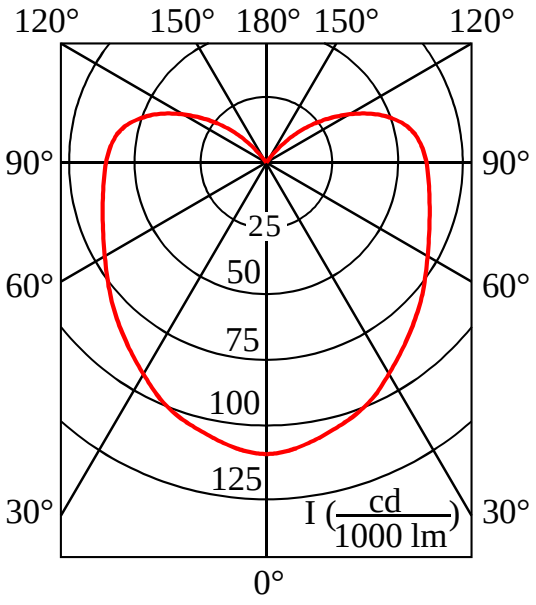
- A-Ebene: Die Schnittgerade steht senkrecht und horizontal zur Leuchtenachse.
- B-Ebene: Die Schnittgerade geht durch die Leuchtenachse.
- C-Ebene: Die Schnittgerade steht senkrecht und vertikal zur Leuchtenachse.



Lichtstärkeverteilungskurven für A-, B- und C-Ebenen

In Lichtstärkeverteilungskurven werden häufig nicht absolut, sondern auf einen Lampenlichtstrom von 1000 lm normiert eingetragen.

Lichtstärkeverteilung in Polarkoordinaten (LVK)



Beleuchtungsstärke E

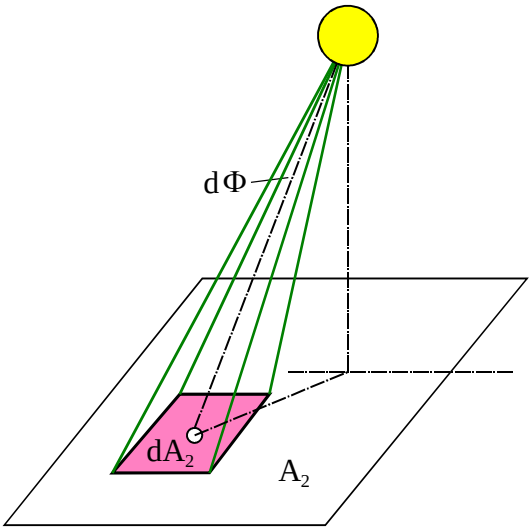
Die Beleuchtungsstärke E mit der Einheit Lux (lx) ist der Quotient aus Lichtstrom und beleuchteter Fläche. Für die ebene Fläche gilt:

$$E = \frac{d\Phi}{dA_2} \tag{1.15}$$

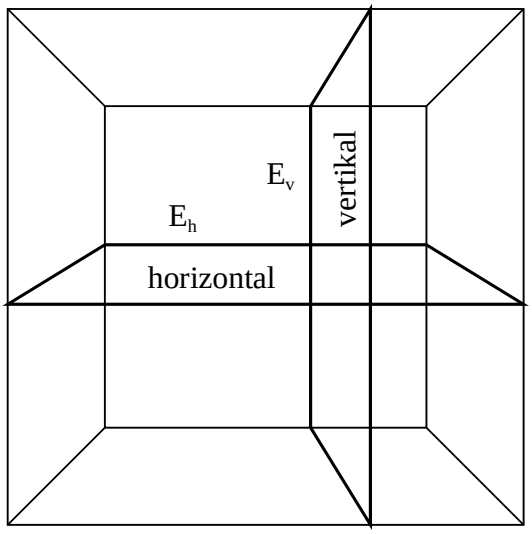
Die Beleuchtungsstärke E dient vor allem in der Innenraumbeleuchtung als Dimensionierungsgröße. Den Helligkeitseindruck, den das Auge empfindet, erfasst die Beleuchtungsstärke nicht.

Beispiele für Beleuchtungsstärken:

- Wolkenloser Sommertag E = 100 000 lx
- Trüber Sommertag E = 20 000 lx
- Trüber Wintertag E = 400 lx
- Vollmondnacht E = 0,3 lx
- Bürobeleuchtung E = 500 lx
- 100-W-Glühlampe in 1 m Abstand E = 110 lx



Beleuchtungsstärkedefinition



Horizontale Beleuchtungsstärke E_h und vertikale Beleuchtungsstärke E_v

Für die Beleuchtungsstärke E senkrecht zur Strahlungsrichtung gilt:

$$E = \frac{\Phi}{A} = \frac{I \cdot \Omega}{A} = \frac{I}{r^2} \tag{1.16}$$

Die Beleuchtungsstärke ändert sich quadratisch mit dem Abstand r nur für punktförmige Lichtquellen. Gute Näherungen werden erreicht, wenn der Abstand größer als die 5fache größte lineare Ausdehnung des leuchtenden Objektes ist.

Die Integration der Beleuchtungsstärke über die Zeit ergibt die Belichtung H.

$$H = \int_{t_1}^{t_2} E \cdot dt \tag{1.17}$$

Diese Größe leistet bei der Filmbelichtung gute Dienste.

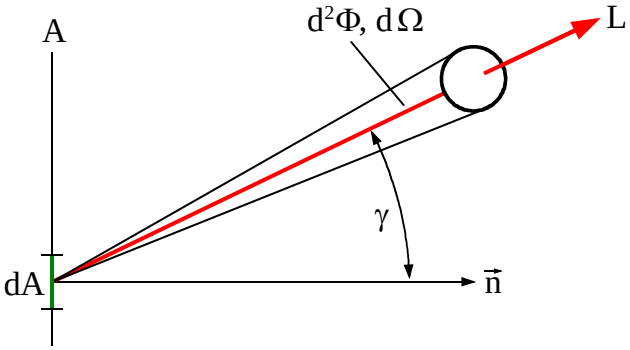
Leuchtdichte L

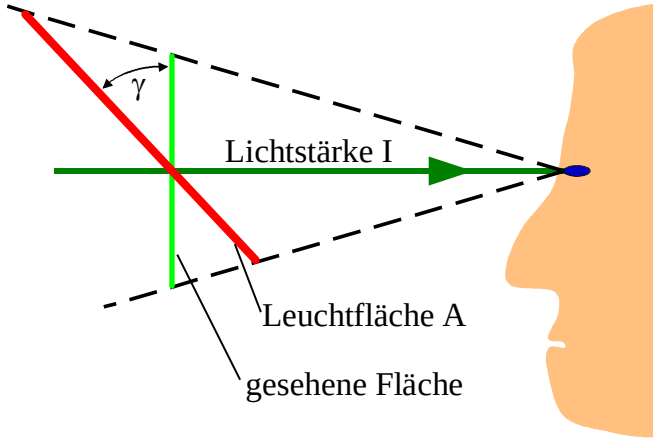
Die Leuchtdichte einer Lichtquelle oder beleuchteten Fläche in einer bestimmten Richtung kennzeichnet die Flächendichte der Lichtausstrahlung. Sie ist gleich dem Verhältnis von in einem Raumwinkelelement dΩ abgestrahlten Lichtstrom $d^2\Phi$ zum Raumwinkel und zur scheinbar leuchtenden Fläche ($dA \cdot \cos\gamma$).

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA \cdot \cos\gamma \cdot d\Omega} = \frac{dI(\gamma)}{dA \cdot \cos\gamma} \qquad (1.18)$$

Leuchtdichtedefinition

Die Leuchtdichte ist das Verhältnis des Lichtstroms, der in einem Lichtbündel geführt wird, zum Raumwinkel dieses Lichtbündels und zur scheinbaren Fläche des leuchtenden Flächenelementes aus der Sicht der betrachteten Richtung.





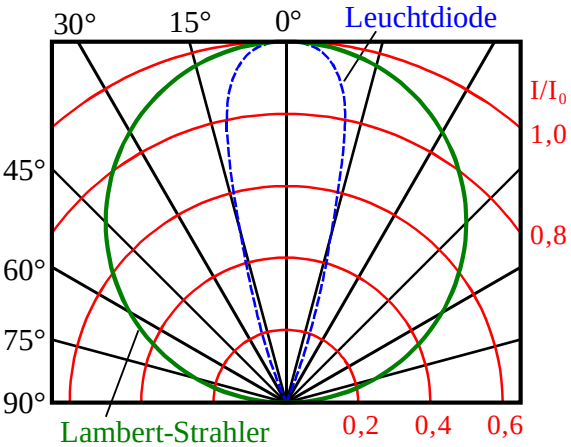
Leuchtdichte, der Helligkeitseindruck im Auge

Die Leuchtdichte L in cd/m² ist das Maß für den Helligkeitseindruck, den eine leuchtende oder beleuchtete Fläche A im Auge erzeugt. Von den lichttechnischen Größen ist sie eigentlich die einzige „sichtbare“ Größe.

Bei vielen Lichtquellen ist die Leuchtdichte näherungsweise L(γ) = konst., d.h. die Leuchtdichte hängt nicht vom Betrachtungswinkel ab. Die Lichtstärke I(γ) beträgt dann abhängig von der Betrachtungsrichtung:

$$I(\gamma) = I(\gamma = 0) \cdot \cos\gamma \qquad (1.19)$$

Lichtquellen nach Gl. 1.19 bezeichnet man als Lambert-Strahler. Beispiele für solche Strahler sind von hinten beleuchtete Mattscheiben, wie sie häufig in der Innenraumbeleuchtung verwendet werden. Diese Lichtquellen nennt man auch vollkommen diffus streuend. Lambert-Strahler lassen sich nur näherungsweise realisieren. Weil sie sich mathematisch einfach beschreiben lassen, werden sie gern bei theoretischen Betrachtungen zu Grunde gelegt. Der Gesamtlichtstrom eines Lambert-Strahlers beträgt $\Phi = \pi \cdot I_0$.



