



Lichttechnisches Institut

Lichttechnisches Institut

Licht- und Displaytechnik Grundgrößen

von

Karsten Klinger

Wintersemester 2008/2009



- Strahlung
- Raumwinkel
- Spektrale Wirkungsfunktionen
- Lichttechnische Grundgrößen
- Photometrisches Entfernungsgesetz
- Beispielrechnung

Licht

- Elektromagnetische Strahlung
- Ausbreitungsgeschwindigkeit $c = 3 \cdot 10^8$ m/s
- Wellenlänge $\lambda = 380$ nm ... 780 nm

Charakterisierung

- Wellenlänge oder Frequenz
- Intensität

Monochromatische Strahlung

- Eng begrenzter Wellenlängenbereich
- Spektralfarbe

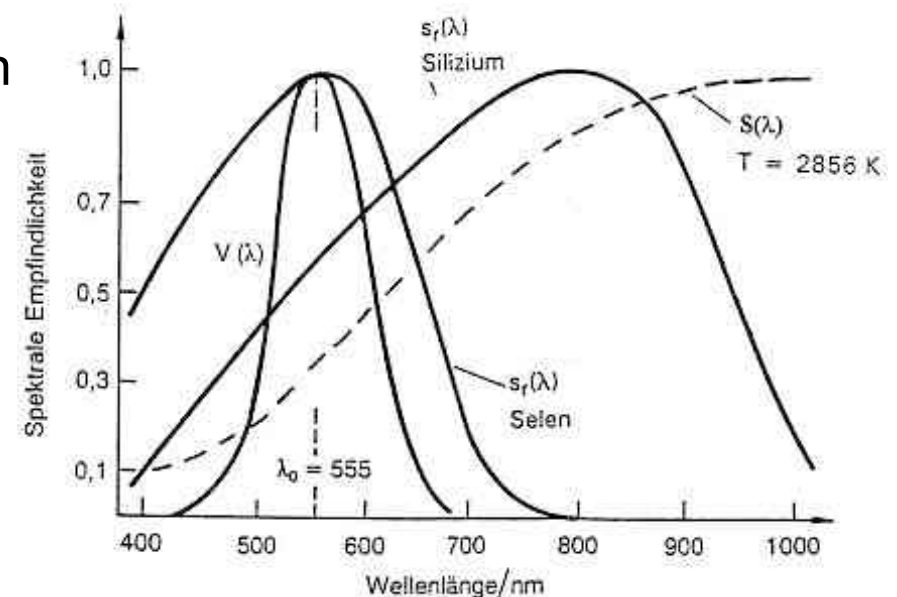
$$c = \lambda \cdot \nu$$

Spektrale Empfindlichkeiten von lichtempfindlichen Empfängern

Relative spektrale Stromempfindlichkeit
für die physikalischen Empfänger
Silizium und Selen

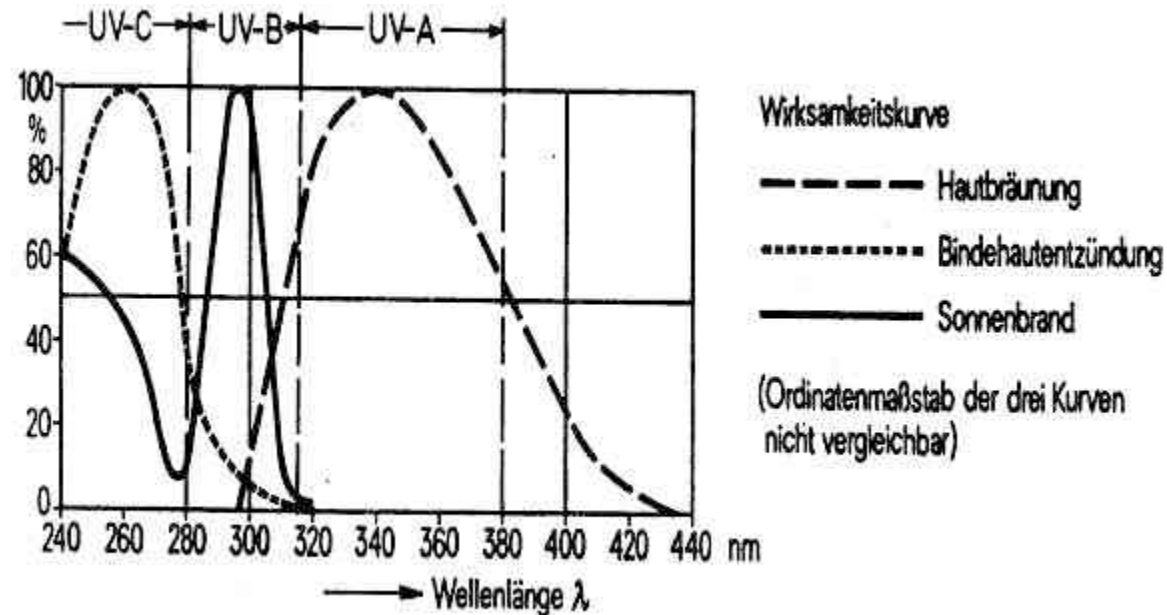
Spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion
des menschlichen Auges für das
Tagessehen, die sog. $V(\lambda)$ -Funktion

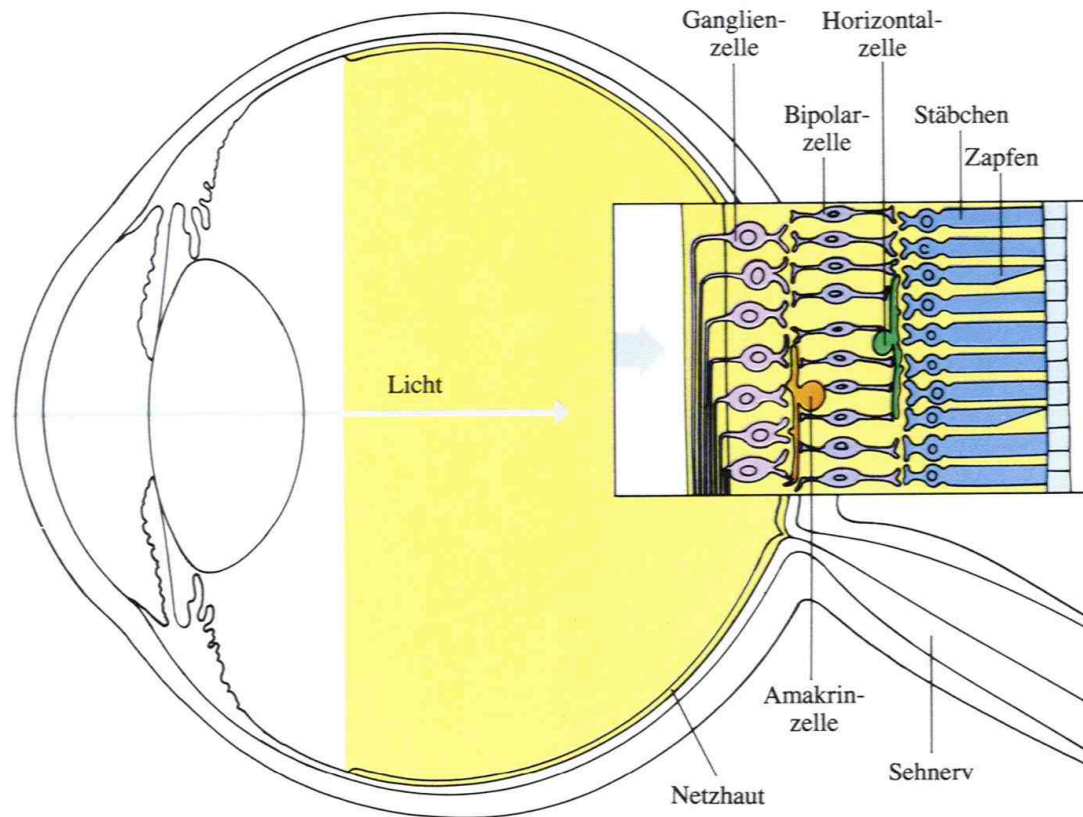
Relative spektrale Strahlungsleistung
 $S(\lambda)$ eines Temperaturstrahlers bei
einer Temperatur von 2856 K
(sog. Normlichtart A)



