

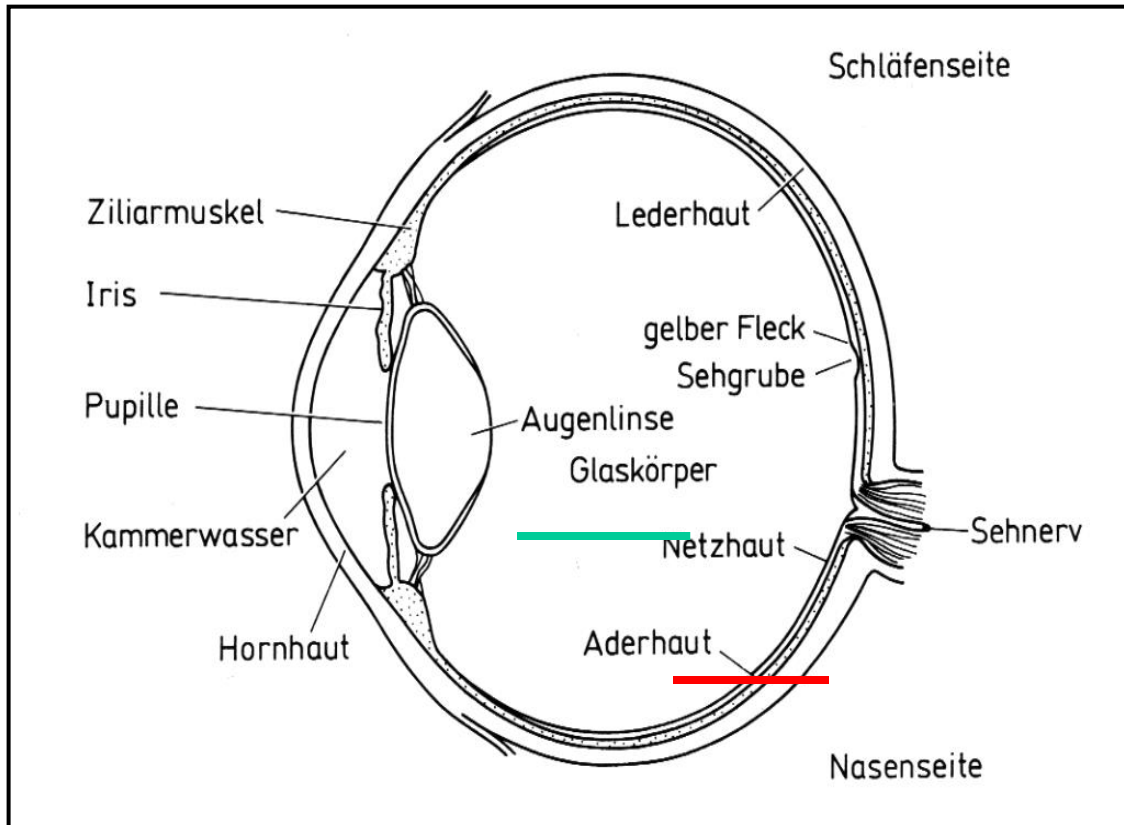
2. Lichttechnische Begriffe

Inhalt

- 2.1 Der Sehvorgang**
- 2.2 Spektrale Augenempfindlichkeit**
- 2.3 Radiometrische Strahlungsgrößen**
- 2.4 Photometrische Lichtgrößen**
- 2.5 Energie- und Lichteffizienz**
- 2.6 Farbkoordinaten**
- 2.7 Farbtemperatur**
- 2.8 Farbwiedergabe**
- 2.9 Additive Farbmischung**
- 2.10 Subtraktive Farbmischung**

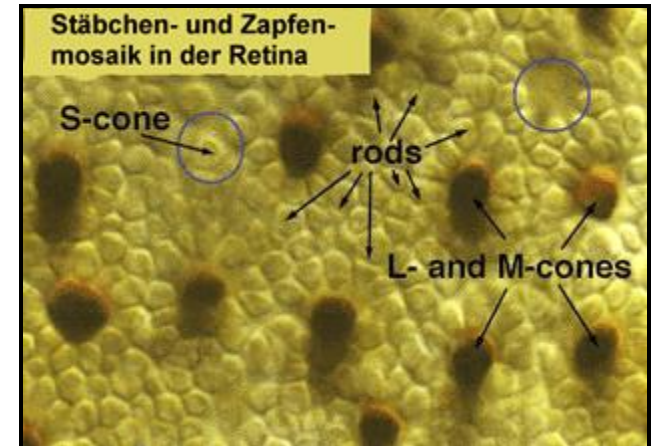
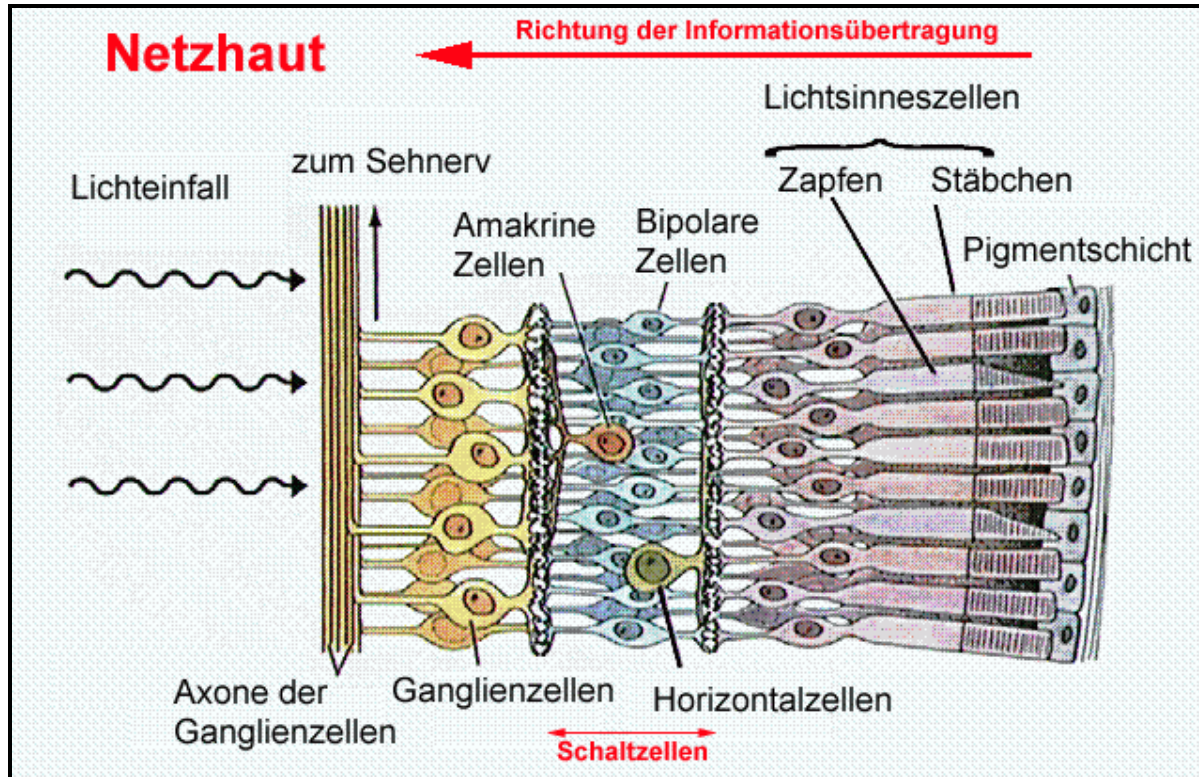
2.1 Der Sehvorgang