Lichtstärke I(γ) in Abhängigkeit der Betrachtungsrichtung

Der Gesamtlichtstrom Φ eines Lambert-Strahlers wird durch Integration der Lichtstärke $I(\gamma)$ über den Raumwinkel Ω des der Lichtquelle zugewandten Halbraums berechnet.

$$\Phi = \int_0^{2\pi} I(\Omega) \cdot d\Omega \qquad \text{mit} \quad \Omega = 2\pi \cdot (1 - \cos\gamma) \quad \Rightarrow \quad d\Omega = 2\pi \cdot \sin\gamma \cdot d\gamma$$

$$\Phi = \int_0^{\pi} I(\gamma) \cdot 2\pi \cdot \sin\gamma \cdot d\gamma = 2\pi \cdot I_0 \cdot \int_0^{\pi} \cos\gamma \cdot \sin\gamma \cdot d\gamma = \pi \cdot I_0 \qquad (1.20)$$

Leuchtdichtewerte im Alltag:

Mond	L =	2 500 cd/m^2
Kerze	L =	8 000 cd/m^2
Leuchtstofflampe	L =	10 000 cd/m^2
100-W-Glühlampe (Opalglas)	L =	60 000 cd/m^2
100-W-Glühlampe (Klarglas)	L =	15 000 000 cd/m^2
Sonne	L =	1 600 000 000 cd/m^2
Weißes Papier bei 500 lx	L =	150 cd/m^2
Umweltschutzpapier bei 500 lx	L =	100 cd/m^2

Die Leuchtdichte L hat im Zusammenhang mit der Blendung eine große Bedeutung. Die Leuchtdichte eines Sehobjekts ist von der Sehdistanz unabhängig.

Reflexions-, Transmissions- und Absorptionsgrad

Reflexionsgrad: $\rho = \dfrac{\Phi_\rho}{\Phi}$

Transmissionsgrad: $\tau = \dfrac{\Phi_\tau}{\Phi}$

Absorptionsgrad: $\alpha = \dfrac{\Phi_\alpha}{\Phi}$

Φ_ρ, Φ_τ, Φ_α reflektierter, transmittierter, absorbierter Lichtstrom,

Φ auftreffender Lichtstrom.

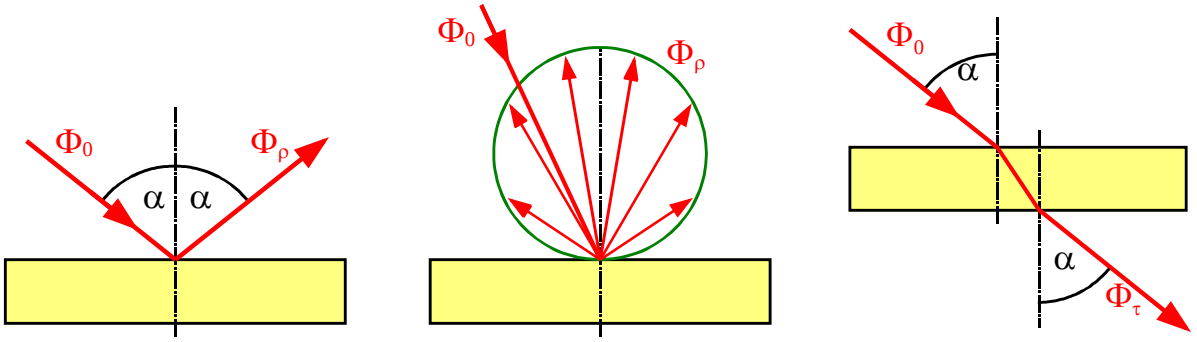
Erfolgt keine Emission im beleuchteten Stoff, so gilt aus Energieerhaltungsgründen:

$$\rho + \tau + \alpha = 1 \qquad (1.21)$$

Reflexions- und Transmissionsgrade einiger Materialien:

Aluminium, hochglänzend	ρ = 0,80 ... 0,85	
Aluminium, matt	ρ = 0,55 ... 0,75	
Papier, weiß	ρ = 0,70 ... 0,85	
Schnee	ρ = 0,60 ... 0,70	
Erde	ρ = 0,07	
Haut	ρ = 0,45	
Klarglas, 1 ... 4 mm	τ = 0,90 ... 0,92	ρ = 0,06 ... 0,08
Trübglas, 2 ... 3 mm	τ = 0,36 ... 0,66	ρ = 0,31 ... 0,54
Kunststoff, weiß, getrübt	τ = 0,40 ... 0,60	ρ = 0,20 ... 0,40

Das Streuverhalten lichttechnischer Materialien liegt zwischen keiner Streuung (gerichtete Reflexion bzw. Transmission) und der gleichmäßigen Abstrahlung in alle Richtungen (diffuse Reflexion bzw. Transmission).



gerichtete Reflexion **diffuse Reflexion** **Transmission mit Brechung**

Kontrastwiedergabe

Ein Gegenstand kann nur wahrgenommen werden, wenn er sich bezüglich seiner Farbe oder seinem Kontrast von seiner näheren Umgebung unterscheidet.
Die Leuchtdichte des Gegenstandes soll sich von der Umgebungsleuchtdichte so unterscheiden, dass ein angenehmes Sehen möglich ist. Ein zu großer Kontrast kann zu unerwünschten Blendungserscheinungen und Augenbeschwerden führen.

Lichtausbeute η

Die Lichtausbeute η ist ein Maß für die Effektivität einer Lampe; sie ist definiert als Quotient aus Lichtstrom Φ und elektrischer Leistung P_{el}. Der theoretische obere Grenzwert der Lichtausbeute beträgt 683 lm/W.

$$\eta = \frac{\Phi}{P_{el}} \tag{1.22}$$

Lichtausbeute verschiedener Lampen:

Glühlampen	η = (10 ... 15) lm/W
Halogenglühlampen	η = (15 ... 25) lm/W
Leuchtstofflampen	η = (60 ... 100) lm/W
Quecksilberdampf-Hochdrucklampen	η = (40 ... 55) lm/W
Halogen-Metalldampflampen	η = (60 ... 100) lm/W
Natriumdampf-Niederdrucklampen	η = (150 ... 200) lm/W

1.3 Optische Grundgesetze

Licht breitet sich in den einzelnen optischen Medien unterschiedlich schnell aus. Das Verhältnis der Geschwindigkeit $c_0 = 2{,}9979 \cdot 10^8$ m/s im Vakuum zur Geschwindigkeit c im Medium nennt man absolute Brechzahl n_0 des Mediums.

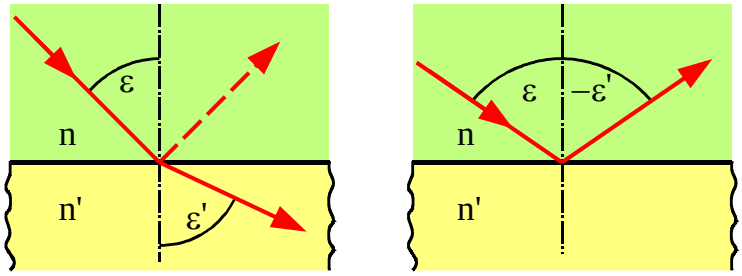
$$n_0 = \frac{c_0}{c} \quad \text{mit} \quad c_0 = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}} \quad \text{und} \quad c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} \tag{1.23}$$

Meistens arbeitet man mit der relativen Brechzahl $n = n_0/n_L \approx 1$ (n_L = Brechzahl in Luft). Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c und damit die Brechzahl n hängt von der Wellenlänge des Lichtes ab (Dispersion). Im Normalfall steigt die Brechzahl n mit abnehmender Wellenlänge. Blaues

Licht wird also stärker gebrochen als gelbes oder rotes. Diese Eigenschaft wird in Monochromatoren zur Zerlegung des Lichtes in seine spektralen Komponenten ausgenutzt (Dispersionsprismen). Die Brechzahl beträgt für Luft 1, für Wasser 1,33 und für Glas 1,44 ... 2,0.

Brechungsgesetz: $$\frac{\sin\varepsilon}{\sin\varepsilon'} = \frac{n'}{n} \qquad (1.24)$$

Reflexionsgesetz: $$\varepsilon = -\varepsilon' \qquad (1.25)$$



Brechung $n > n'$ **Totalreflexion**

Ist der Eintrittswinkel beim Übergang vom optisch dichteren Medium in ein optisch dünneres Medium größer als der Grenzwinkel ε_g, so wird das Licht vollständig reflektiert. Das Licht verlässt also das optisch dichtere Medium nicht.

Für Medien gegen Luft heißt das:

$$\varepsilon_g = \arcsin\frac{1}{n} \qquad (1.26)$$

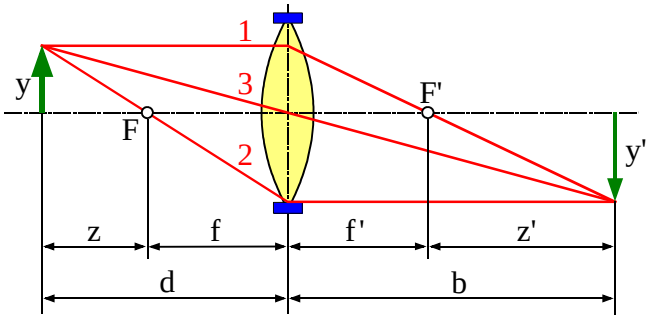
Linsen

Durch Anwendung des Brechungs- und Reflexionsgesetzes kann man mit Linsen und Spiegeln die Lichtwirkung gezielt beeinflussen. Es gibt Sammel- oder Positivlinsen, welche die Divergenz eines Strahlenbündels verringern. Zerstreuungs- oder Negativlinsen vergrößern sie.