Wirkungsfunktionen

- Pflanzenwachstum
- Hautbräunung
- Helligkeitswirkung



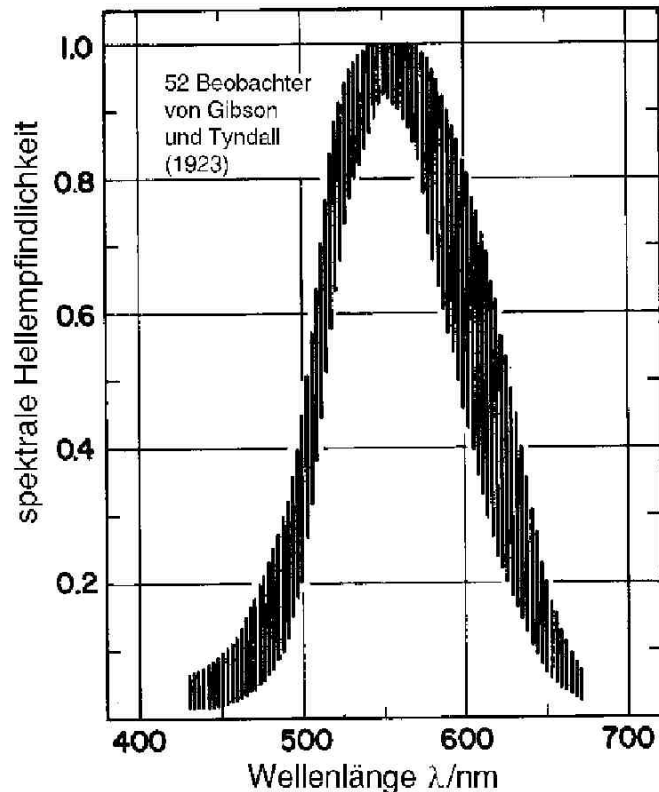


3.4 Der vergrößerte Netzhautausschnitt rechts veranschaulicht die räumlichen Verhältnisse in den drei Schichten der Retina. Überraschenderweise muß das Licht durch die Schichten der Ganglienzellen und Bipolarzellen hindurchstrahlen, bevor es die Stäbchen und Zapfen erreicht.

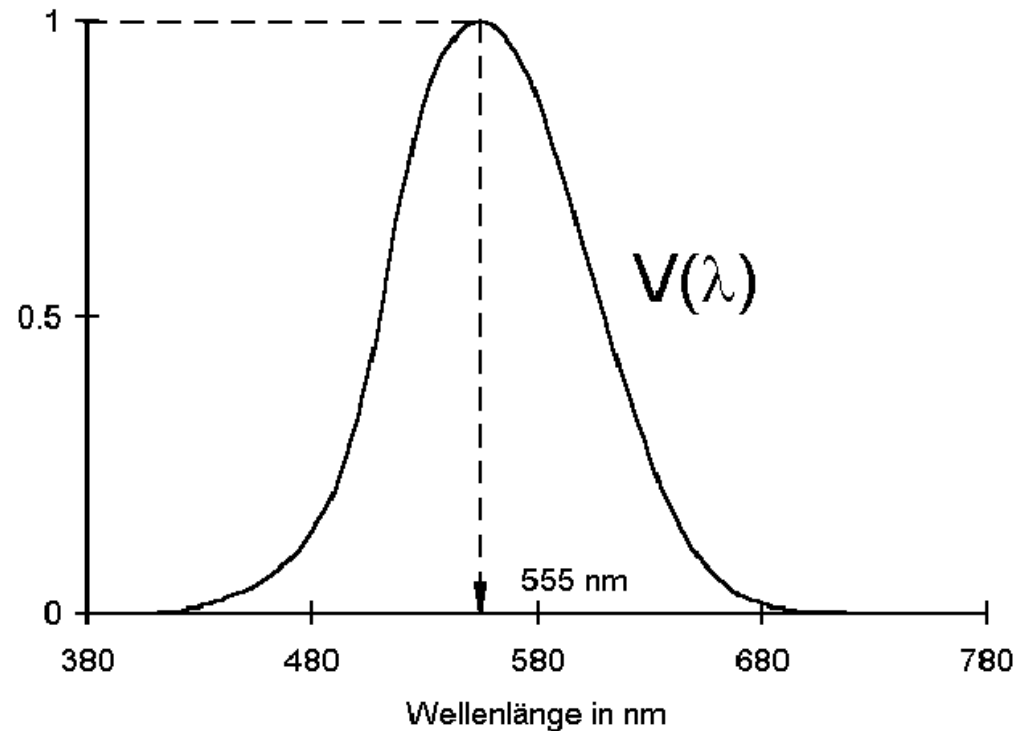
Spektrale Wirkungsfunktion, Helligkeit

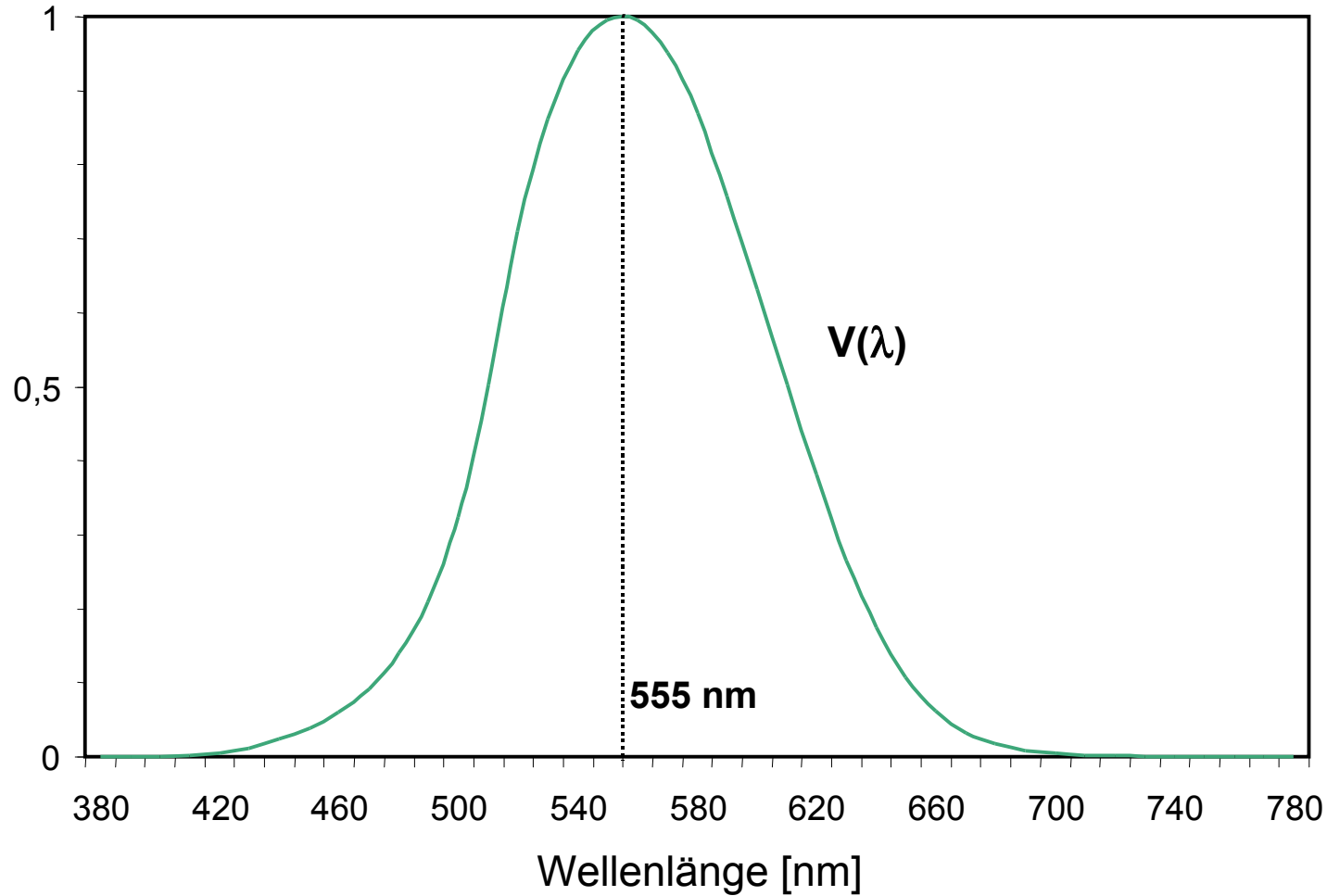
Relative spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges unter Tageslichtbedingungen (hell adaptiertes Auge)