Schematischer Aufbau des menschlichen Auges



2.1 Der Sehvorgang

Aufbau der Netzhaut (Stäbchen und Zapfen)



Stäbchen (rods)

→ Schwarz-weiß sehen, d.h. Form und Helligkeit eines Gegenstandes

Zapfen (L-, M-, S-cones) Anteil

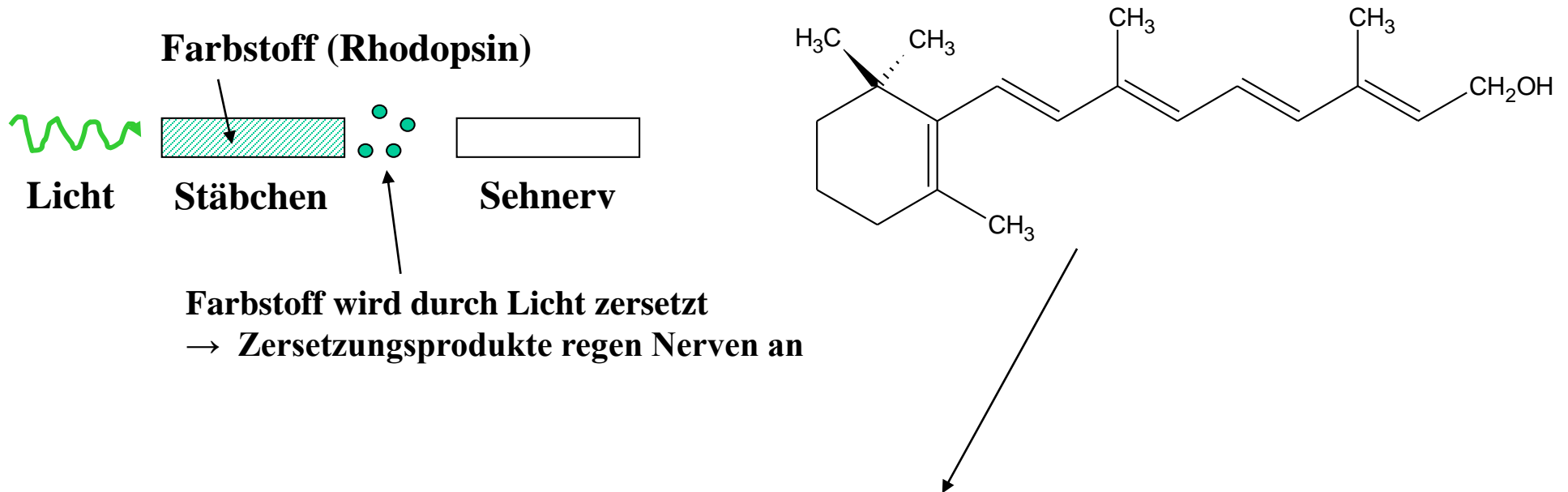
S	420 nm	1
M	534 nm	10
L	564 nm	20

→ Farben sehen

Netzhaut ~ 100 Millionen Nervenzellen

2.1 Der Sehvorgang

Der Prozess des Sehens (Bsp.: Stäbchen → S/W Sehen)



Farbstoff der Stäbchen: Rhodopsin.

Schon durch 2-3 Photonen kann ein Rhodopsin-Molekül zersetzt werden.

Rhodopsin wird durch Licht in ein Protein (Opsin) und Vitamin A (all-trans Retinol) zersetzt. Das all-trans-Retinol wird dann zum 11-cis –Retinol isomerisiert, das dann wiederum mit Opsin zum Rhodopsin reagiert.