Für die Sammellinse gelten die Gleichungen:

$$z \cdot z' = f^2 \quad \text{und} \quad \frac{1}{d} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \qquad (1.27)$$

f = Brennweite; d = Dingabstand; b = Bildabstand



Sammellinse

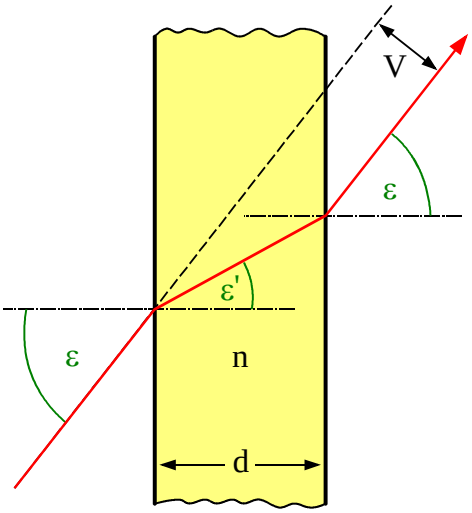
Ein zur optischen Achse paralleler Strahl 1 im Dingbereich schneidet bildseitig die Achse im Brennpunkt F′. Die Entfernung von der Hauptebene der Linse bis zum vorderen Brennpunkt F ist die Brennweite f der Linse. Ein Dingstrahl 2, der den vorderen Brennpunkt F der Linse passiert, wird bildseitig zum Parallelstrahl. Die Lichtstrahlen 3, die durch den Mittelpunkt der Linse gehen, bleiben – bis auf eine kleine Parallelverschiebung – in ihrer Richtung erhalten. Die Vergrößerungen kann man wie folgt angeben:

Lateralvergrößerung: $$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{z'}{f} = \frac{f}{z} \qquad (1.28)$$

Tiefenvergrößerung: $$\tau = \frac{\Delta z'}{\Delta z} = \frac{f^2}{z^2} \qquad (1.29)$$

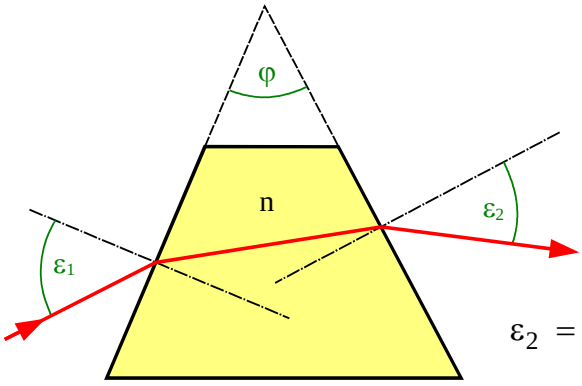
Refraktoren

Optisch brechende Elemente werden als Refraktoren bezeichnet. Eine planparallele Platte bewirkt eine parallele Versetzung V des Lichtstrahls.



$$V = \frac{\sin\left[\varepsilon - \arcsin\left(\frac{\sin\varepsilon}{n}\right)\right]}{\cos\left[\arcsin\left(\frac{\sin\varepsilon}{n}\right)\right]} \cdot d \qquad (1.30)$$

Strahlengang durch eine planparallele Platte



Prismatisch gestaltete Elemente werden häufig als Streuscheiben und Stufenlinsen verwendet.

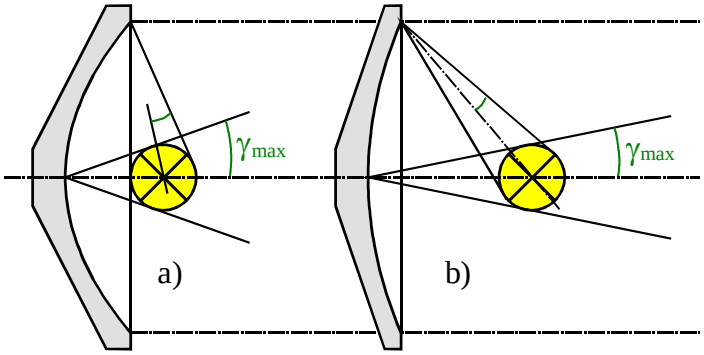
Strahlengang durch ein Prisma

Die Strahlablenkung beim Prisma ist:

$$\varepsilon_2 = \arcsin(\sin\varphi \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2\varepsilon_1} - \sin\varepsilon_1 \cdot \cos\varphi) \qquad (1.31)$$

Reflektoren

Die Reflexion an einer spiegelnden Fläche erfolgt nach dem Reflexionsgesetz. Optische Systeme, die diese reguläre Reflexion ausnutzen, werden Spiegelreflektoren genannt.



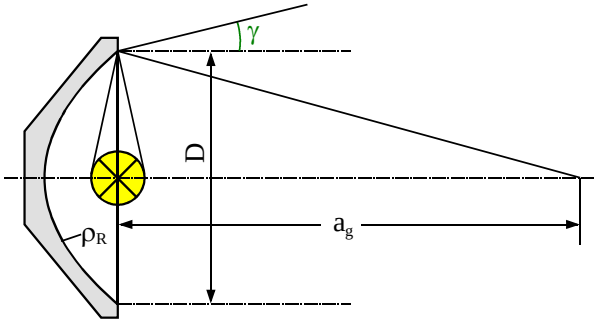
Reflektor a streut stärker (geometrischer Streuwinkel γ) als Reflektor b, der einen höheren Bündelungsgrad hat.

Reflektoren unterschiedlicher Brennweite, aber gleicher Maximallichtstärke

Oberhalb der Grenzentfernung a_g kann der gesamte Reflektor als leuchtend angesehen werden. Für die Lichtstärke in Achsenrichtung gilt:

$$I = \frac{L \cdot \pi \cdot D^2}{4} \cdot \rho_R \qquad (1.32)$$

ρ_R = Reflexionsgrad des Reflektors



Geometrische Grenzentfernung eines Reflektors

1.4 Licht und Farbe

Die Farbe, in der ein Gegenstand erscheint, hängt von folgenden Einflussgrößen ab:

- der spektralen Zusammensetzung des auf den Gegenstand fallenden Lichts,
- der spektralen Zusammensetzung des vom Gegenstand reflektierten Lichts,
- den individuellen Eigenschaften des Gesichtssinns des Betrachters.

Ein Gegenstand erscheint gelb, wenn das auf ihn fallende Licht Gelb im Spektrum enthält, er gelb reflektiert und der Beobachter Gelb als Farbe erkennt. Ein Körper erscheint weiß, wenn er alle Farben reflektiert, und er ist schwarz, wenn er alle Farben absorbiert.

Mit der Farbtemperatur T_F wird die Lichtfarbe einer Lampe charakterisiert. Eine bestimmte Farbe lässt sich mit der Angabe der Temperatur des Schwarzen Körpers definieren.

Farbtemperaturen in der Beleuchtungstechnik:

➢ Glühlampen	2800K
➢ Halogenglühlampen	3100 ... 3400 K
➢ Leuchtstofflampen	2800 ... 6500 K
➢ Halogen-Metalldampflampen	3000 ... 6000 K
➢ Natriumdampf-Niederdrucklampen	2000 K
➢ Tageslicht	6000 K
➢ Blauer Himmel	20000 K

Farbtemperatur für allgemeine Beleuchtungszwecke nach DIN 5035:

➢ tw	Tageslichtweiß	> 5000 K
➢ nw	Neutralweiß	3300 K bis 5000 K
➢ ww	Warmweiß	< 3300 K

CRI – Farbwiedergabe (Farbwiedergabeindex R_a)

Ein natürlicher Farbeindruck ist nur möglich, wenn im verwendeten Licht das ganze Spektrum vorhanden ist. Fehlt eine Farbe im Spektrum, so kann ein Gegenstand, der diese Farbe aufweist, farblich nicht erscheinen.

Um die Qualität von Lichtquellen objektiv bewerten zu können, wurde der international anerkannte Farbwiedergabeindex R_a (englisch Colour Rendering Index, CRI) definiert. Dabei wird die Testlichtquelle mit einer Referenzlichtquelle anhand von 15 ausgewählten Testfarben verglichen. Die Bewertungsbandbreite liegt zwischen maximal 100 und -60. Je genauer die Testlichtquelle die Testfarbe wiedergibt, desto höher bzw. besser ist der Farbwiedergabewert. Der allgemeine Farbwiedergabeindex R_a ist der arithmetische Mittelwert aus den speziellen Farbwiedergabeindizes R_i für die Testfarben 1 bis 8. Der Farbwiedergabeindex R_a gibt an, wie

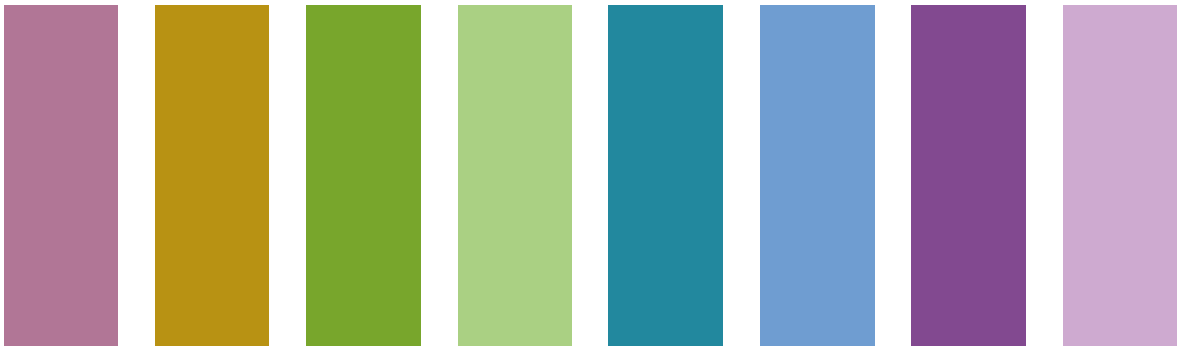
stark sich die Farbe eines Objekts bei der Beleuchtung mit einer bestimmten Lampe bezüglich der Referenzlichtquelle (z. B. Farbtemperatur 5000 K des Schwarzen Körpers) ändert.

