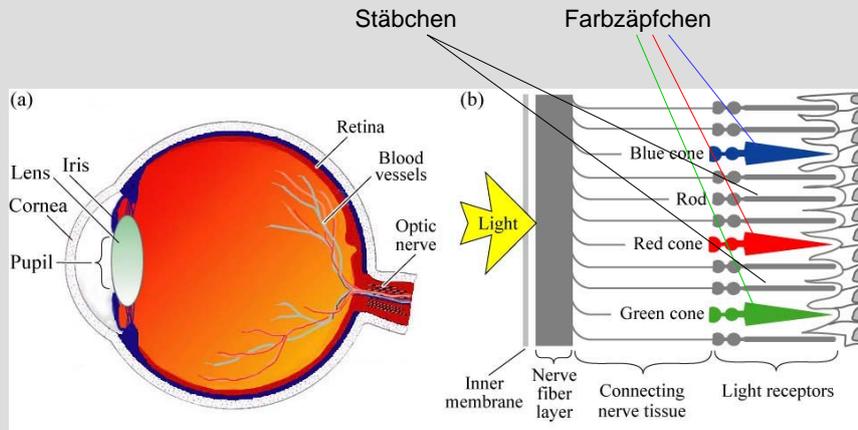


## 09 LED-Farbempfindlichkeit des Auges

1



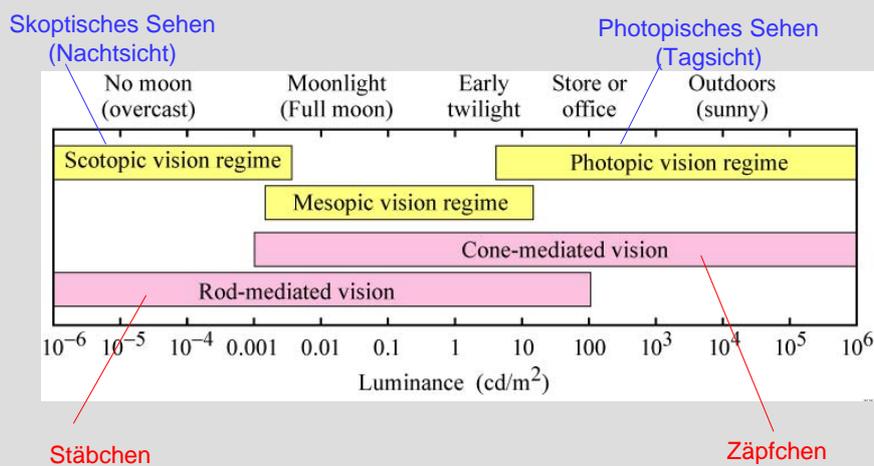
(a) Cross section through a human eye. (b) Schematic view of the retina including rod and cone light receptors (adapted from Encyclopedia Britannica, 1994).

apl.Prof. Dr. D.J. As

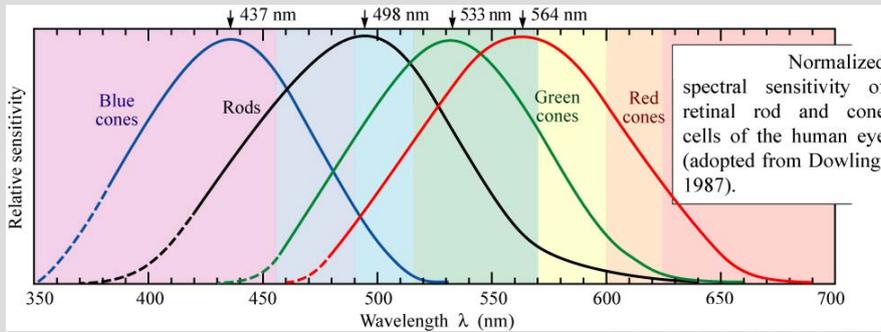
## Licht Rezeptoren des menschlichen Auges

2

Ungefährer Bereich der Sichtbarkeit und der Rezeptorenbereiche



apl.Prof. Dr. D.J. As



Skoptisches Sehen (Nachtsicht) ist unempfindlicher im roten Spektralbereich

apl.Prof. Dr. D.J. As

### Candela

aus Wikipedia, der freien Enzyklopädie

**Candela** (lateinisch für *Talg-, Wachslicht*) ist die photometrische SI-Basiseinheit der Lichtstärke.

Eine isotrope Lichtquelle der Lichtstärke  $I = 1$  Candela strahlt einen Lichtstrom von  $d\Phi = 1$  Lumen pro Raumwinkel  $d\Omega = 1$  Steradian:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

Candela gibt somit die Lichtstärke an, die von einer Lichtquelle in eine bestimmte Richtung emittiert wird – im Gegensatz zum Lichtstrom (gemessen in Lumen), welcher die abgestrahlte Gesamlichtmenge beziffert. Beide Größen sind nach der spektralen Wahrnehmungsfähigkeit des menschlichen Auges gewichtet.