Messwerte



Genormte Kurve





380	0,000039
390	0,000120
400	0,000396
410	0,001210
420	0,004000
430	0,011600
440	0,023000
450	0,038000
460	0,060000
470	0,090980
480	0,139020
490	0,208020
500	0,323000
510	0,503000
520	0,710000
530	0,862000
540	0,954000
550	0,994950
560	0,995000
570	0,952000
580	0,870000
590	0,757000
600	0,631000
610	0,503000
620	0,381000
630	0,265000
640	0,175000
650	0,107000
660	0,061000
670	0,032000
680	0,017000
690	0,008210
700	0,004102
710	0,002091
720	0,001047
730	0,000520
740	0,000249
750	0,000120
760	0,000060
770	0,000030
780	0,000015

Helmholtz-Kohlrausch Effekt:

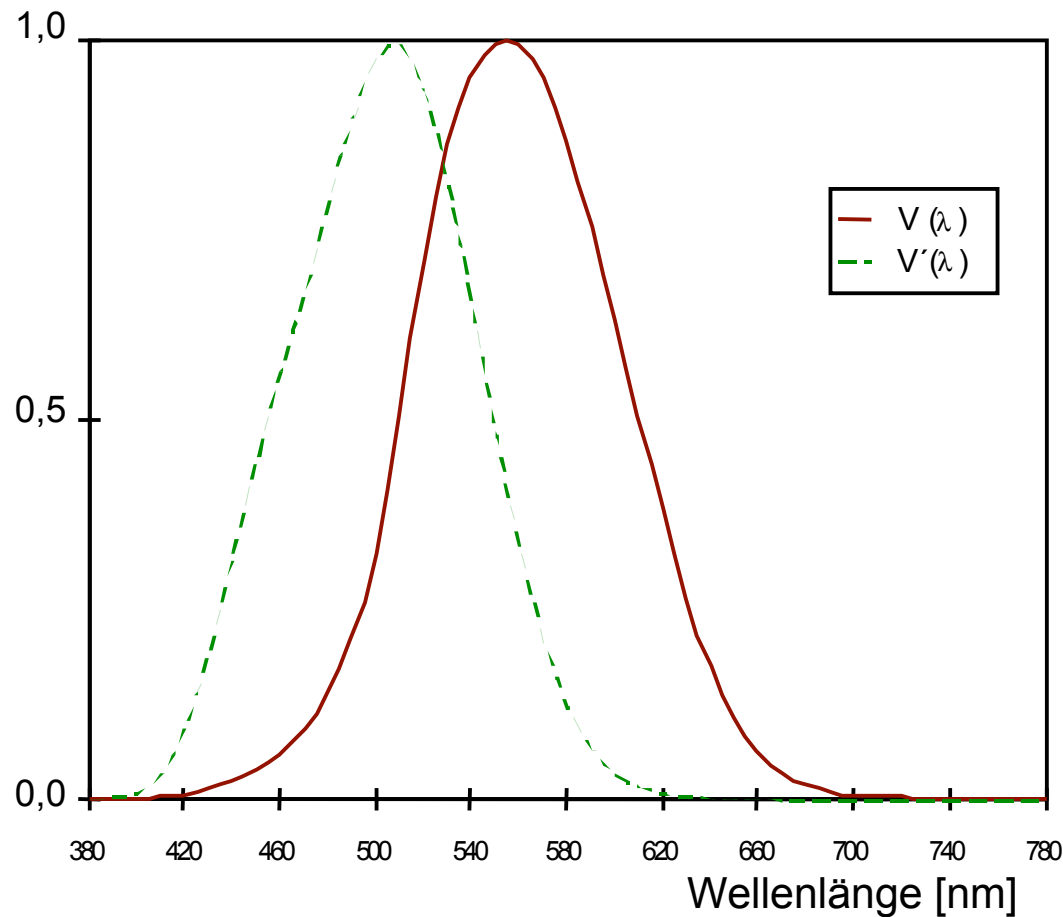
In $V(\lambda)$ nur achromatischer Anteil der Helligkeit enthalten



Bunte Strahlung wird heller, als unbunte Strahlung empfunden.

Purkinje - Effekt

Bei $V(\lambda)$ bewerteter Strahlung erscheint blau heller als rot

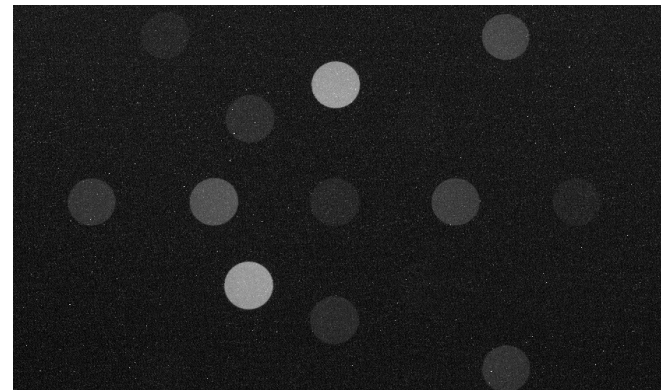
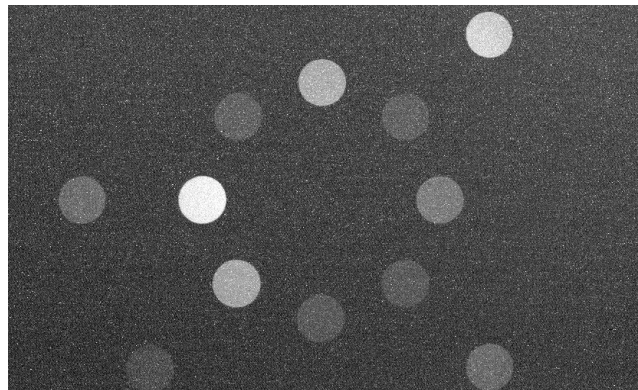
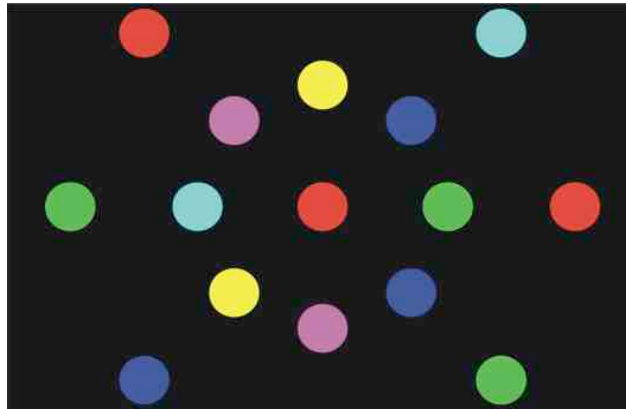


$V(\lambda)$: Tagessehen

$V'(\lambda)$: Nachtsehen

Purkinje

(1787-1869)



- $V'(\lambda)$ bewertetes Leuchtdichtebild
- Blaue Kreise heller
- Rote Kreise nicht mehr sichtbar

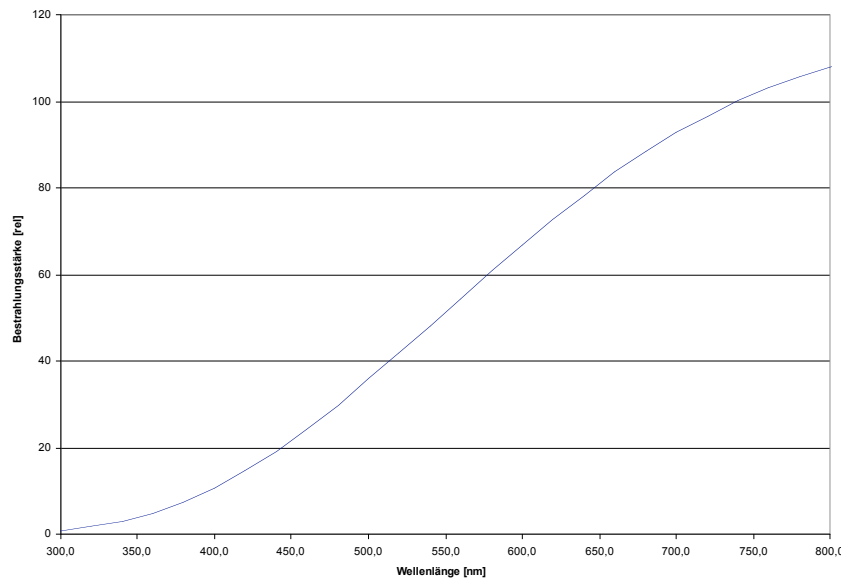
- $V(\lambda)$ bewertetes Leuchtdichtebild
- Blaue und rote Kreise kaum sichtbar
- Gelbe Kreise am hellsten