Farbwiedergabeeigenschaft	Farbwiedergabestufe	Farbwiedergabeindex R_a
sehr gut	1 A	≥ 90
	1 B	80 ... 89
gut	2 A	70 ... 79
	2 B	60 ... 69
genügend	3	40 ... 59
ungenügend	4	20 ... 39

Farbwiedergabestufen verschiedener Lampen:

1 A	gute LED, Glühlampen, "de Luxe"-Leuchtstofflampen
1 B	normale LED, Dreibanden-Leuchtstofflampen
2 B	Halogen-Metalldampflampen
2 A bis 3	andere Leuchtstofflampen
4	Natrium-Niederdrucklampen

CRI-Testfarben

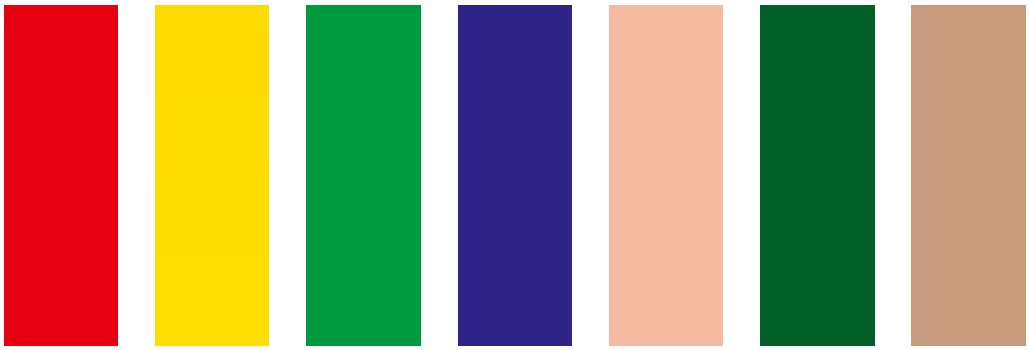


R1 R2 R3 R4 R5 R6 R7 R8

R1 ⇔ Altrosa R2 ⇔ Senfgelb R3 ⇔ Gelbgrün R4 ⇔ Hellgrün

R5 ⇔ Türkisblau R6 ⇔ Himmelblau R7 ⇔ Asterviolett R8 ⇔ Fliederviolett

Die ermittelten Werte für die Testfarben R9 – R15 geben detaillierte Auskunft über die Farbwiedergabe der gesättigten Farben (R9 – R12), der Hautfarbe (R13), von Blattgrün (R14) und über den asiatischen Hautfarbton (R15).

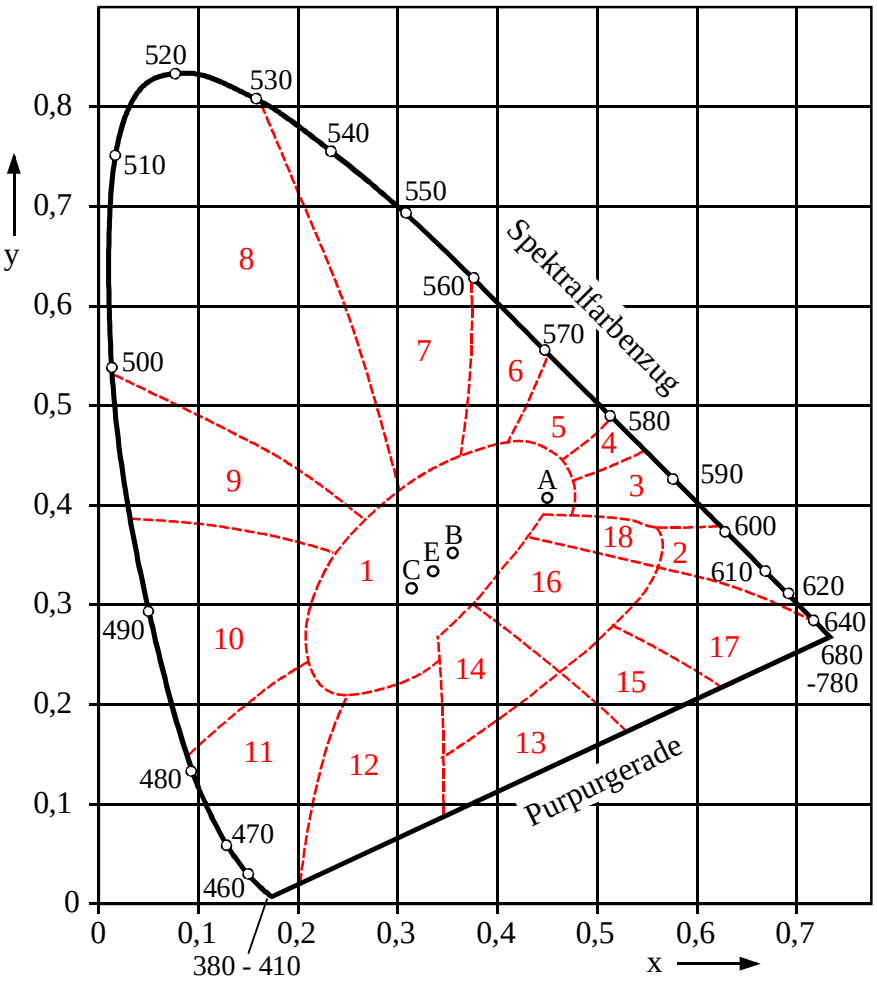


R9 R10 R11 R12 R13 R14 R15

R9 ⇔ Rot gesättigt R10 ⇔ Gelb gesättigt R11 ⇔ Grün gesättigt R12 ⇔ Blau gesättigt

R13 ⇔ Rosa (Hautfarbe) R14 ⇔ Blattgrün R15 ⇔ asiatischer Hautfarbton

Grundsätzlich können alle Farben aus den drei Grundfarben rot, blau und grün in einem räumlichen x-y-z-Koordinatensystem dargestellt werden. Da die Summe der Werte x + y + z = 1 ist, lässt sich das System nach Angaben der CIE in einer Ebene darstellen. Die Lichtfarbe von Lampen wird mit den beiden Koordinaten x und y angegeben.



Nicht genormte Farben rot umrandet:

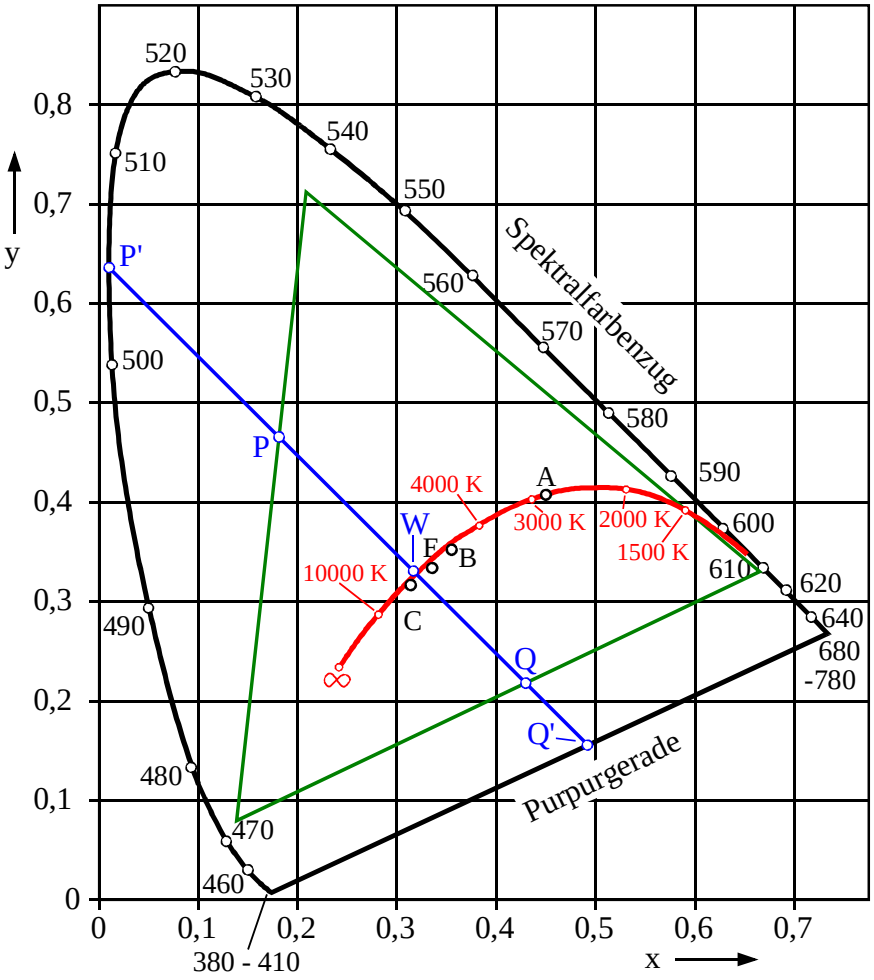
1 - Weiß
2 - rötlich Orange
3 - Orange
4 - gelblich Orange
5 - Gelb
6 - Gelbgrün
7 - gelblich Grün
8 - Grün
9 - bläulich Grün
10 - Blaugrün
11 - Blau
12 - Purpur
13 - Rotpurpur
14 - purpurn Rosa
15 - purpurn Rot
16 - Rosa
17 - Rot
18 - Rosa-Orange

A ➔ CIE-Normbeleuchtung A (x =0,4476; y = 0,4047), Lichtspektrum einer Glühlampe
B ➔ CIE-Normbeleuchtung B (x =0,3484; y = 0,3416)
C ➔ CIE-Normbeleuchtung C (x =0,3101; y = 0,3162), Weißpunkt der NTSC-TV-Norm
E ➔ CIE-Normbeleuchtung E (x =0,3333; y = 0,3333), Weißpunkt des CIE-RGB-Farbraumes