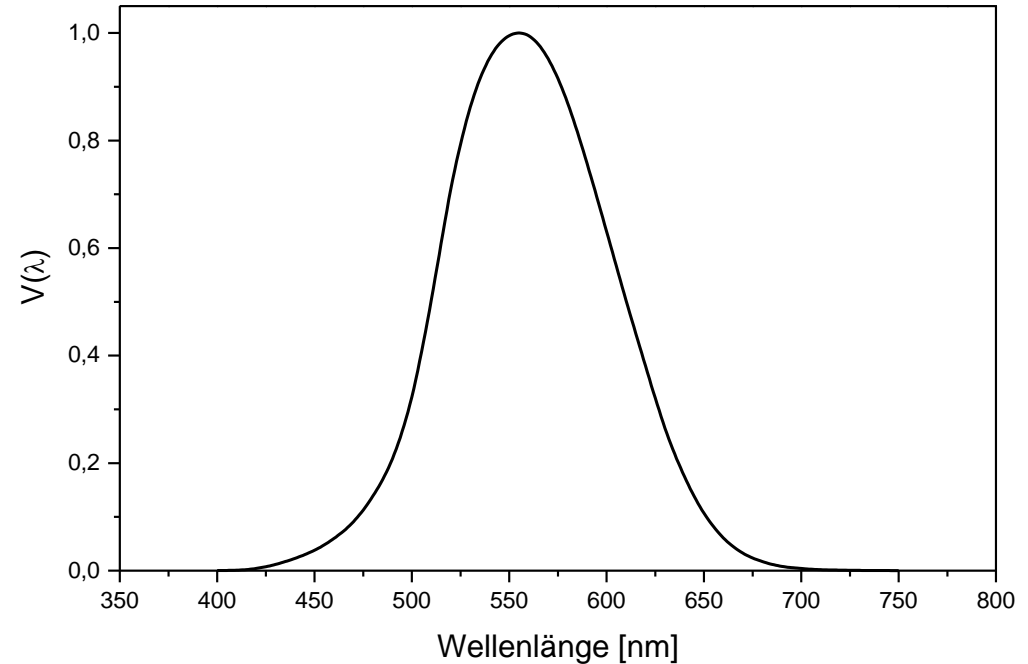
2.2 Spektrale Augenempfindlichkeit

Photopisches Sehen

Helladaptiertes Auge

Bedingung: $L > 10^2 \text{ cd/m}^2$

Augenempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$
(Tageslichtsehen)



Bei Tageslicht ist das menschliche Auge für gelb-grün (555 nm) etwa 20mal empfindlicher als für rot (670 nm) oder blau (450 nm). Dieses Verhalten wird durch die Augenempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ quantitativ beschrieben.