Strahlung

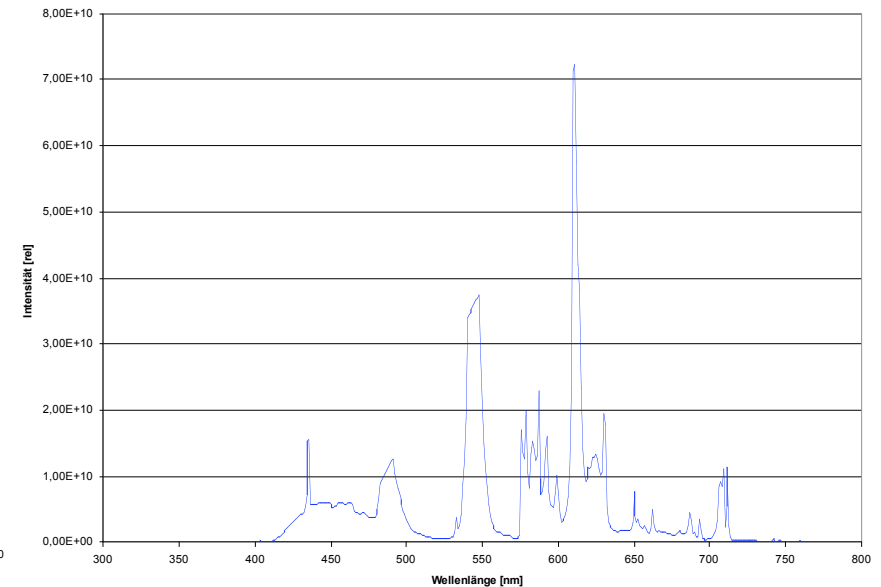
- monochromatische Strahlung
- Kontinuumsstrahlung

Spektrum

Glühlampe

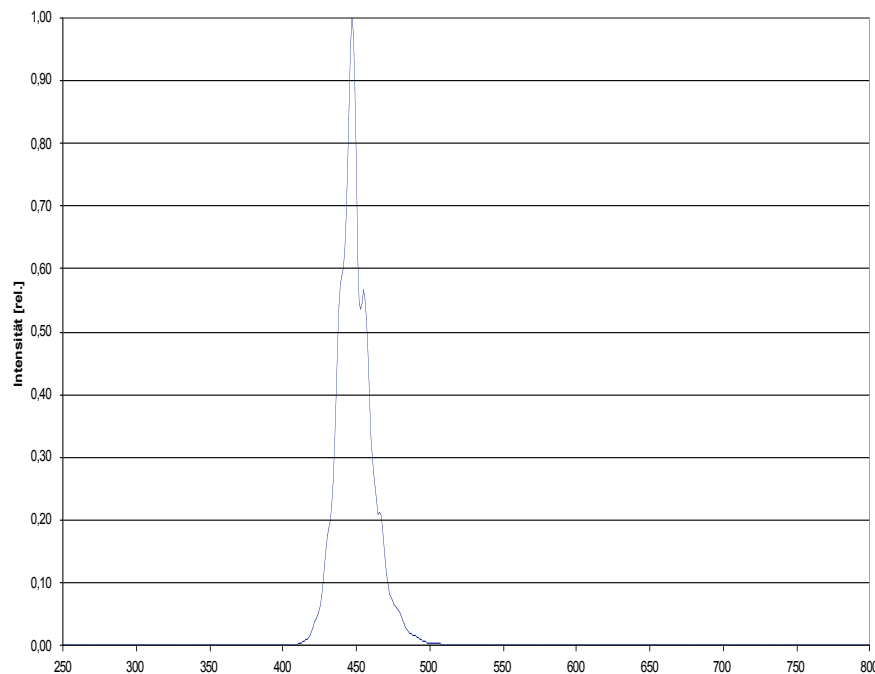


Leuchtstofflampe

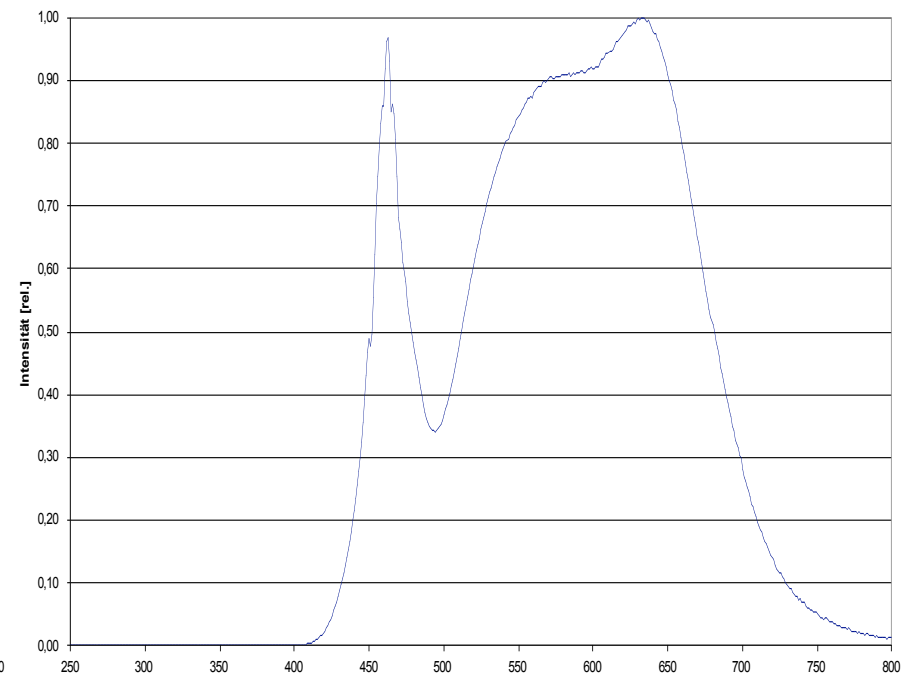


- Weitgehend monochromatische Strahlung
- Erzeugung von weissem Licht durch Leuchtstoffe oder Mehrchip-Farbmischung

Lumiled LED royalblau



Lumiled LED warmweiss

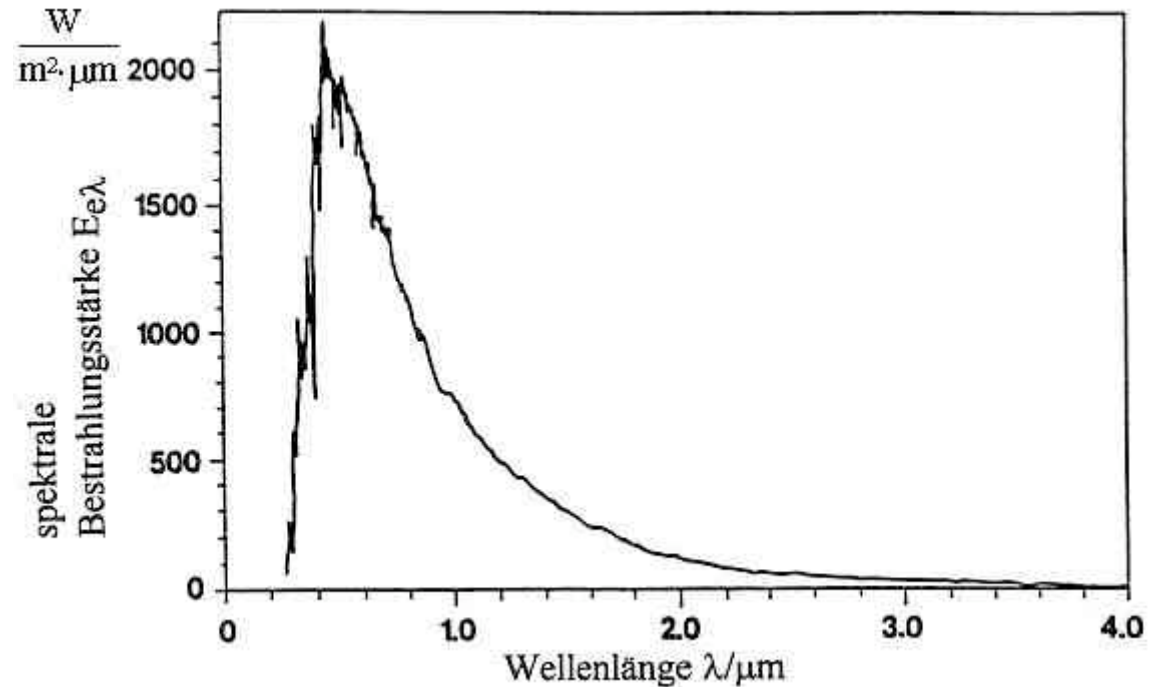


Extraterrestrische Bestrahlungsstärke

- 1.400 W/m²

Bestrahlungsstärke auf der Erdoberfläche

- 1.000 W/m²



Theoretisches Beispiel:

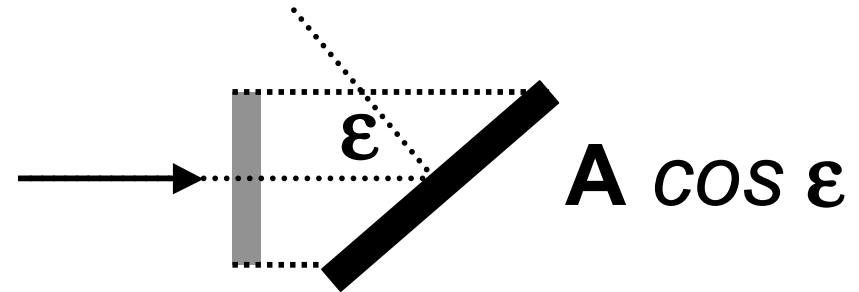
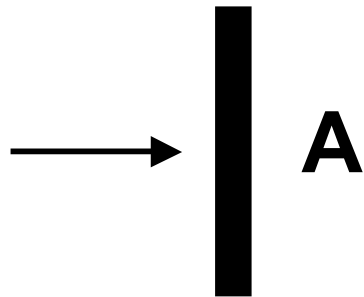
Blaue LED

- 3 W elektrisch
- 3 W optisch
- 400 nm
- 1 lm

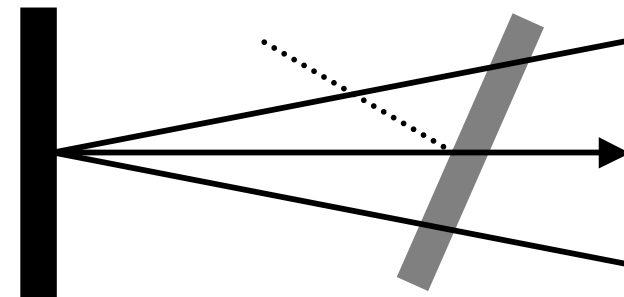
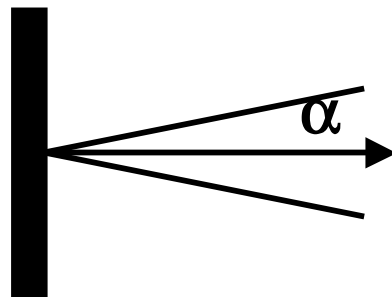
Grüne LED

- 1,5 mW elektrisch
- 1,5 mW optisch
- 550 nm
- 1 lm

Wirksame Fläche

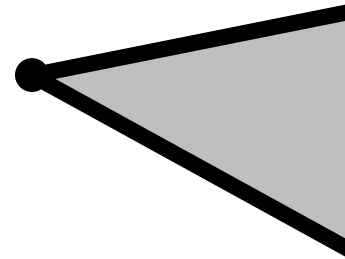


Ausstrahlwinkel



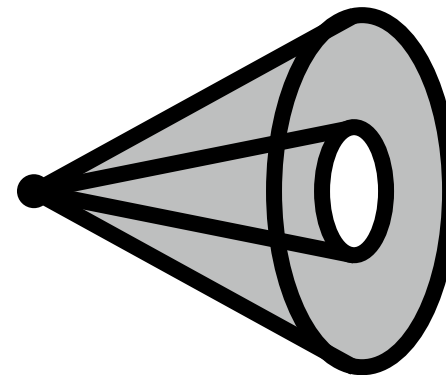
Ebener Winkel

- Mittelpunkt
- Zwei Geraden
- Umschließen eine Fläche

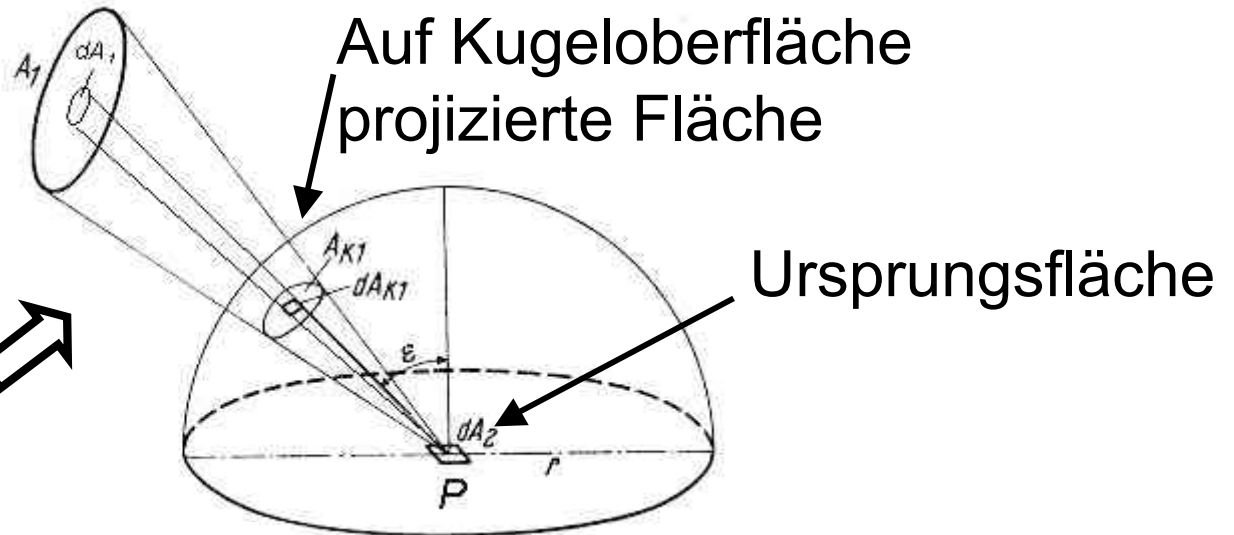


Raumwinkel

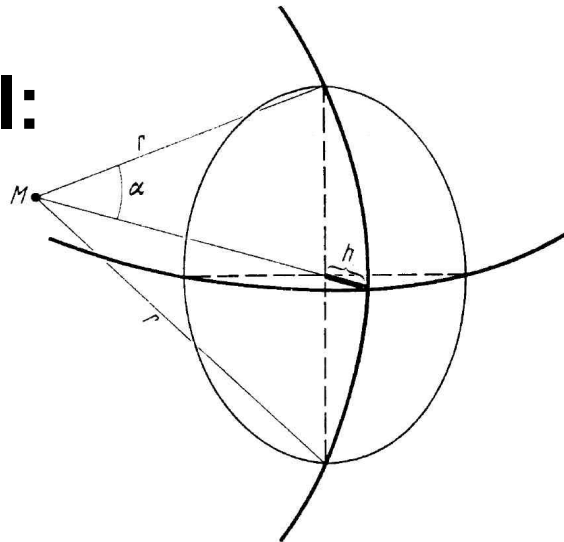
- Mittelpunkt
- Zwei Flächen / Kegeloberflächen mit gleicher Mittelachse
- Umschließen ein Volumen



Strahlung tritt
aus Fläche aus



Detail:



Kugeloberflächenabschnitt

$$\Omega = \frac{A_K}{r^2} \times sr$$

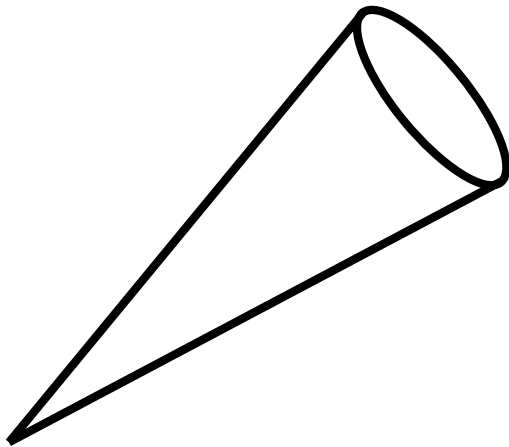
Raumwinkel:

Quotient aus

Fläche der Kugelkalotte

durch

Quadrat des Kugelradius



Name: Raumwinkel

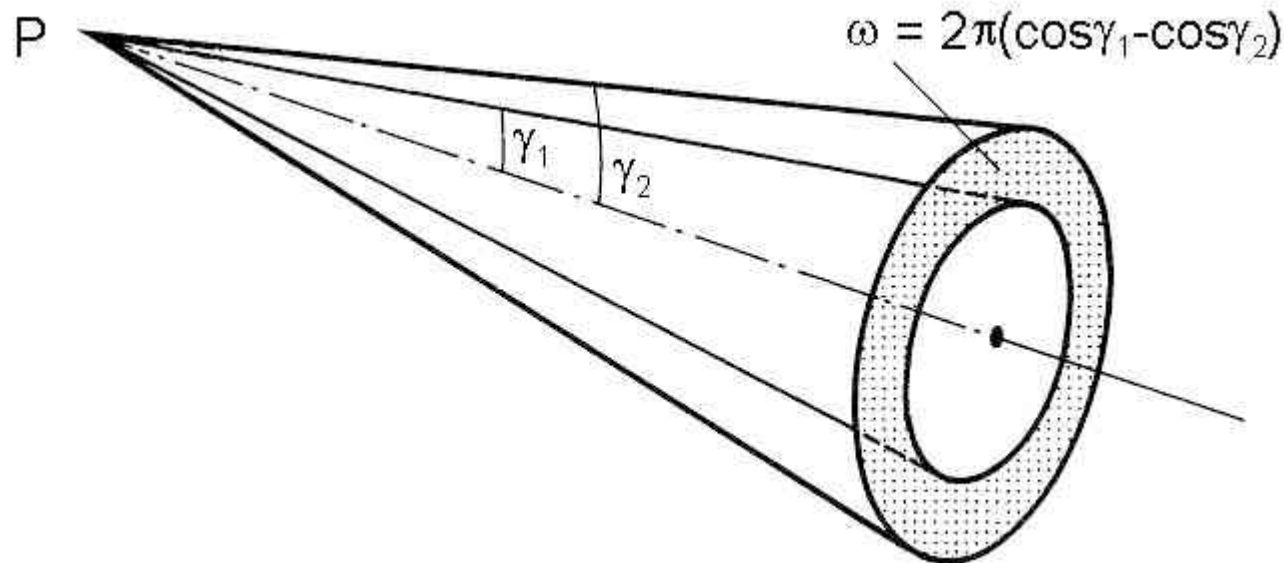
Einheit: Steradian [sr]

Zeichen: Ω oder ω [Omega]

Einheitsraumwinkel

$$\Omega_0 = 1 \text{ sr}$$

$$\omega = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} \sin \vartheta \, d\vartheta \, d\varphi = 2\pi (\cos \vartheta_1 - \cos \vartheta_2)$$



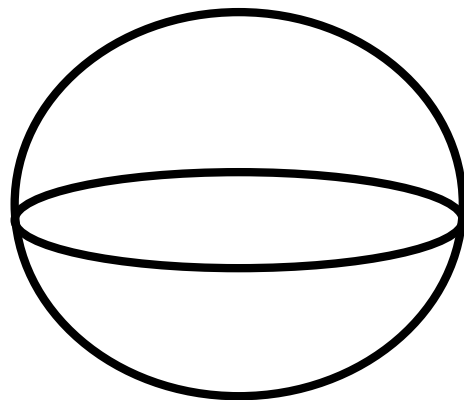
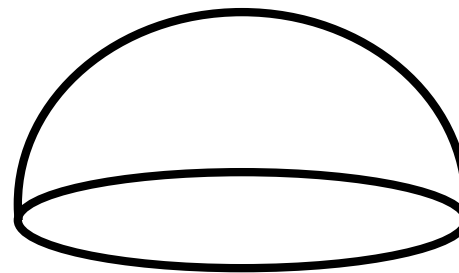
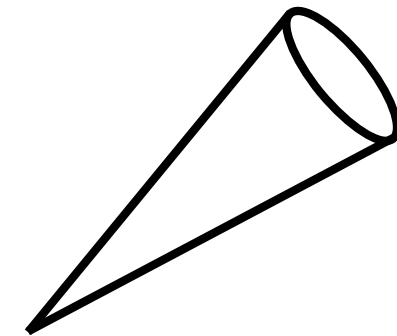
Vollraum

 $4\pi \text{ sr}$

Halbraum

 $2\pi \text{ sr}$ Kreiskegel mit $\alpha=32^\circ 46'$

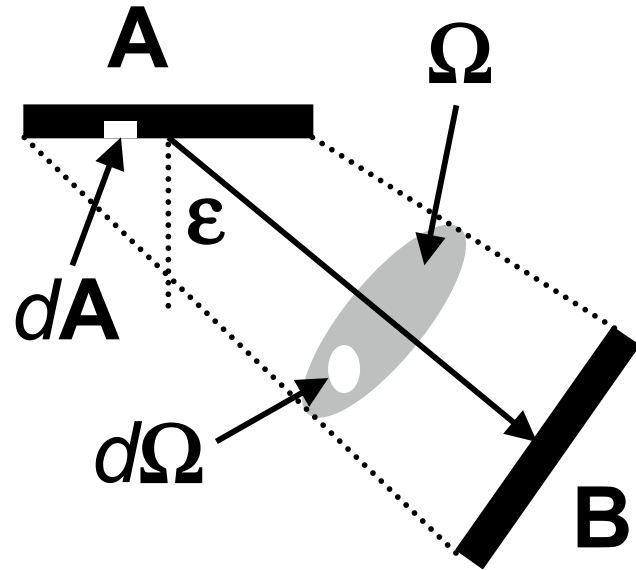
1 sr

 $4\pi \text{ sr}$  $2\pi \text{ sr}$ 

1 sr

Fläche A mit Leuchtdichte L

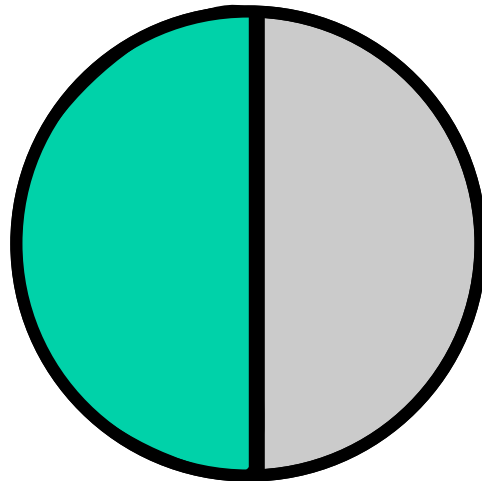
$$\Phi = \int_{\Omega} \int_A L \cdot dA \cdot \cos \varepsilon \cdot d\Omega$$



Beschreibt den Strahlungsaustausch zwischen den beiden Flächen A und B.

Abgleich farbiger Strahlung mit weißer Strahlung

Direktabgleich



Weißer (grauer) Strahlung wird von der Versuchsperson gleichhell wie farbige Strahlung eingestellt.

Candela (cd)

- Einheit der Lichtstärke
- Eine der 7 Basiseinheiten des internationalen SI-Systems
- Einzige Basiseinheit nicht rein physikalischer Natur
- Beruht auf physiologischen Eigenschaften

Lichttechnische Größen sind spektral bewertete Größen

$$X = K \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X_{e\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda$$

Definition der Lichteinheit

Lichtstärke von 1 cd

Lichtstärke einer Strahlungsquelle in einer bestimmten Richtung, die eine Frequenz von $5,40 \cdot 10^{14}$ Hz aussendet und deren Strahlstärke $1/683$ W/sr beträgt.

In Luft entspricht eine Frequenz von $5,40 \cdot 10^{14}$ Hz einer Wellenlänge von 555 nm, bei der $V(\lambda) = 1$ ist.