CIE-Normfarbtafel

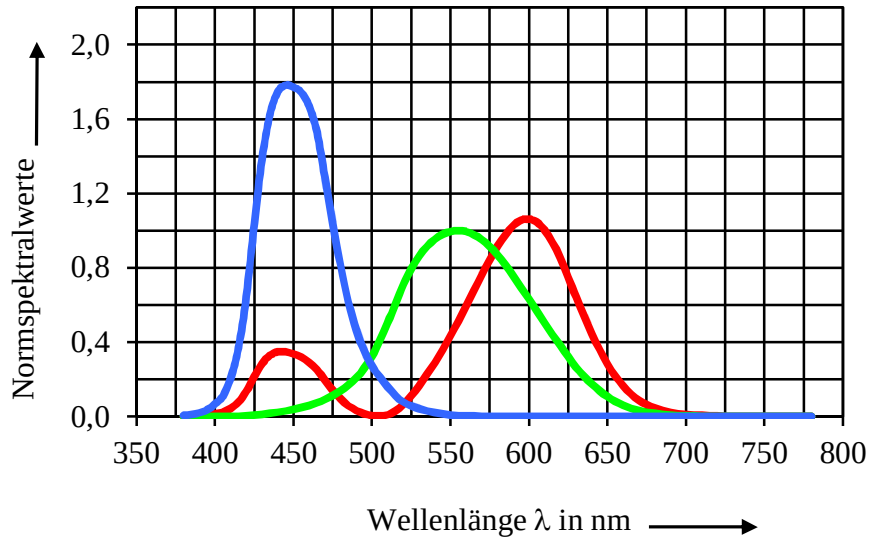
Normlichtfarben (nicht in der CIE-Normfarbtafel dargestellt):
D55 (x =0,3324; y = 0,3474), Lichtspektrum ähnlich dem von Tageslicht (5500 K).
D65 (x =0,312713; y = 0,329016), Weißpunkt der PAL/SECAM-TV-Norm, Adobe-RGB.

Alle möglichen Farben werden durch den spektralen Farbenzug und die Purpurgerade eingefasst. Zentraler Bezugspunkt der CIE-Normfarbtafel ist in jeder Farbmesssituation der Weißpunkt W. Je nach Beleuchtungssituation kann der Weißpunkt praktisch überall auf oder in der Nähe der Kurve des „Schwarzen Körpers“ liegen, in deren Verlauf die Farben als Temperatur eines idealen Strahlers (schwarzer Körper) in Kelvin angegeben sind.

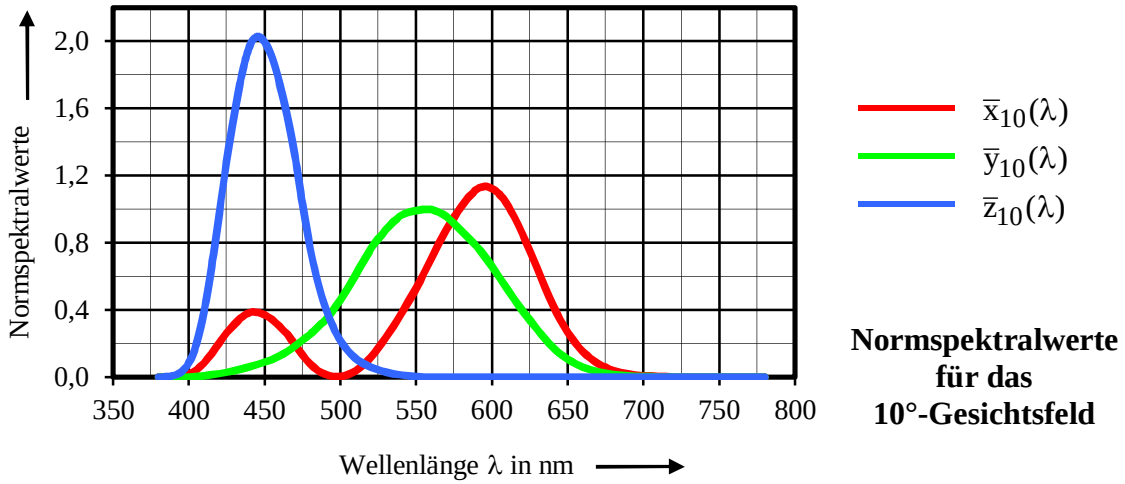


CIE-Normfarbtafel mit Adobe-RGB-Farbraum und Kurve des „Schwarzen Körpers“

Ausgehend von diesem Weißpunkt, können alle als farbtongleich empfundenen Farben auf einer Linie (blau in der CIE-Normfarbtafel) durch den Punkt P abgelesen werden. Über den verwendeten Farbraum (grünes Dreieck in der CIE-Normfarbtafel) kann die farbtongleiche Spektralfarblinie (P’) abgelesen werden. Auf der genau gegenüberliegenden Seite von W können die Komplementärfarben auf der blauen Linie (W-Q) abgelesen werden. Der Punkt Q’ stellt dabei die reinste Komplementärfarbe dar, der in diesem Fall durch den Schnitt mit der Purpurlinie definiert wird.



Normspektralwerte für das 2°-Gesichtsfeld



Normspektralwerte für das 10°-Gesichtsfeld

Die Normspektralwerte für das 2°- und 10°-Gesichtsfeld zeigen die Empfindlichkeitskurven der drei Farbrezeptoren X (rot), Y (grün) und Z (blau).

Außerhalb des Farbraumes, begrenzt durch den Spektralenfarbenzug und die Purpurlinie, können die Farbrezeptoren keine Farben erkennen. Innerhalb eines Farbdreiecks lässt sich fast jeder Farbeindruck (Helligkeit, Farbton, Farbsättigung) durch Vermischung dreier Primärfarbstrahlen (additive Farbmischung) erzielen. Farbdreiecke, die den gesamten Farbraum abdecken und damit in ihren Eckpunkten den realen Farbraum überschreiten, sind nur für theoretische Betrachtungen brauchbar. Für die Praxis sind diese Farbdreiecke unbrauchbar.

Nach DIN 5033 Teil 3 sind die Normfarbwerte X, Y, Z einer zusammengesetzten Strahlung (Farbreizfunktion φ_λ) für das 2°-Normvalenz-System:

$$\begin{aligned} X &= k \cdot \int \varphi_\lambda \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot d\lambda \\ Y &= k \cdot \int \varphi_\lambda \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda \\ Z &= k \cdot \int \varphi_\lambda \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot d\lambda \end{aligned} \qquad (1.33)$$

Die 2°-Gesichtsfeldgröße entspricht einem Objekt mit einem Durchmesser von 1,75 cm bei einem Beobachtungsabstand von 50 cm.

Die Farbreizfunktion φ_λ entspricht bei Selbstleuchtern der Strahlungsfunktion S_λ bzw. $S(\lambda)$. Bei Körperfarben ist die Farbreizfunktion $\varphi_\lambda = S_\lambda \cdot R(\lambda)$ von der Strahlungsfunktion S_λ des beleuchtenden Lichtes und von den spektralen Eigenschaften der Farbfläche $R(\lambda)$ abhängig. Der Normierungsfaktor k wird für Körperfarben unter Beleuchtung durch eine Lichtart mit der Strahlungsfunktion S_λ so definiert, dass für den vollkommen mattweißen Körper $\beta(\lambda) = 1$ für jede Lichtart stets der Normfarbwert $Y_{weiß} = 100$ wird:

$$k = \frac{100}{\int S_\lambda \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda} \qquad (1.34)$$

Beim 10°-Normvalenz-System gelten die gleichen Regeln wie beim 2°-Normvalenz-System. Die Größen erhalten alle die Indizes 10 (X_{10} , Y_{10} , Z_{10}). Die 10°-Gesichtsfeldgröße entspricht einem Objekt mit einem Durchmesser von 8,75 cm bei einem Beobachtungsabstand von 50 cm.

Aus den Normfarbwerten X, Y, Z lassen sich zur Kennzeichnung der Farbart die Normfarbwertanteile x, y, z ableiten. Wegen x + y + z = 1 werden nur x und y bei der Darstellung der Farbart genutzt.

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}$$
$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \qquad (1.35)$$
$$z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

Da im Normvalenz-System die geometrischen Abstände sehr stark von den empfundenen Farbabständen abweichen, wurde von der Internationalen Beleuchtungskommission CIE 1976 der $L^*a^*b^*$-Farbenraum für Körperfarben und der $L^*u^*v^*$-Farbenraum für selbstleuchtende Quellen mit angenähert empfindungsgemäß gleichen Farbabständen festgelegt. Beide Farbräume beziehen sich auf die Normfarbwerte X_n, Y_n, Z_n des vollkommen mattweißen Körpers unter der beleuchtenden Lichtart.