Eine Haushaltskerze emittiert einen Lichtstrom von ca. 12,566 Lumen. Dieser verteilt sich isotrop in alle Raumrichtungen, also auf die Einheitskugeloberfläche  $S = 4\pi$ . Somit hat eine Kerze eine Lichtstärke von

$$I = \frac{12,566 \text{ lm}}{4 \cdot \pi \text{ sr}} \approx 1 \frac{\text{lm}}{\text{sr}} = 1 \text{ cd}$$

#### Physikalische Definition

Ein Candela ist die Lichtstärke (Lichtstromdichte) einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz  $540 \cdot 10^{12}$  Hertz, entsprechend einer Wellenlänge  $\lambda$  von ca. 555 nm, mit einer Leistung von  $\frac{1}{683}$  Watt pro Steradian (Raumeinheitswinkel) aussendet.

	Einheit
Norm	SI-Einheitensystem
Name	<b>Candela</b>
Einheitenzeichen	cd
Beschriebene Größe(n)	Lichtstärke
Formelzeichen der beschriebenen Größe(n)	I <sub>v</sub>
In SI-Einheiten	SI-Basiseinheit
Benannt nach	lat. <i>candela</i> (Talg-, Wachslicht)



apl.Prof. Dr. D.J. As

**Radiometrie** ist die Wissenschaft von der Messung elektromagnetischer Strahlung und ihre Anwendung in Physik, Astronomie und Geophysik. Sie ist mit der Fotometrie (Lichtmessung) verwandt und stellt ihre Erweiterung in die Bereiche des Infraroten und Ultravioletten, aber auch der Gammastrahlen dar.

	Photometrische Größe	SI-Einheit (Zeichen)	Bemerkung	radiometrische Entsprechung	
(luminous energy)	Lichtmenge	Lumen·Sekunde (lm·s)		Strahlungsmenge	(radiant energy)
(luminous flux or power)	Lichtstrom	Lumen (lm)	Strahlungsleistung einer Lichtquelle	Strahlungsfluss	(radiant flux)
(luminous intensity)	Lichtstärke	Candela (cd)	Für eine räumlich isotrop strahlende Lichtquelle, z.B. eine Punktlichtquelle, ist der Lichtstrom gleich der Lichtstärke, multipliziert mit $4\pi$	Strahlstärke	(radiant flux)
(illuminance)	Beleuchtungsstärke	Lux (lx)	Mit zunehmender Beleuchtungsstärke nimmt der Helligkeitseindruck einer Referenzfläche zu	Bestrahlungsstärke	(irradiance)
(luminance)	Leuchtdichte	Candela pro Quadratmeter (cd/m <sup>2</sup> )	Die Größe, die in den meisten Fällen die Hellempfindung hervorruft	Strahläichte	(radiance)

apl.Prof. Dr. D.J. As

**Lichtstärke  $I$**  (luminous intensity)

SI-Einheit: Candela; abgekürzt: cd

Die Lichtstärke einer Lichtquelle gibt an, wieviel Licht sie in eine ausgewählte Richtung und ein sehr kleines Raumwinkel-Element emittiert.

**Lichtstrom  $\Phi$**  (luminous flux)

SI-Einheit: Lumen; abgekürzt: lm

Der Lichtstrom einer Lichtquelle gibt an, wieviel Licht sie in alle Richtungen des umgebenden Raumes emittiert.

**Lichtstärkeverteilungskörper  $I(\theta, \phi)$**

SI-Einheit: Candela/Lumen; abgekürzt: cd/lm

Der Lichtstärkeverteilungskörper einer Lichtquelle gibt an, wie sich die Lichtstärke in alle Richtungen des umgebenden Raumes ändert. Die Darstellung ist dabei meist normiert auf einen bestimmten Lichtstrom.

**Lichtmenge  $Q$**  (luminous energy)

SI-Einheit: Lumen-Stunden; abgekürzt: lm·h

Die Lichtmenge einer Lichtquelle gibt an, wieviel Lichtstrom in einer bestimmten Zeitspanne (z.B. der Lebensdauer der Lichtquelle) emittiert wird.

apl.Prof. Dr. D.J. As

**Lichtausbeute  $\eta$**  (luminous efficacy)

SI-Einheit: Lumen pro Watt; abgekürzt: lm/W

Die Lichtausbeute einer Lichtquelle gibt den Wirkungsgrad an, wie die aufgenommene elektrische Leistung in Lichtstrom umgesetzt wird.