Maximales photometrische Strahlungsäquivalent

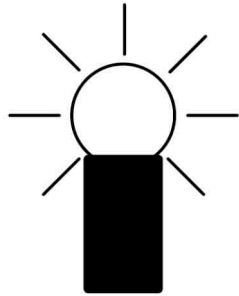
$$K_m = 683 \text{ lm/W}$$

Bewertungsgröße X

- Keine Wirkungsgröße
- Empfindungsgröße hängt nicht linear mit Reiz zusammen
- Bewertungsgröße hängt monoton mit Empfindungsgröße zusammen

Lichttechnische Größen genügen Äquivalenzrelationen

Verschiedenfarbige Strahlungen die **gleichhell** erscheinen, erhalten die gleiche lichttechnische Maßzahl.



Name: Lichtstrom

Einheit: Lumen [lm]

Zeichen: Φ [Phi]

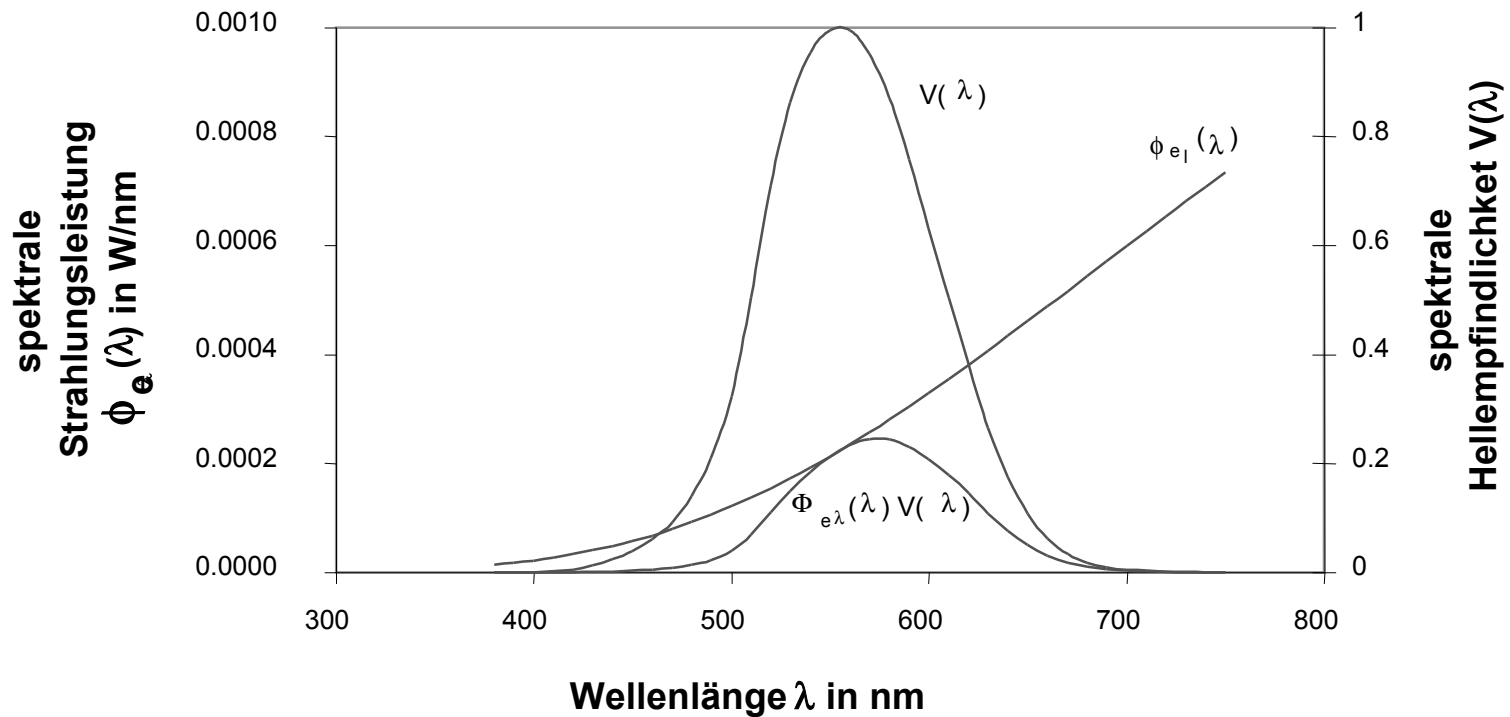
$$\Phi = K_m \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$$

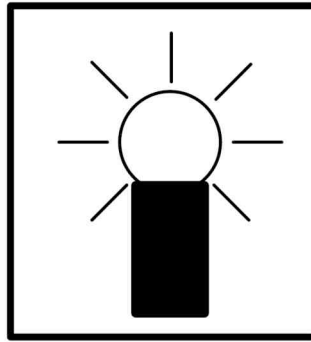
Konstante $K_m = 683 \text{ lm/W}$

Lichtstrom - Zahlenwerte

Lampentyp	Lampenlichtstrom
LED	60 lm
Allgebrauchslampe 100 W	1380 lm
Standard Leuchtstofflampe 36 W, Lichtfarbe weiß	2850 lm
Standard Quecksilberdampf- Hochdrucklampe 125 W	6300 lm
Standard Natriumdampf- Hochdrucklampe 70 W	4600 lm

Schwarzer Strahler

Temperatur $T = 2500 \text{ K}$, Fläche $A = 1 \text{ mm}^2$ Ergebnis: $\phi = 17,7 \text{ lm}$ 



$$I = \frac{\Phi}{\omega}$$

Name: Lichtstärke

Einheit: Candela [cd]

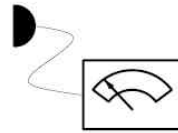
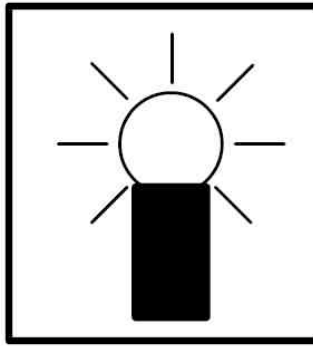
Zeichen: I

Name: Raumwinkel

Einheit: Steradian [sr]

Zeichen: ω [Omega]

Lichtquelle	Lichtstärke
Kerze	1 – 2 cd
Glühlampe 100 W	10^2 cd
Fernlicht	10^4 cd
Mond	10^{17} cd
Sonne	10^{27} cd



Name: Beleuchtungsstärke

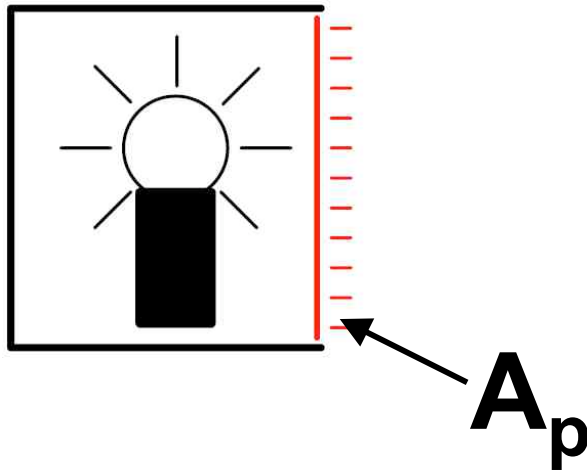
Einheit: Lux [lx]

Zeichen: E

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \varepsilon$$

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

Art der Umgebung	Beleuchtungsstärken
Im Freien bei klarer Atmosphäre und hohem Sonnenstand	bis ca. 120 000 lx
Diffuser Himmel	5000 - 20 000 lx
Gut beleuchtete Büro-Arbeitsräume	500 - 1000 lx
Operationsfeld Beleuchtung	bis 100 000 lx
Im Freien bei Mondlicht	etwa 0,5 lx



Name: Leuchtdichte

Einheit: Candela pro
Quadratmeter
[cd/m²]