Der $L^*a^*b^*$-Farbenraum ist für X/X_n, Y/Y_n, $Z/Z_n > 0{,}008856$ durch folgende rechtwinklige Koordinaten definiert:

$$L^* = 116 \cdot \sqrt[3]{Y/Y_n} - 16$$
$$a^* = 500 \cdot \left[\sqrt[3]{X/X_n} - \sqrt[3]{Y/Y_n}\right] \qquad (1.36)$$
$$b^* = 200 \cdot \left[\sqrt[3]{Y/Y_n} - \sqrt[3]{Z/Z_n}\right]$$

Der $L^*u^*v^*$-Farbenraum ist für $y/y_n > 0{,}008856$ durch folgende rechtwinklige Koordinaten festgelegt:

$$L^* = 116 \cdot \sqrt[3]{Y/Y_n} - 16$$
$$u^* = 13 \cdot L^* \cdot (u' - u'_n) \qquad (1.37)$$
$$v^* = 13 \cdot L^* \cdot (v' - v'_n)$$

Für die Größen u', u'_n, v', v'_n gilt:

$$u' = \frac{4 \cdot X}{X + 15 \cdot Y + 3 \cdot Z} = \frac{4 \cdot x}{3 - 2 \cdot x + 12 \cdot y}$$
$$u'_n = \frac{4 \cdot X_n}{X_n + 15 \cdot Y_n + 3 \cdot Z_n} = \frac{4 \cdot x_n}{3 - 2 \cdot x_n + 12 \cdot y_n}$$
$$v' = \frac{9 \cdot Y}{X + 15 \cdot Y + 3 \cdot Z} = \frac{9 \cdot v}{3 - 2 \cdot x + 12 \cdot y} \qquad (1.38)$$
$$v'_n = \frac{9 \cdot Y_n}{X_n + 15 \cdot Y_n + 3 \cdot Z_n} = \frac{9 \cdot y_n}{3 - 2 \cdot x_n + 12 \cdot y_n}$$

In DIN 5033 Teil 3 sind noch die abgeleiteten Kenngrößen für die Helligkeit L^* nach Gl. 1.36 und 1.37, die C^*_{ab}- oder C^*_{uv}-Buntheit

$$C^*_{ab} = \sqrt{\left(a^{*2} + b^{*2}\right)} \qquad C^*_{uv} = \sqrt{\left(u^{*2} + v^{*2}\right)} \qquad (1.39)$$

und der h_{ab}- oder h_{uv}-Bunttonwinkel angegeben.

$$h_{ab} = \arctan\left(b^*/a^*\right) \qquad h_{uv} = \arctan\left(v^*/u^*\right) \tag{1.40}$$

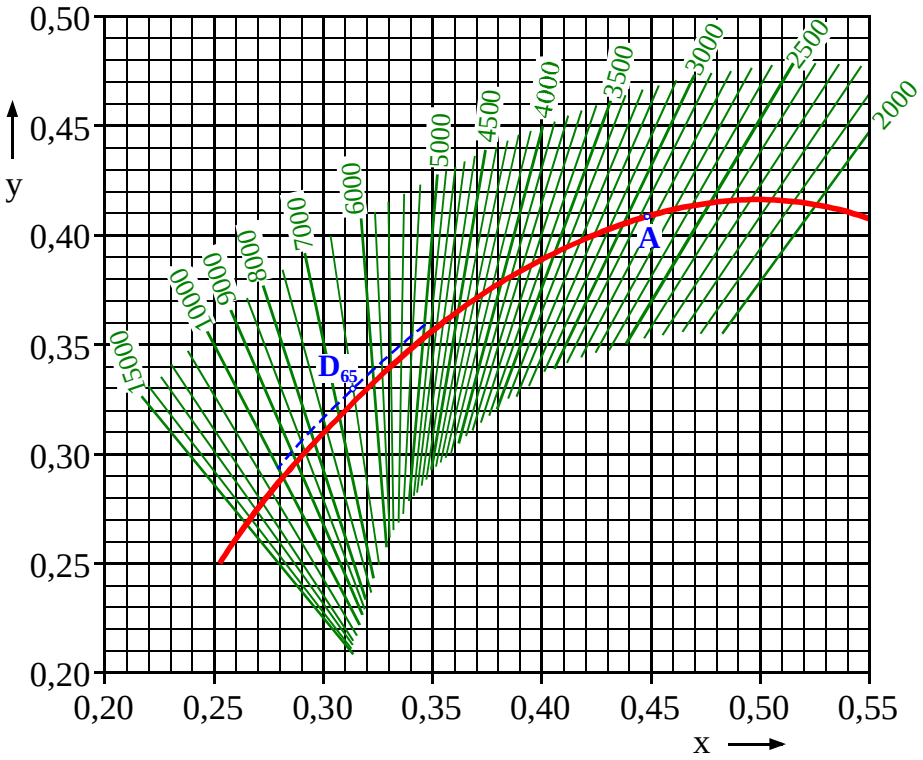
Für den $L^*u^*v^*$-Farbenraum ist zusätzlich noch das Sättigungsmaß S^*_{uv} angegeben.

$$S^*_{uv} = 13 \cdot \sqrt{(u' - u'_n)^2 + (v' - v'_n)^2} \tag{1.41}$$

Farbwiedergabe-Eigenschaften von Lichtquellen in der Beleuchtungstechnik

Die Farbwiedergabe in der Beleuchtungstechnik ist durch die Auswirkungen einer Lichtart auf die Farbempfindung von mit dieser Lichtart beleuchteten Objekten, im bewussten oder unbewussten Vergleich zu der Farbempfindung unter einer Bezugslichtart gegeben. Zur zahlenmäßigen Kennzeichnung der Farbwiedergabeeigenschaften von Lichtquellen dienen Farbwiedergabe-Indizes, die nach dem Testfarbenverfahren ermittelt werden.

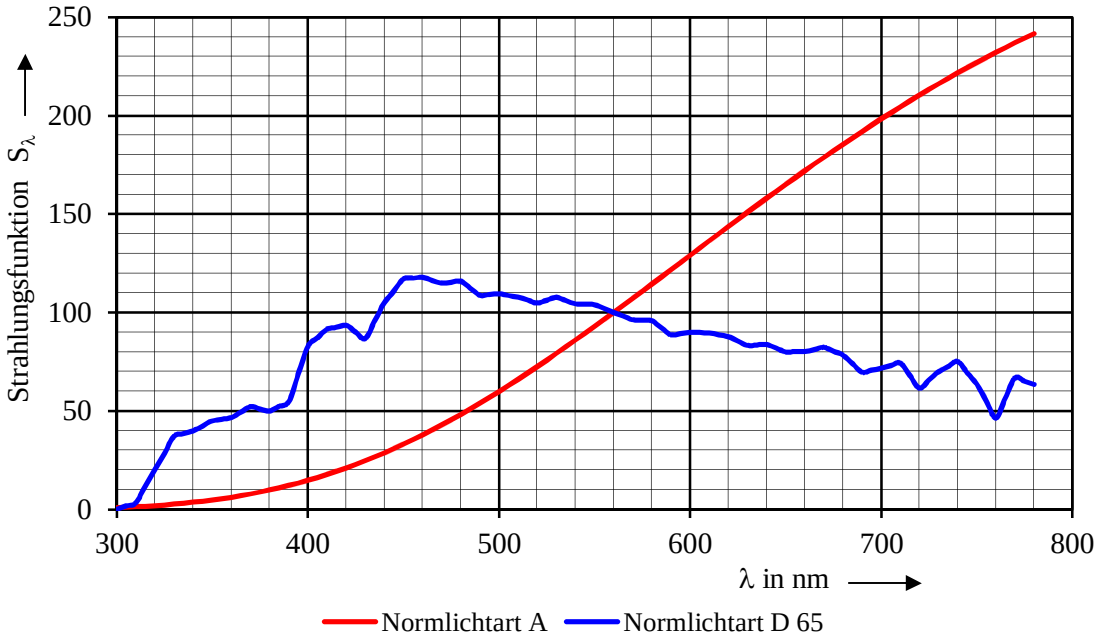
Für Lichtquellen mit einer ähnlichsten Farbtemperatur $T_n < 5000$ K wird der Plancksche Strahler als Bezugslichtart verwendet. Für Lichtquellen mit einer ähnlichsten Farbtemperatur $T_n \geq 5000$ K ist die Phase des natürlichen Tageslichts D mit einer empfindungsgemäß nahegelegenen ähnlichsten Farbart als Bezugslichtart zu wählen.



Ausschnitt aus der Normfarbtafel mit dem Plankschen Kurvenzug und den Juddschen Geraden für die ähnlichste Farbtemperatur T_n

(Normlichtarten A und D sowie die Bezugslichtart für das Tageslicht blau dargestellt)

Nach DIN 6169 Teil 2 kann der Farbwiedergabeindex R_i für 14 Testfarben messtechnisch oder rechnerisch ermittelt werden. Aus den ersten 8 Testfarben wird der allgemeine Farbwiedergabeindex R_a berechnet.

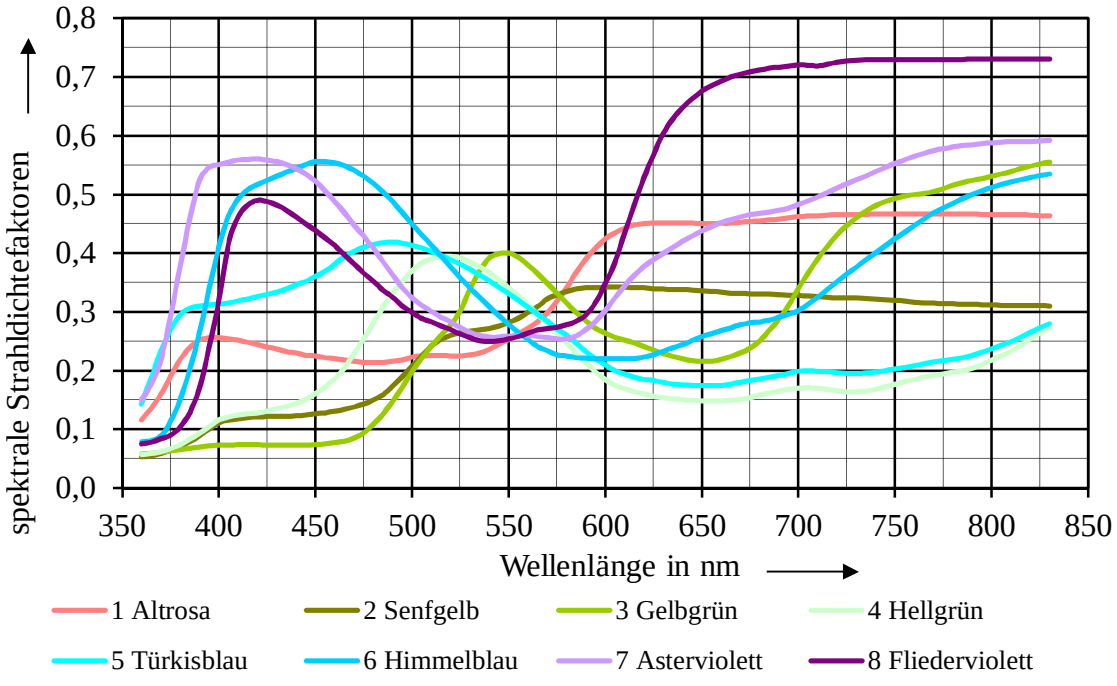


Normierte Strahlungsfunktionen der Normlichtarten A und D65 (100 bei 560 nm)

Zunächst werden die jeweiligen Normfarbwerte bzw. Normfarbwerteanteile auf die Koordinaten u, v der UCS-Farbtafel CIE 1960 umgerechnet.

$$u = 4 \cdot X/(X + 15 \cdot Y + 3 \cdot Z) = 4 \cdot x/(3 - 2 \cdot x + 12 \cdot y)$$
$$v = 6 \cdot Y/(X + 15 \cdot Y + 3 \cdot Z) = 6 \cdot y/(3 - 2 \cdot x + 12 \cdot y) \qquad (1.42)$$

Für die Testfarben wird die Farbreizfunktion $\varphi_\lambda = S_\lambda \cdot \beta_i(\lambda)$ zur Berechnung der Normfarbwerte gemäß Gl. 1.33 verwendet.