**Beleuchtungsstärke  $E$** SI-Einheit: Lux; abgekürzt: lx (lux=lm/m<sup>2</sup>)

Die Beleuchtungsstärke gibt an, wieviel Lichtstrom einer Lichtquelle auf einem Flächenelement auftrifft.

**Belichtung  $H$** 

SI-Einheit: Lux-Sekunden; abgekürzt: lx·s

Die Belichtung gibt an, wieviel Beleuchtungsstärke von einer Lichtquelle innerhalb einer bestimmten Zeitspanne auf einem Flächenelement erzeugt wurde.

**Leuchtdichte  $L$** abgeleitete SI-Einheit: Candela pro Quadratmeter; abgekürzt: cd/m<sup>2</sup> (cd=lm/sr)

Die Leuchtdichte eines Flächenelementes gibt an, mit wieviel Lichtstärke es in eine bestimmte Richtung wirkt.

**Farbwertanteile (Farbort)**

SI-Einheit: (1, 1); abgekürzt: entfällt

Die Farbwertanteile ( $x, y$ ) des Lichts einer Quelle kennzeichnen eindeutig ihre Farbe durch die Koordinaten eines Punktes in der Farbtafel; zu jedem Punkt können aber unterschiedliche Lichtquellen gehören.**(ähnlichste) Farbtemperatur  $T_n$** 

SI-Einheit: Kelvin; abgekürzt: K

Die Farbtemperatur einer Lichtquelle gibt die Temperatur eines Planck'schen Strahlers (Hohlraumstrahler) an, der gleiche Farbwertanteile wie die Strahlung der Lichtquelle hat. Ähnlichste Farbtemperatur gilt entsprechend für Planck-Strahlung, deren Farbort kleinsten Abstand zum Farbort der Lichtquelle hat.

**Farbwiedergabe-Index  $R_a$** 

SI-Einheit: 1; abgekürzt: entfällt

Der Farbwiedergabe-Index  $R_a$  des Lichts einer Quelle hat Werte bis 100 und gibt an, wie die Farbwiedergabe mit derjenigen Planck'scher Strahlung entsprechender Farbtemperatur übereinstimmt, z. B.  $R_a > 99$  für Halogen-Glühlampen

Lichtmenge    Lichtstrom    Lichtstärke

Die obere Zeile von links nach rechts gelesen bedeutet:

$$Q \rightarrow \frac{d}{dt} \rightarrow \Phi \rightarrow \frac{d}{d\Omega} \rightarrow I$$

$$\downarrow \qquad \qquad \downarrow \qquad \qquad \downarrow$$

$$\frac{d}{dA_2} \qquad \qquad \frac{d}{dA_2} \qquad \qquad \frac{d}{dA_1}$$

$$\downarrow \qquad \qquad \downarrow \qquad \qquad \downarrow$$

$$H \rightarrow \frac{d}{dt} \rightarrow E \rightarrow \frac{d}{d\Omega} \rightarrow L$$

Die Lichtmenge  $Q$  partiell nach der Zeit  $t$  abgeleitet ergibt den Lichtstrom  $\Phi$ , dessen partielle Ableitung nach dem Raumwinkel  $\Omega$  ergibt die Lichtstärke  $I$ . In gleicher Art sind die anderen durch Pfeile angedeuteten Relationen zu lesen. Bei den weiteren partiellen Ableitungen muß unterschieden werden zwischen Strahler- und Empfängerfläche  $A_1$  bzw.  $A_2$ .

Belichtung    Beleuchtungsstärke    Leuchtdichte

Bezeichnung: Formelzeichen	Definition	Name der Einheit	Einheitenumformung
Lichtstrom: $\Phi_v$ (luminous flux)	$\Phi_v = K_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \frac{\partial \Phi_e(\lambda)}{\partial \lambda} \cdot V(\lambda) d\lambda$	Lumen (lm)	$1 \text{ lm} = 1 \text{ sr} \cdot \text{cd}$
Raumwinkel: $\Omega$	$\Omega = \frac{A}{r^2}$	Steradian (sr)	$1 \text{ sr} = 1 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^2} = \frac{[\text{Fläche}]}{[\text{Radius}^2]}$
Beleuchtungsstärke: $E$	$E = \frac{\partial \Phi}{\partial A}$	Lux (lx)	$1 \text{ lx} = 1 \frac{\text{lm}}{\text{m}^2} = 1 \frac{\text{sr cd}}{\text{m}^2}$
Leuchtdichte: $L$ (luminance)	$L = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \Omega \cdot \partial A_1 \cdot \cos \varepsilon_1}$	keine eigene Einheit	$1 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2} = 1 \frac{\text{lm}}{\text{sr m}^2}$
Lichtstärke (Photometrie): $I_v$ (luminous intensity)	$I = \frac{\partial \Phi}{\partial \Omega}$	Candela (cd)	$1 \text{ cd} = 1 \frac{\text{lm}}{\text{sr}}$