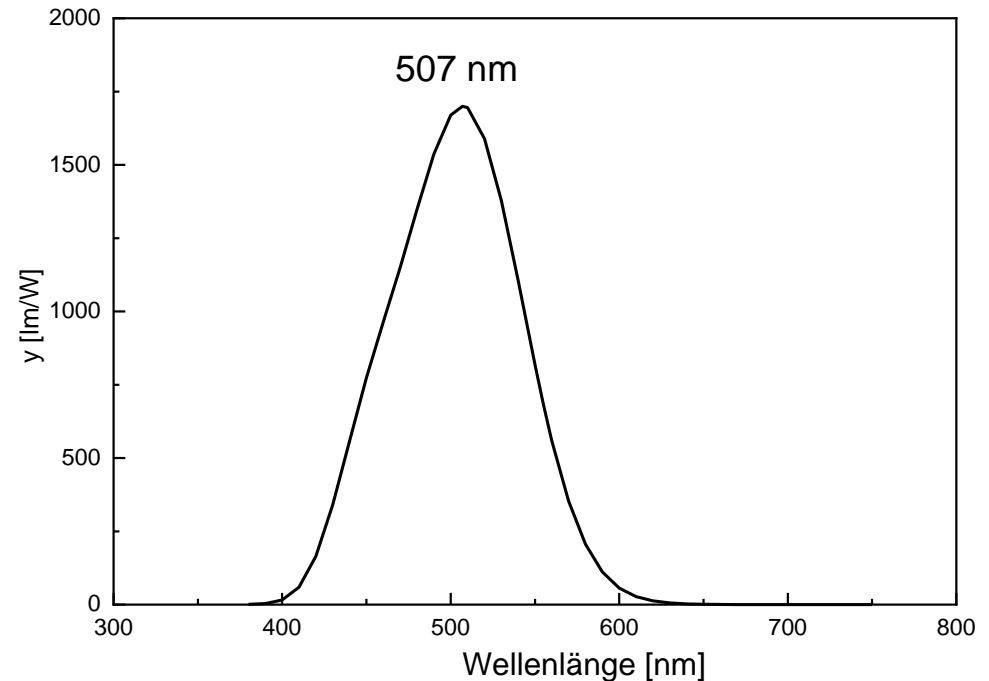
2.2 Spektrale Augenempfindlichkeit

Skotopisches Sehen

Dunkeladaptiertes Auge

Bedingung: $L < 10^{-2}$ cd/m²

**Augenempfindlichkeitskurve $V'(\lambda)$
(Dämmerungs- und Nachtsehen)**



Höchste Augenempfindlichkeit im blau-grünen Spektralbereich

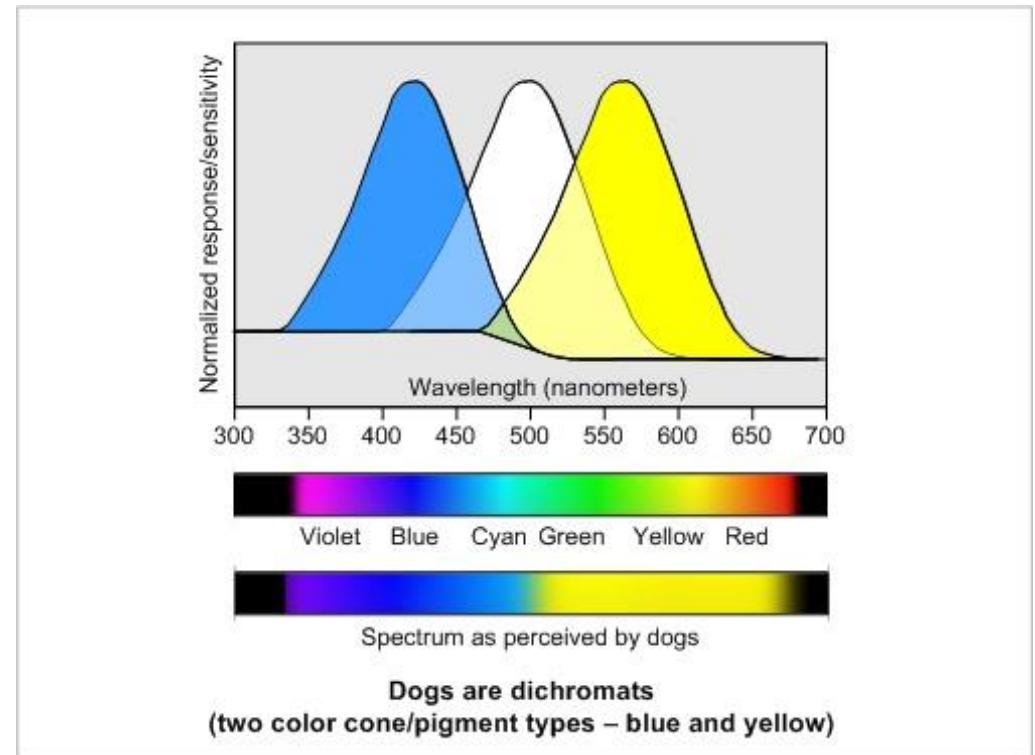
Lichtquellen mit hohem Blau-Grünanteil sind bei Nacht vorteilhaft!

(z.B. neuartige Xe/Hg-Lampen für KFZ-Frontschweinerwerfer oder weiße LEDs)

2.2 Spektrale Augenempfindlichkeit

Von Hunden (Linsenaugen)

- Maximale Empfindlichkeit bei 420 und 560 nm
- Hunde sind also Dichromaten und können lediglich Blau und Gelb unterscheiden

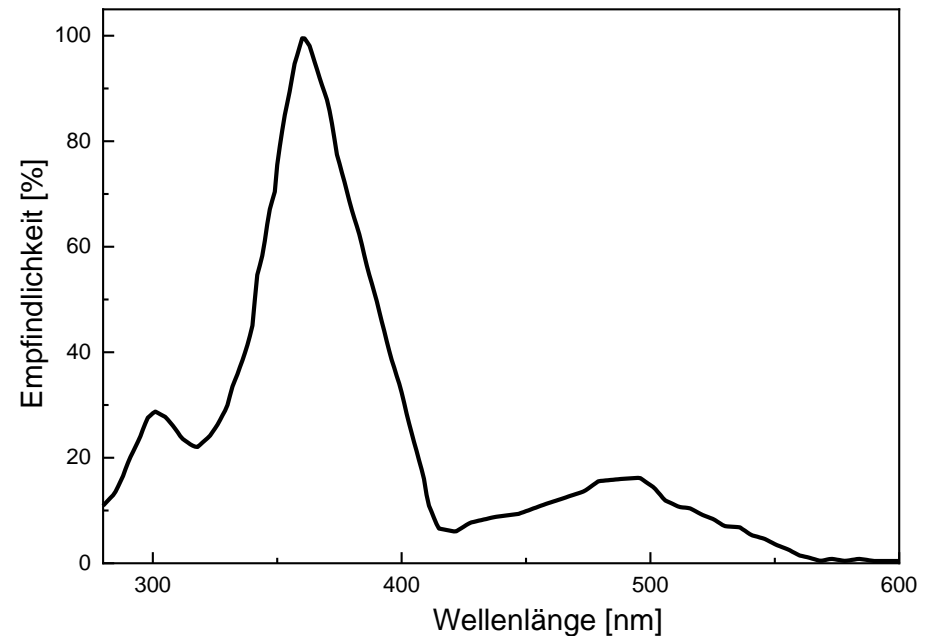


Hunde können also generell Grün und Rot nicht unterscheiden!

2.2 Spektrale Augenempfindlichkeit

Von Insekten (Facettenaugen)