Spektrale Strahldichtefaktoren (Remissionsgrad) $\beta_i(\lambda)$ von 8 Testfarben zur Bestimmung des allgemeinen Farbwiedergabeindex R_a

Um der Farbwandlung Rechnung zu tragen, die sich auf die unterschiedliche Farbstimmung zwischen zu kennzeichnender Lichtart k und Bezugslichtart r bezieht, werden folgende Formeln für die Farbörter der Testfarbe i unter der zu kennzeichnenden Lichtart k angewendet:

$$u'_{k,i} = \frac{10{,}872 + 0{,}404 \cdot \frac{c_{k,i}}{c_k} \cdot c_r - 4 \cdot \frac{d_{k,i}}{d_k} \cdot d_r}{16{,}518 + 1{,}481 \cdot \frac{c_{k,i}}{c_k} \cdot c_r - \frac{d_{k,i}}{d_k} \cdot d_r}$$

$$v'_{k,i} = \frac{5{,}520}{16{,}518 + 1{,}481 \cdot \frac{c_{k,i}}{c_k} \cdot c_r - \frac{d_{k,i}}{d_k} \cdot d_r} \qquad (1.43)$$

Die in Gl. 1.43 enthaltenen Funktionen c und d sind nach Gl. 1.44 für die zu kennzeichnende Lichtart k, für die Bezugslichtart r sowie für die Testfarben i unter der zu kennzeichnenden Lichtart k zu berechnen:

$$c = \frac{1}{v} \cdot (4 - u - 10 \cdot v)$$

$$d = \frac{1}{v} \cdot (1{,}708 \cdot v - 0{,}404 - 1{,}481 \cdot u) \qquad (1.44)$$

Die nach Gl. 1.43 und 1.44 bestimmten Farbörter sind nach Gl. 1.45 auf den Farbenraum CIE 1964 zu transformieren:

$$W^*_{r,i} = 25 \cdot \sqrt[3]{Y_{r,i}} - 17 \qquad W^*_{k,i} = 25 \cdot \sqrt[3]{Y_{k,i}} - 17$$

$$U^*_{r,i} = 13 \cdot W^*_{r,i} \cdot (u_{r,i} - u_r) \qquad U^*_{k,i} = 13 \cdot W^*_{r,i} \cdot (u'_{k,i} - u'_k) \qquad (1.45)$$

$$V^*_{r,i} = 13 \cdot W^*_{r,i} \cdot (v_{r,i} - v_r) \qquad V^*_{k,i} = 13 \cdot W^*_{r,i} \cdot (v'_{k,i} - v'_k)$$

$u'_k = u_r$ und $v'_k = v_r$ sind die Farbörter der zu kennzeichnenden Lichtart k nach Berücksichtigung der Farbwandlung.

Zur Berechnung der Differenz zwischen der Farbempfindung einer Testfarbe i bei Beleuchtung mit der zu kennzeichnenden Lichtart k und der bei Beleuchtung der gleichen Testfarbe i mit der Bezugslichtart r wird die Farbabstandsformel CIE 1964 verwendet.

$$\Delta E_i = \sqrt{\left(U^*_{r,i} - U^*_{k,i}\right)^2 + \left(V^*_{r,i} - V^*_{k,i}\right)^2 + \left(W^*_{r,i} - W^*_{k,i}\right)^2} \qquad (1.46)$$

Der spezielle Farbwiedergabeindex R_i für die einzelnen Testfarben wird mit dem nach Gl. 1.46 berechneten ΔE_i wie folgt bestimmt:

$$R_i = 100 - 4{,}6 \cdot \Delta E_i \qquad (1.47)$$

Der allgemeine Farbwiedergabeindex R_a ist der arithmetische Mittelwert aus den speziellen Farbwiedergabeindizes R_i für die Testfarben 1 bis 8. Er wird in Datenblättern auf die nächstgelegene ganze Zahl gerundet.

$$R_a = \frac{1}{8} \cdot \sum_{i=1}^{8} R_i \qquad (1.48)$$

Bereich: Planckscher Strahler			**Bereich: Tageslicht-Phase**		
Bezugslichtart P	u_r	v_r	Bezugslichtart D	u_r	v_r
P 2400	0,2777	0,3552	D_{5000}	0,2092	0,3254
P 2600	0,2671	0,3528	D_{5500}	0,2045	0,3205
P 2800	0,2582	0,3503	D_{6000}	0,2008	0,3161
P 3000	0,2506	0,3476	D_{6500}	0,1979	0,3123
P 3200	0,2440	0,3449	D_{7000}	0,1955	0,3088
P 3400	0,2383	0,3422	D_{7500}	0,1936	0,3057
P 3600	0,2333	0,3395	D_{8000}	0,1919	0,3030
P 3800	0,2289	0,3369	D_{8500}	0,1906	0,3005
P 4000	0,2251	0,3344	D_{9000}	0,1894	0,2983
P 4200	0,2217	0,3320	D_{10000}	0,1876	0,2946
P 4400	0,2187	0,3296	**Farbmesstechnische Normlichtarten**		
P 4600	0,2160	0,3274	A	0,2560	0,3495
P 4800	0,2136	0,3252	D_{65}	0,1978	0,3122

1.5 Physiologische und psychologische Grundlagen

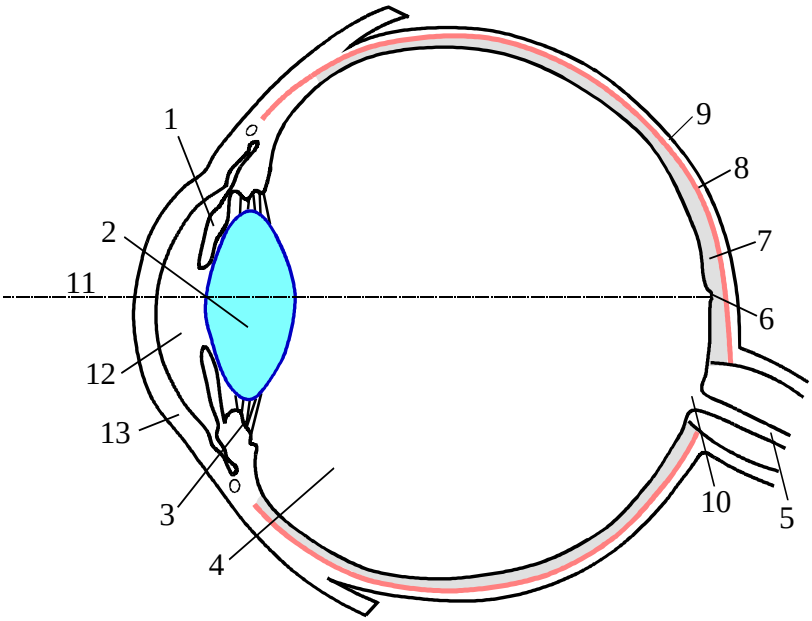
Das Sehen ist der wichtigste Sinn des Menschen. 80 % der Umweltinformationen nimmt der Sehtüchtige über die Augen auf.

Aufbau des Auges

Der Durchmesser des Augapfels beträgt beim Erwachsenen etwa 25 mm, die dingseitige Brechkraft (Reziprokwert der Brennweite) wird mit 58 dpt (1 dpt (Dioptrie) = 1/m) angegeben. Die Brennweite beträgt also 17 mm.

- Hornhaut: Sie ermöglicht, auf der Netzhaut ein Bild zu erzeugen.
- Augenkammer: Sie ist mit Kammerwasser gefüllt, das der Linse beim Akkomodieren auf unterschiedliche Gegenstandsweiten den nötigen Bewegungsspielraum gibt.
- Linse: Mit dem veränderlichen Krümmungsradius hat sie eine variable Brechkraft.
- Glaskörper: Er ist ebenfalls durchsichtig und dient zur Stabilisierung des Augapfels.
- Netzhaut: Sie ist der Träger der Empfangsorgane für die Lichtreize. Die 120 Millionen Stäbchen (farbuntüchtig) sind für das Nachtsehen (Leuchtdichtebereich < 0,03 cd/m^2) und die 7 Millionen Zäpfchen sind für das farbige Tagessehen (Leuchtdichtebereich > 30 cd/m^2) ungleichmäßig über die Netzhaut verteilt.

Das Gesichtsfeld reicht in der Senkrechten von etwa 120° bis 140° und in der Horizontalen mehr als 180°. Die Hellempfindung des menschlichen Auges ist nicht proportional zur Leuchtdichte. Der Verlauf entspricht einer Potenzfunktion. Die Hellempfindlichkeit beginnt bei Lichtreizen von 10^{-6} cd/m^2, die abhängig von der Lichtzusammensetzung wahrgenommen werden.