**Lichtstrom** (Unit:lm)

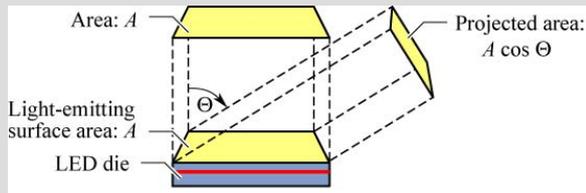
$$\Phi_{lum} = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \int_{\lambda} V(\lambda) P(\lambda) d\lambda$$

**Luminous efficacy** (Unit:lm/W)  
(Konversionseffizienz von opt. Leistung in Lichtstrom)

$$\frac{\Phi_{lum}}{P} = \left( 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \int_{\lambda} V(\lambda) P(\lambda) d\lambda \right) / \left( \int_{\lambda} P(\lambda) d\lambda \right)$$

**Luminous efficiency** (Unit:lm/W)  
(Lichtausbeute - Lichtstrom aus elektr. Leistung)

$$\eta = \Phi_{lum} / (IV)$$



Area of LED,  $A$ , and projected area,  $A \cos \Theta$ , used for the definition of the luminance of an LED.

Die Leuchtstärke einer LED mit „Lambert’scher Abstrahlcharakteristik“ hängt ebenfalls vom Winkel  $\Theta$  entsprechend eines Cosinusgesetzes ab. Deshalb ist die Leuchtdichte (luminance) einer LED unabhängig vom Winkel.

Beleuchtungsbedingung	Beleuchtungsstärke
Vollmond	1 lux
Straßenbeleuchtung	10 lux
Raumbelichtung	30 – 300 lux
Schreibtischbeleuchtung	100 – 1000 lux
Operationstisch	10000 lux
Direktes Sonnenlicht	100000 lux

## Luminanz (Leuchtdichte bei Monitoren)

aus Wikipedia, der freien Enzyklopädie

Die **Luminanz** ( $Y$ ) oder Bildhelligkeit ist der Begriff in der Videotechnik, der als Maß für die Lichtstärke in Candela pro Fläche in Quadratmeter verwendet wird.

Im Gegensatz zur Leuchtdichte ( $L$ ) wird bei der Luminanz die gerichtete Strahlung betrachtet.

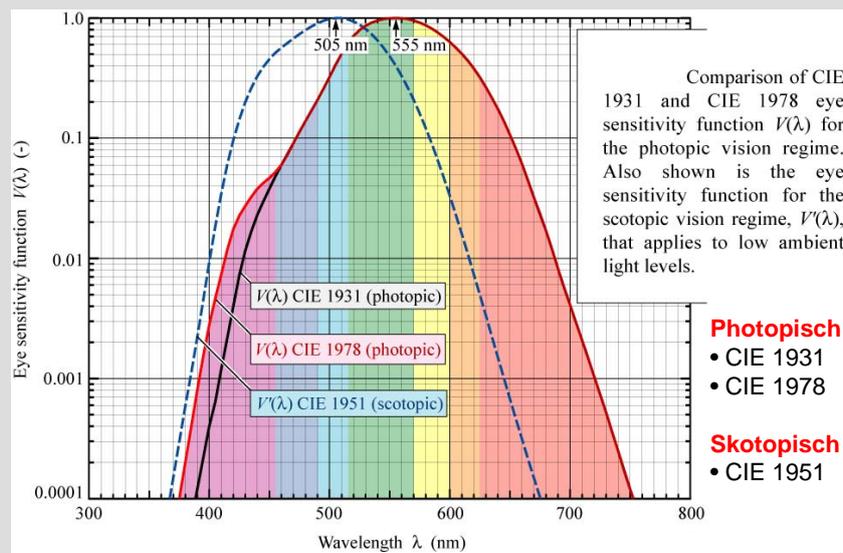
Bei sowohl analogen als auch digitalen Bilddaten werden die Begriffe Luminanz und Luma verwendet. Das Wort Luma wurde 1953 vom NTSC eingeführt. Luminanz ist eine gewichtete Summe von linearen RGB-Komponenten und ist somit proportional zur Intensität.