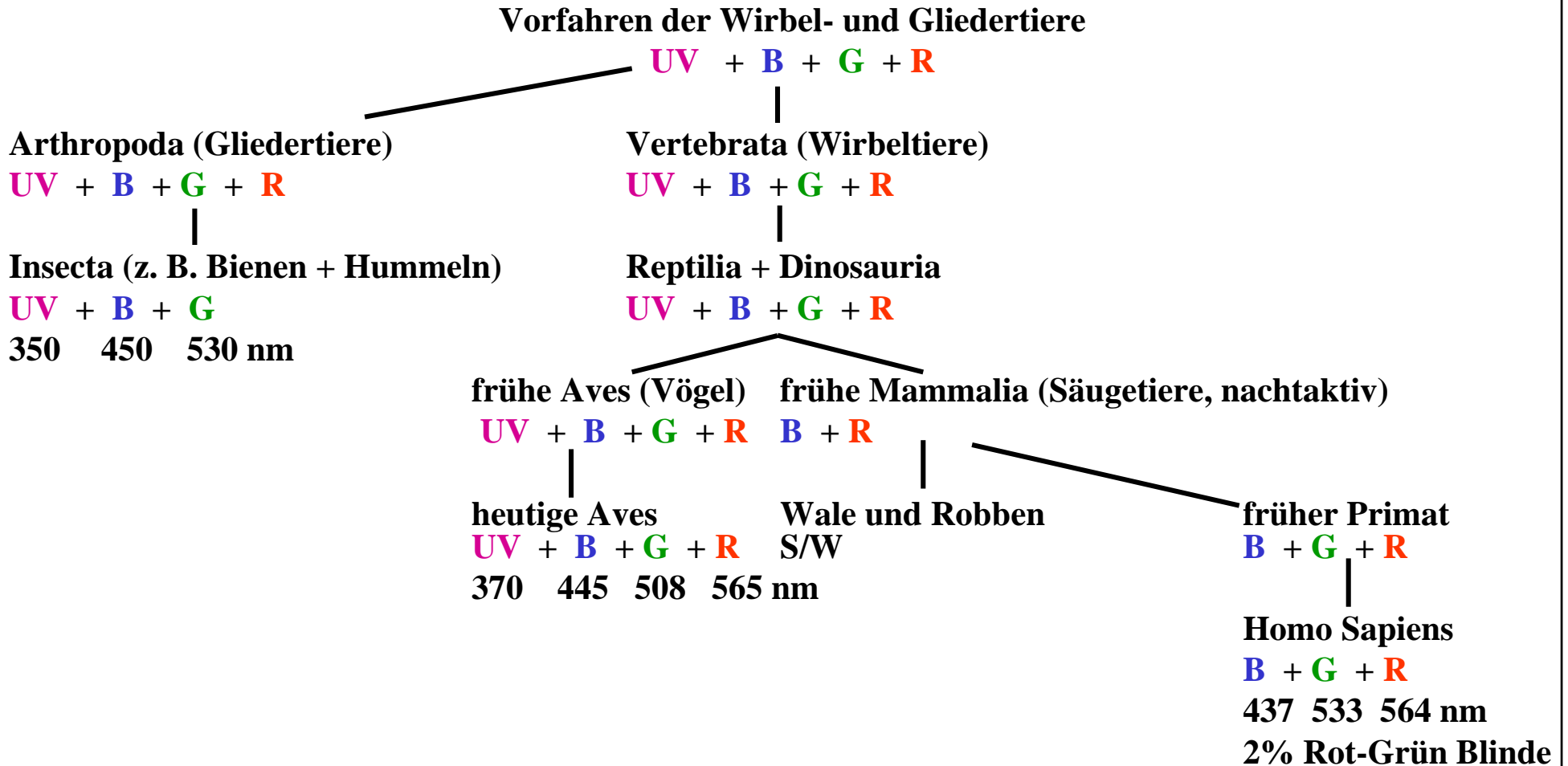
- **Maximale Empfindlichkeit bei 350 nm (UV-A Bereich)**
- **Insekten sind auch trichromatisch, können aber nicht im gelb-roten Spektralbereich sehen, sondern im UV-A und UV-B Bereich**



Lichtquellen mit hohem UV- oder Blauanteil locken Insekten an, gelbe und rote Lichtquellen dagegen eher nicht!

2.2 Spektrale Augenempfindlichkeit

Biologische Entwicklung der Sehfarbstoffe (Opsine)



Lit.: *Spektrum der Wissenschaft* 1/07 (2007) 96

2.3 Radiometrische Strahlungsgrößen

Messgrößen zur Beschreibung der Leistung (proportional zur Anzahl der ausgesendeten Photonen pro Zeiteinheit) = energetische Größen

Messgrößen (Empfängergrößen) am Detektor (Photomultiplier, Photodiode, Auge)

Intensität I = Photonenzahl/Fläche*Zeit $[N_{h\nu}/m^2s]$
(Intensity)

Bestrahlungsstärke E_e = Photonenzahl/Fläche*Zeit $[J/m^2s = W/m^2]$
(Irradiance)

\Rightarrow Diese Größen sind proportional zur Zählrate am Detektor $[Counts/s]$

Bestrahlung (Dosis) = Photonenzahl/Fläche $[J/m^2]$
(Radiant exposure)