1 Pupille (Iris), 2 Linse, 3 Zilarmuskel, 4 Glaskörper, 5 Sehnerv, 6 Netzhautgrube (Fovea centralis), 7 Netzhaut (Retina), 8 Lederhaut, 9 Aderhaut, 10 blinder Fleck, 11 Blicklinie, 12 vordere Augenkammer, 13 Hornhaut

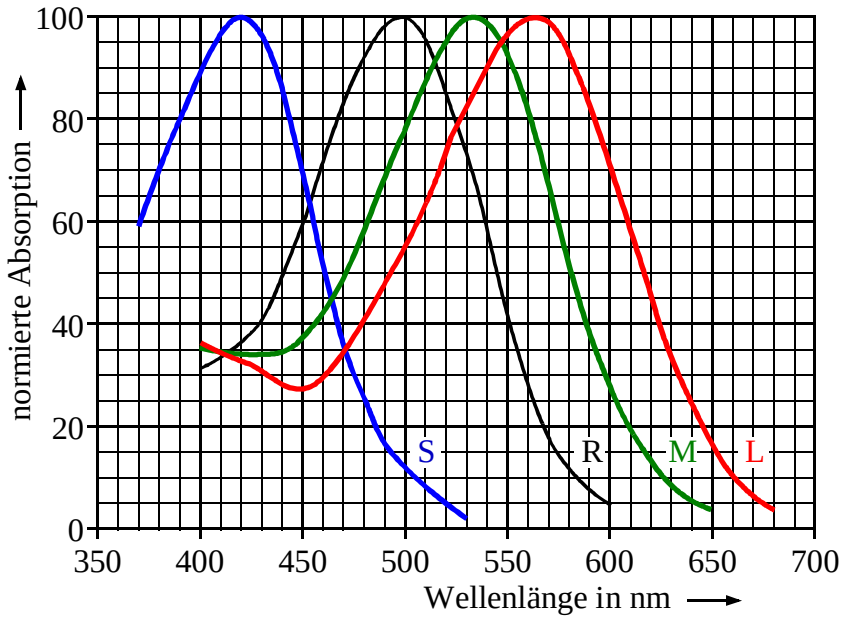
Querschnitt durch das menschliche Auge

Es gibt beim Menschen drei verschiedene Typen von Zapfen.

S-Zapfen (Short wavelength receptor):
Dieser Rezeptor deckt den Blau-Bereich des sichtbaren Farbspektrums ab, daher heißt er auch Blaurezeptor. Das Absorptionsmaximum liegt bei $\lambda \approx 420$ nm.

M-Zapfen (Medium wavelength receptor):
Das Absorptionsmaximum des Grünrezeptors liegt bei $\lambda \approx 534$ nm, er deckt einen Bereich zwischen blauem und orangem Licht ab.

L-Zapfen (Long wavelength receptor):
Sein Absorptionsmaximum liegt bei $\lambda \approx 564$ nm (gelbgrün). Trotz dieses Farbwertes wird er auch als Rotrezeptor bezeichnet, da er die Hauptleistung in der Wahrnehmung des Rotbereichs übernimmt.



Spektrale Absorptionskurven der drei Farbrezeptoren und der Stäbchen, normiert auf 100% des jeweiligen Rezeptors

Die spektralen Absorptionskurven beschreiben die Reizantwort der drei Farbrezeptoren in Abhängigkeit von der Wellenlänge des einwirkenden Lichtreizes.

Die Absorptionskurve eines Zapfentyps ist vom Bau des Opsins seines Sehpigments, dem Rhodopsin, abhängig. Die photochemische Transduktion, also die Umwandlung von Lichtsignalen in neuronale Informationen, funktioniert in Zapfen und Stäbchen gleich.

Die Summe der drei Absorptionskurven, die die Rezeptoren bestimmen, beschreibt die Spektrale Hellempfindlichkeitskurve für das Tagsehen (die V(λ)-Kurve), ihr Maximum liegt bei 555 Nanometer, der Farbe mittelgrün.

Stäbchen sind die Fotorezeptoren in der Netzhaut des Auges, die dem Sehen bei geringer Helligkeit, dem Skotopischen Sehen, Nachtsehen oder Dämmerungssehen, dienen. Mit diesen spezialisierten, sehr empfindlichen Sinneszellen wird ein Lichtsignal aus der Außenwelt in ein für das Gehirn verwertbares Signal umgewandelt. Stäbchen erlauben monochromatisches Sehen, da die Rezeptorzellen nur auf das Licht eines bestimmten Wellenlängenbereichs reagieren (Schwarz-Weiß-Sehen). Das Maximum für das Nachtsehen der Stäbchen liegt bei $\lambda \approx 498$ nm (blaugrün). Im Außenbereich der Netzhautmitte (5–6 mm) überwiegt die Zahl der Stäbchen, wodurch der Mensch bei Dämmerung in der Peripherie besser sieht als im Zentrum.

Adaption: Das Auge kann sich einem Leuchtdichtebereich von 10^{-6} cd/m^2 bis 10^5 cd/m^2 anpassen. Gute Sehleistungen werden zwischen 10^2 cd/m^2 und 10^4 cd/m^2 erreicht. Die Dunkel-Hell-Adaption erfolgt schnell. Die Hell-Dunkel-Anpassung erfolgt in 0,1 s; volle Zäpfchenadaption wird nach einigen Minuten erreicht, volle Stäbchenadaption erst nach einer Stunde.

Sehschärfe: Sie ist die Eigenschaft zwei eng benachbarte Linien getrennt wahrzunehmen. Dabei ist sie von der Leuchtdichte abhängig und nimmt bei älteren Menschen ab.

Akkomodation: Durch Veränderung der Brennweite der Linse können verschieden weit entfernte Gegenstände scharf auf der Netzhaut abgebildet werden. Bei Nahsicht ist die Linse kugelig (Jugendliche bis 10 cm, 50jährige etwa 50 cm) bei Weitsicht flacht sie ab.

Aberration: Bei seitlichem Lichteinfall wird das Licht entsprechend den unterschiedlichen Wellenlängen in der Linse gebrochen und führt so zur Unschärfebildung auf der Netzhaut (siehe auch Lichtbrechung beim Prisma).

Farbwahrnehmung: Ab einer Leuchtdichte $L > 0{,}003$ cd/m^2 (Reizschwelle) können Farben von den Zäpfchen wahrgenommen werden. Eine eindeutige Farberkennung ist ab $L > 3$ cd/m^2 möglich. Beste Farbunterscheidung wird ab $L > 100$ cd/m^2 erreicht.

Farbton: Der Farbton ist die Eigenschaft der Farbe, ob sie rot, grün, blau usw. empfunden wird.

Farbsättigung: Die Farbsättigung bestimmt, ob eine Farbe als satt oder blass erscheint.

Farbhelligkeit: Die Farbhelligkeit entspricht der Leuchtdichte in cd/m^2.

Im Leuchtdichtebereich von 16 cd/m^2 bis 3200 cd/m^2 können etwa 160 Farbtöne unterschieden werden. Das Auge arbeitet integrierend. Diese Eigenschaft wird beim Farbfernseher und beim Farbfilm auf der Basis der drei Grundfarben ausgenutzt.

Farbblindheit, die teilweise oder vollständig auftreten kann, stört das Farbempfinden oder es fehlt ganz (rot-grün-blind häufig; blau-gelb-blind selten).

Wirkungen des sichtbaren und unsichtbaren Lichtes auf den Menschen

Biologische Wirkungen: Die Sehnerven haben nicht nur Verbindung zum Sehzentrum im Gehirn, sondern auch zum Beispiel zur Zwirbeldrüse, die den Hormonhaushalt steuert und damit das Wohlbefinden beeinflusst. IR-Strahlung wirkt als Wärmewirkung auf die Haut, durch UV-Strahlung wird eine Hautbräunung erzielt und photochemische Reaktionen fördern die Produktion von lebenswichtigem Vitamin D.

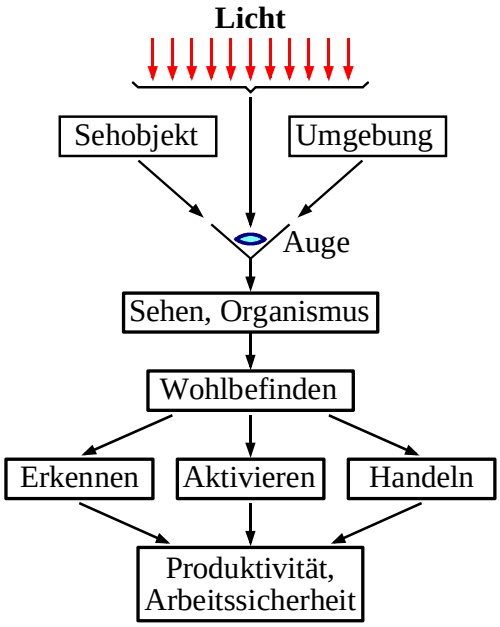
Helligkeitseindruck: Die Helligkeit eines Gegenstandes ist zwar von der photometrischen Größe Leuchtdichte abhängig. Flächen gleicher Leuchtdichte können eine unterschiedliche Hellempfindlichkeit bewirken. Beim Tagsehen ist der empfundene Helligkeitseindruck etwa dem Logarithmus der Leuchtdichte proportional.

Wahrnehmungskonstanz:

- Helligkeitskonstanz, auch wenn die Umgebungsbeleuchtungsstärke variiert.
- Farbkonstanz bezüglich der Beurteilung bei unterschiedlicher farblicher Umgebung.

Emotionale Wirkungen im Sinne der psychischen Stimmungslage bewirkt Licht (Wohlbefinden durch passende Beleuchtung).

Beleuchtung beeinflusst die Arbeitsbedingungen und kann zu Leistungssteigerungen genutzt werden. Die Beleuchtungsstärke muss den Tätigkeiten angepasst sein. Stark sehabhängige Tätigkeiten benötigen hohe Beleuchtungsstärken.



Einfluss der Beleuchtung auf den arbeitenden Menschen

E / lx	100	200	500	1000
einfache Tätigkeit	0	5 %	8 %	10 %
schwierige Tätigkeit	0	20 %	35 %	45 %

Leistungssteigerung gegenüber einer Beleuchtungsstärke von E = 100 lx