Gewichtung beim analogen PAL-Farbfemesehssystemen (YUV):  $Y = 0,299(R) + 0,587(G) + 0,114(B)$ .

Gewichtung in digitalen PAL- und NTSC-Systemen (YCbCr nach CCIR 601), in HDTV-Systemen (z.B. ITU-R BT.709) und bei anderen JPEG- bzw. MPEG-basierten digitalen Bild- und Videosystemen (z.B. DVD-Video):  $Y = 0,2126 R' + 0,7152 G' + 0,0722 B'$ .

apl.Prof. Dr. D.J. As

## Photopische und Skotopische Augenempfindlichkeit

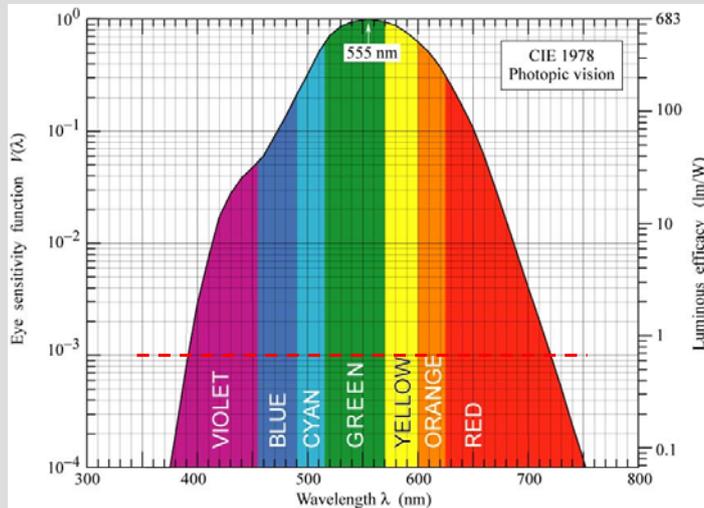


(CIE = Commission Internationale de l'Eclairage)

apl.Prof. Dr. D.J. As

## Augenempfindlichkeit $V(\lambda)$ nach CIE 1978 (Tagsicht)

15



- Visible range: 390 – 720 nm
- **Definition of lumen:** Green light (555 nm) with power 1 W of has luminous flux 683 lm
- **Efficacy of radiation** gives number of lumens per optical Watt
- Amongst LEDs with same output power, green LEDs are brightest

Eye sensitivity function,  $V(\lambda)$ , (left ordinate) and luminous efficacy, measured in lumens per Watt of optical power (right ordinate).  $V(\lambda)$  is greatest at 555 nm. Also given is a polynomial approximation for  $V(\lambda)$  (after 1978 CIE data).

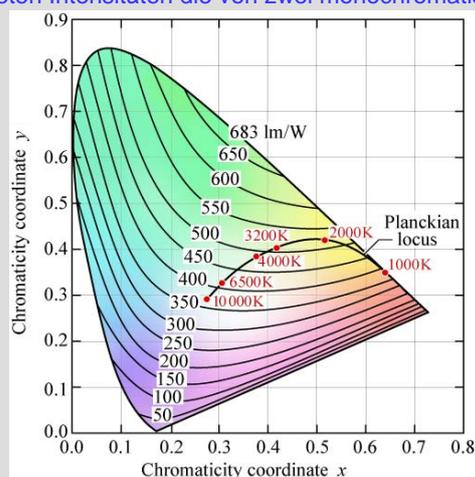
apl.Prof. Dr. D.J. As

## Leistungsverteilung mit der größt möglichen Lichtausbeute

16

(MacAdam 1950)

Diese Limit kann nur auf eine Art erreicht werden: nämlich durch die Mischung von geeigneten Intensitäten die von zwei monochromatischen Lichtquellen emittiert wird.



Relation of maximum possible luminous efficacy (lumens per optical Watt) and chromaticity in the CIE 1931  $x, y$  chromaticity diagram (adopted from MacAdam, 1950).

Die maximale Lichtausbeute von weißem Licht hängt von der Farbtemperatur ab, sie ist 420 lm/W bei einer Farbtemperatur von 6500 K und 500 lm/W bei ~4000 K.

apl.Prof. Dr. D.J. As

Lichtquelle	Lichtausbeute
Edisons 1. Glühbirne (C-filament)	1.4 lm/W
Wolfram-Glühbirne	15-20 lm/W
Quarz Halogenlampe	20-25 lm/W
Fluoreszenzlampe	50-80 lm/W
Metall Halogenlampe	80-125 lm/W
Hochdruck Natriumdampflampe	100-140 lm/W