$$D = E_e * t$$

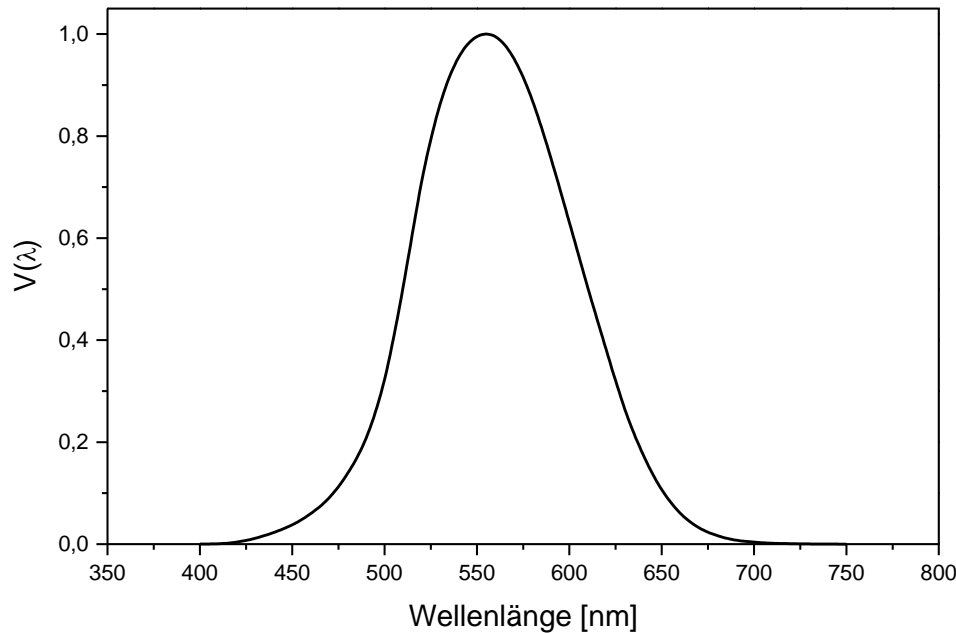
2.3 Radiometrische Strahlungsgrößen

<u>Größe</u>	<u>Symbol</u>	<u>Definition</u>	<u>Einheit</u>
Strahlungsfluss (-leistung) (Radiant flux/power)	Φ_e	= dW/dt	[W] bzw. [J/s]
Spektraler Strahlungsfluss (Spectral radiant flux/power)	$\Phi_\lambda(\lambda)$	= d Φ_e /d λ	[W/nm]
Spezifische Ausstrahlung bzw. Bestrahlungsstärke (Radiant irradiance/emittance)	E_e	= d Φ_e /dA	[W/m ²]
Spektrale Strahlungsdichte (Spectral irradiance/emittance)	$E_\lambda(\lambda)$	= dD _e /d λ	[W/m ² nm]
<i>Bestrahlungsstärke der Erde:</i>	$E_e = 1,367 \text{ kJ/m}^2\text{s} = 1,367 \text{ kW/m}^2$ (Solarkonstante)		
Berechnung der Photonenzahl:	$E = h\nu = hc/\lambda$ und $h\nu_{550} = 4,0 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ $\Rightarrow 1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 2,5 \cdot 10^{18}$ Photonen pro Sekunde der Wellenlänge 550 nm		

2.4 Photometrische Lichtgrößen

Messgrößen, welche die spektrale Empfindlichkeit des Beobachters berücksichtigen

Lichtstrom (Luminous flux) $\Phi_v = \Phi_e/M_0$ [lm]



**$M_0 =$ Energetisches
Lichtäquivalent
 $= 0,00146 \text{ W/lm} (= 1/683 \text{ W/lm})$**

$K_{\text{max}} = 683 \text{ lm/W}$ (bei 555 nm)

$K(\lambda) = K_{\text{max}} V(\lambda)$

$$\Phi_v = K_{\text{max}} \int_{380}^{780} V(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda$$

Lichtstärke $I_v = d\Phi_v/d\Omega$ [cd]

(Luminous intensity)

$\Omega =$ Raumwinkel [sr]

(Kugeloberfläche = $4\pi r^2$)

Lichtquelle mit 1 cd emittiert in alle Raumrichtungen emittiert also 1 lm pro sr

2.4 Photometrische Lichtgrößen

Definition der SI-Einheit Candela [Cd]

Ein Candela ist die Lichtstärke einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12}$ Hz ($E_{\text{hv}} = 3,578 \cdot 10^{-19}$ J), entsprechend einer Wellenlänge λ von 555 nm, mit einer Leistung von $1/683$ W (J/s) pro Steradian (Raumeinheitswinkel) aussendet ($4,1 \cdot 10^{15}$ Photonen) ($\sim 1/60$ der Lichtstärke eines schwarzen Körpers mit einer 1 cm^2 großen Öffnung mit einer Temperatur von 2.042,5 K (Schmelzpunkt von Pt)).

Wie bei allen photometrischen Größen bestimmt die Augenempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ die physiologische Abhängigkeit von der Wellenlänge. Für die Bezugswellenlänge gilt: $V(555 \text{ nm}) = 1,0$, d.h. 1 W Strahlung der Wellenlänge 555 nm entspricht somit 683 lm.

1. Beispiel: Haushaltskerze (40 W; 0,0184 W optisch!)

Lichtstrom: ca. 12,566 lm \Rightarrow Lichtstärke $I = 12,566 \text{ lm}/4\pi \cdot \text{sr} = 1 \text{ cd}$

2. Beispiel: 100 W Glühlampe

Lichtstrom: ca. 1500 lm \Rightarrow Lichtstärke $I = 1500 \text{ lm}/4\pi \cdot \text{sr} \sim 120 \text{ cd}$

2.4 Photometrische Lichtgrößen

Ableitung des energetischen Lichtäquivalents $M_0 = 0,00146 \text{ W/lm}$

Referenzlichtquelle ist die Kerze

$P \sim 40 \text{ W} = 40 \text{ J/s}$

$P_{\text{optisch}} = 0,0184 \text{ W}$ (Ulbrichtkugel)

$\eta = 0,046\%$

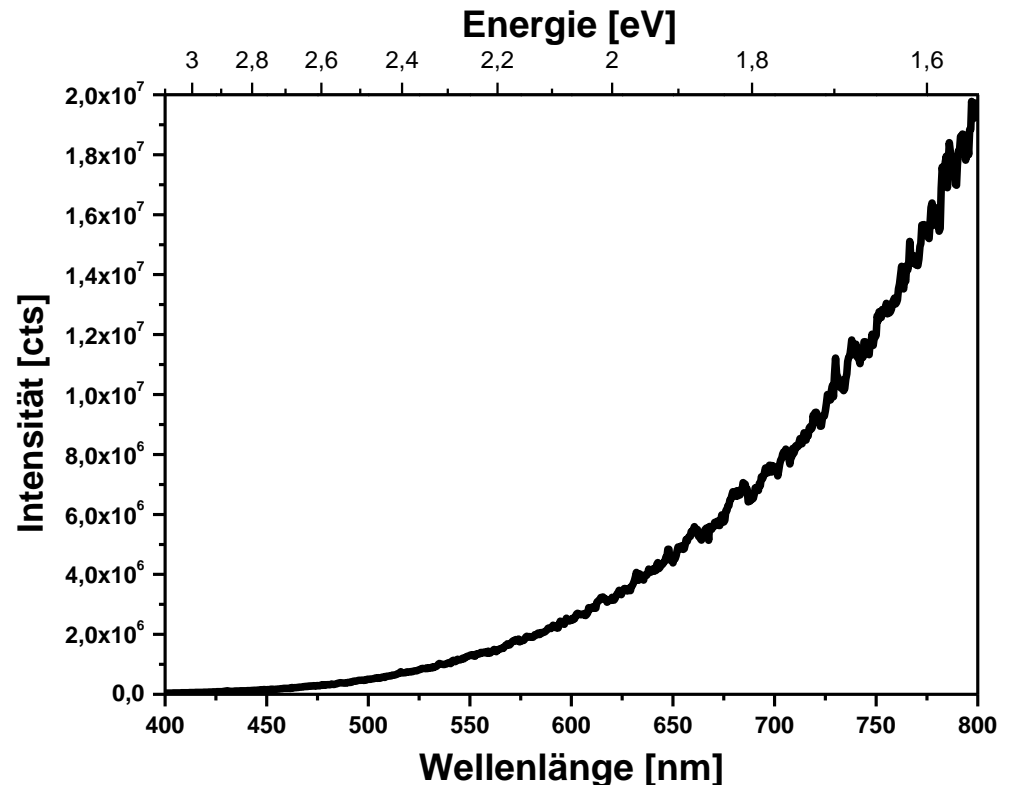
$I_v = 1 \text{ cd} \sim 12,566 \text{ lm}$