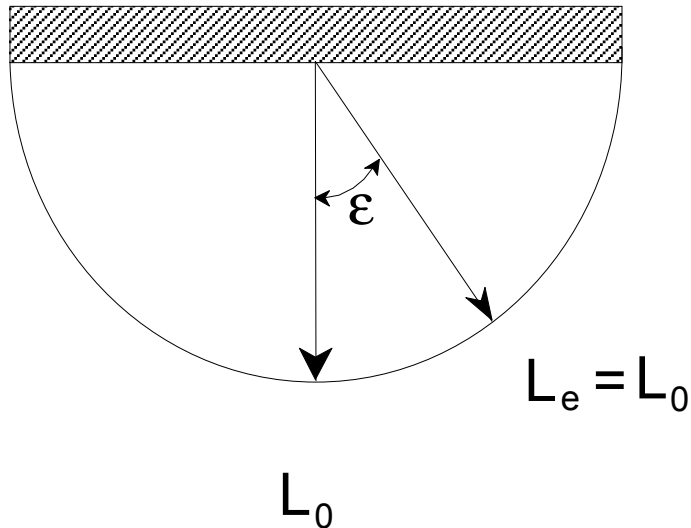
Zeichen: L

$$L = \frac{\Phi}{A_p \Omega}$$

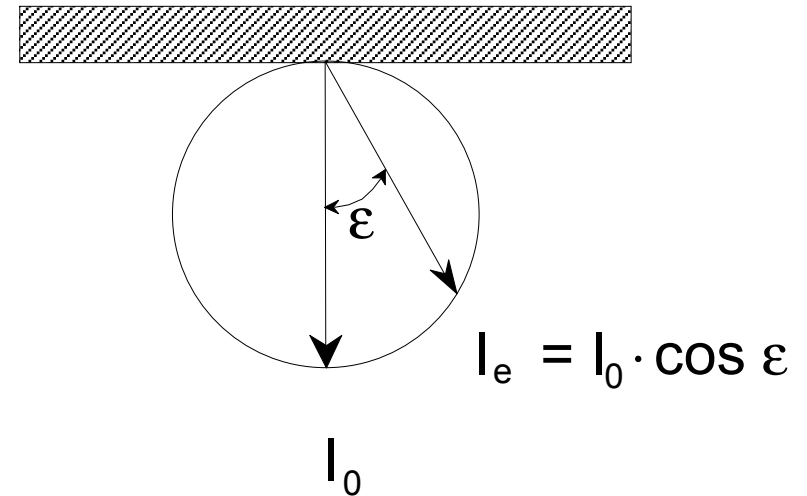
$$L = \frac{I}{A_p}$$

Lichtquelle	Leuchtdichte
Sonne	$1,5 \cdot 10^9 \text{ cd/m}^2$
Bedeckter Himmel	$5 \cdot 10^3 \text{ cd/m}^2$
LED-Bremsleuchten	10^5 cd/m^2
Leuchtstofflampen	10^4 cd/m^2
Arbeits- und Raumflächen gut beleuchteter Arbeitsräume	20 ... 200 cd/m^2
Nächtliche Straßenbeleuchtung (Fahrbahn)	0,5 ... 2 cd/m^2
Nächtlicher Himmel im Freien	$10^{-3} \dots 10^{-4} \text{ cd/m}^2$

Lambertstrahler



Die Leuchtdichte ist
winkelunabhängig.



Die Lichtstärke ist
winkelabhängig.

- Lichtquellen mit richtungsunabhängiger Leuchtdichte
- Vollkommen streuend reflektierende, matte Flächen

Eingeführt von Johann Heinrich Lambert im Jahr 1760.

Photometrischen Grundgesetz:

$$\Phi = \int_{\Omega} \int_A L \cdot dA \cdot \cos \varepsilon \cdot d\Omega$$

$dA \cos \varepsilon$: Wirksame Fläche

Mit $E = \frac{\Phi}{A}$ und gleichmäßiger Leuchtdichte ergibt sich:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} = L \int_{\Omega} \cos \varepsilon \cdot d\Omega$$

Für den ganzen Halbraum:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} = L \cdot \Omega_p$$

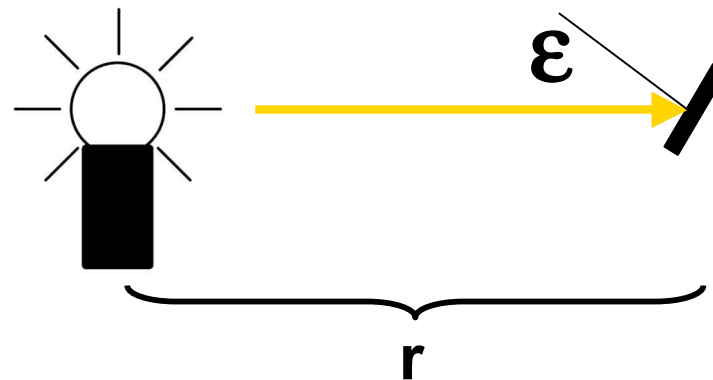
Photometrisches Entfernungsgesetz, Formel

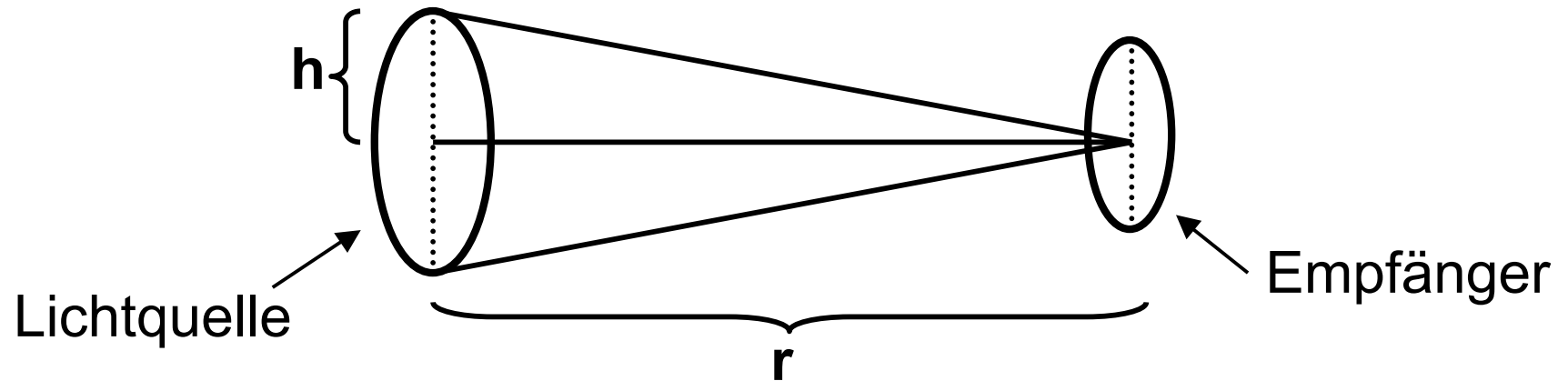
$$E = L \cdot \Omega \quad \oplus \quad I = L \cdot A \quad \oplus \quad \Omega = \frac{A}{r^2}$$

$$E = \frac{I}{r^2}$$



$$E = \frac{I}{r^2} \cos \varepsilon$$





$$\frac{r}{h} = \sqrt{\frac{1-\delta}{\delta}}$$

δ	δ [%]	r / h
0,001	0,1	31,6
0,005	0,5	14,1
0,01	1	9,95
0,03	3	5,69
0,05	5	4,36
0,1	10	3,00

Umrechnung

Objekt: Glühlampe

Leistung

$$P = 100 \text{ W}$$

Lichtstrom

$$\Phi = 1400 \text{ lm}$$

Raumwinkel

$$\Omega = 4\pi$$

Lichtstärke

$$I = \Phi / \Omega \quad \quad \quad \mathbf{I \approx 100 \text{ cd}}$$

Durchmesser

$$d = 0,055 \text{ m}$$

Fläche

$$A_p \approx 0,002 \text{ m}^2$$

Leuchtdichte

$$L = I / A_p \quad \quad \quad \mathbf{L \approx 50.000 \text{ cd} / \text{m}^2}$$

Abstand Arbeitsfläche

$$r = 1 \text{ m}$$

Beleuchtungsstärke

$$E = I / r^2 \quad \quad \quad \mathbf{E = 100 \text{ lx}}$$

Leuchtdichte

$$L = \rho E / \Omega_p \quad \quad \quad \Omega_p = \pi$$
$$\mathbf{L \approx 10 \text{ cd} / \text{m}^2}$$

α	A	Alpha	ι	I	Jota	$\rho \varrho$	P	Rho
β	B	Beta	κ	K	Kappa	$\sigma \varsigma$	Σ	Sigma
γ	Γ	Gamma	λ	Λ	Lambda	τ	T	Tau
δ	Δ	Delta	μ	M	My	ν	Y	Ypsilon
$\epsilon \varepsilon$	E	Epsilon	ν	N	Ny	$\phi \varphi$	Φ	Phi
ζ	Z	Zeta	ξ	Ξ	Xi	χ	X	Chi
η	H	Eta	\omicron	O	Omikron	ψ	Ψ	Psi
$\theta \vartheta$	Θ	Theta	$\pi \varpi$	Π	Pi	ω	Ω	Omega