$\Rightarrow 0,31425 \text{ lm/W}$ bzw. $3,1828 \text{ W/lm}$

Effizienz $\eta = 0,00046$

$\Rightarrow 0,00146 \text{ W/lm}$ (q.e.d.)

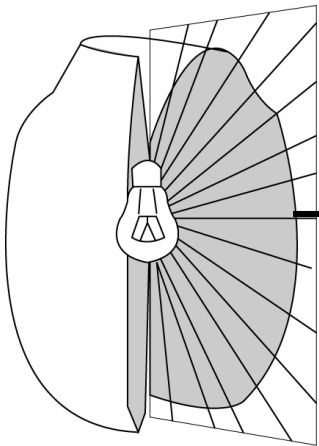
Emissionsspektrum eines Teelichts



2.4 Photometrische Lichtgrößen

Lichtstrom (luminous flux)

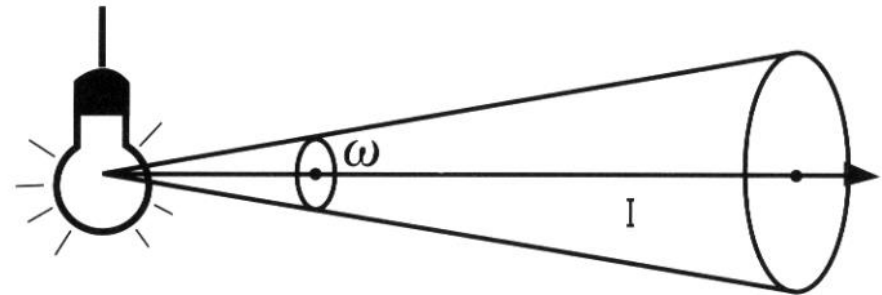
Gesamte von einer Lichtquelle in alle Raumrichtung abgegebene Strahlungsleistung, die mit der Empfindlichkeit des menschlichen Auges bewertet wird



$$\text{Lichtstrom } \Phi_v = 683 \int_{380}^{780} V_{rel}(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda$$

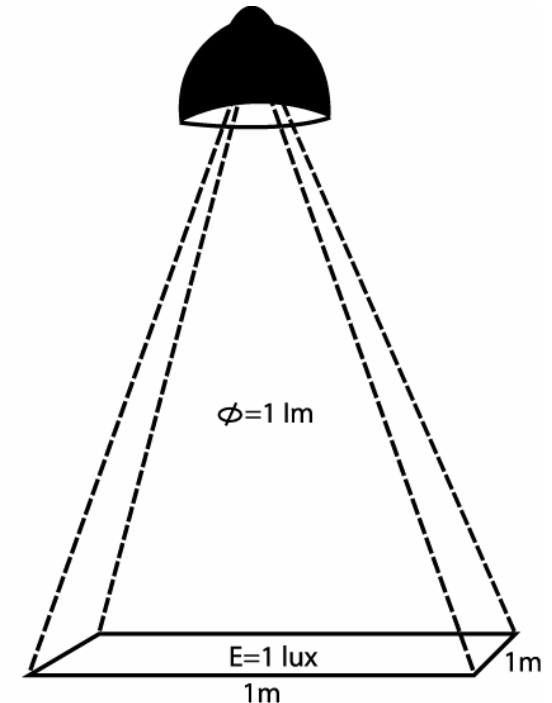
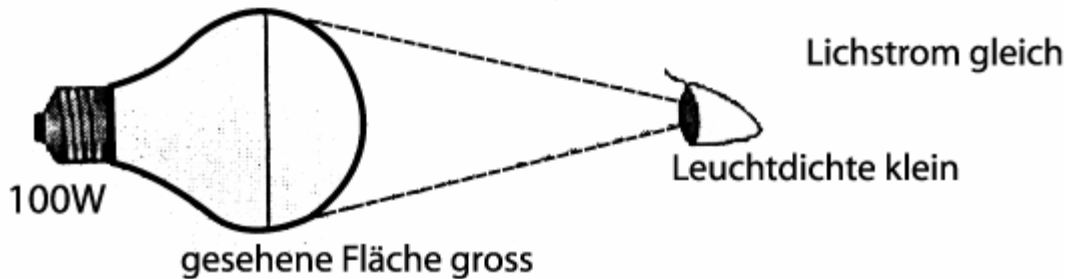
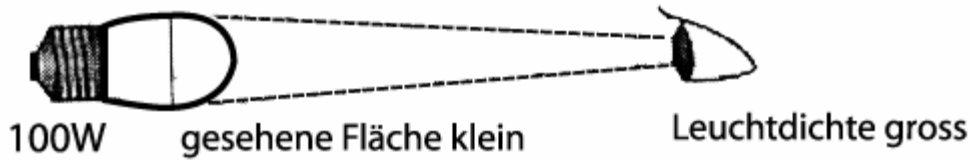
Lichtstärke (luminous intensity)

Intensität des in eine bestimmte Richtung abgestrahlten Lichtmenge



2.4 Photometrische Lichtgrößen

Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte



Beleuchtungsstärke
(Illuminance)

Verhältnis des auffallenden Lichtstroms zur
beleuchteten Fläche
Lichtstrom/Fläche [$\text{lm}/\text{m}^2 = \text{lux}$]

Leuchtdichte
(Luminance)

Wahrgenommener Helligkeitseindruck einer Lichtquelle
Lichtstärke/Fläche [cd/m^2]

2.4 Photometrische Lichtgrößen

Integrale Größen

Lichtstrom $\Phi_v = \Phi_e/M_0$ [lm]

Beleuchtungsstärke $E = d\Phi_v/dA$ [lux = lm/m²]

Raumwinkel bezogene Größen

(auf 1 sr)

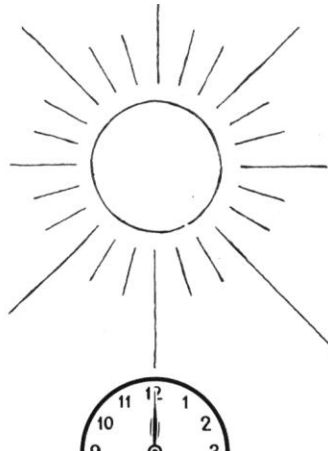
Lichtstärke $I = d\Phi_v/d\Omega$ [cd]

Leuchtdichte $L = dI/dA \cos\gamma$
[cd/m²] = [nit] (Luminanz)

Lichtquelle	Leuchtdichte [cd/cm ²]
Sonne	150000
Entladungsbogen	20000 - 100000
Glühlampe (klar)	200 – 2000
Glühlampe (matt)	5 – 50
Leuchtstofflampe	0,4 – 1,4
Kerze	0,75
Blauer Himmel	0,3 – 0,5
Vollmond	0,25
Fernseher	0,05

2.4 Photometrische Lichtgrößen

Typische Luxwerte



Die Beleuchtungsstärke in geschlossenen Räumen ist um ein Vielfaches geringer als unter freiem Himmel!

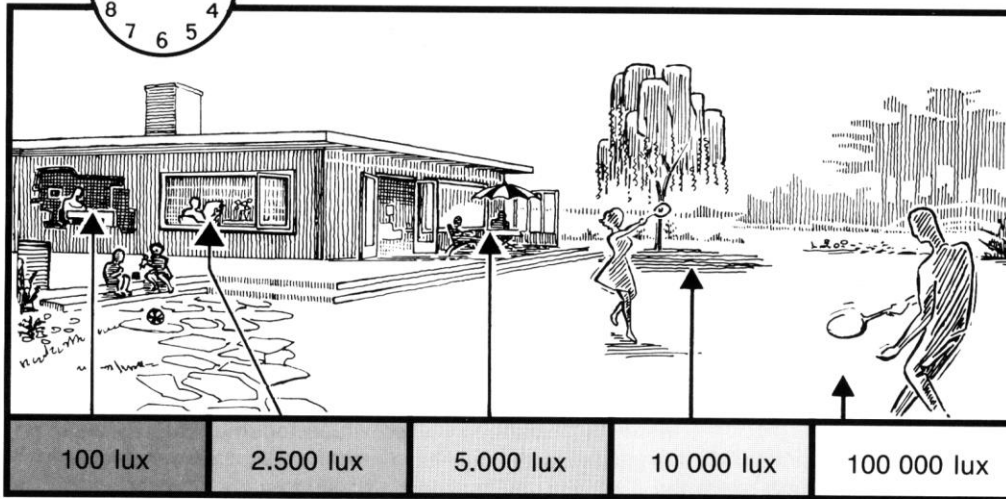


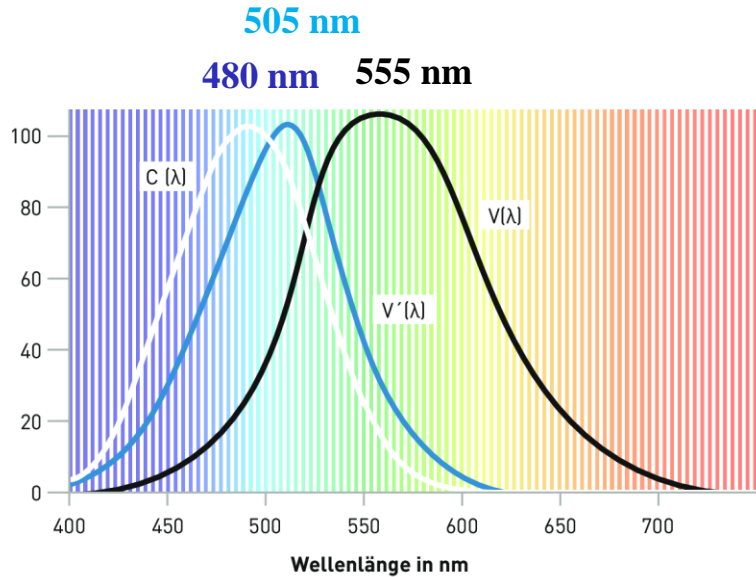
Fig. 2 Variations in lighting level under a clear sky.

CCT [K]	VISUAL DATA		MELANOPIIC ACTION FACTOR
	Luminous flux [lm]		alpha (smel)
	K-SOLIS	K-SOLIS Pure	
1,800	1,480	1,650	0.226
2,000	1,745	1,945	0.252
2,500	2,170	2,495	0.324
2,700	2,090	2,400	0.357
3,000	2,000	2,300	0.407
3,500	1,910	2,195	0.484
4,000	1,850	2,130	0.554
4,500	1,815	2,085	0.618
5,000	1,790	2,055	0.676
5,500	1,775	2,040	0.728
6,000	1,765	2,025	0.774
6,500	1,755	2,015	0.816
7,000	1,750	2,010	0.852
8,000	1,745	2,000	0.915
9,000	1,740	1,995	0.965
10,000	1,735	1,990	1.033
12,000	1,730	1,970	1.168
14,000	1,720	1,950	1.304
16,000	1,710	1,935	1.439

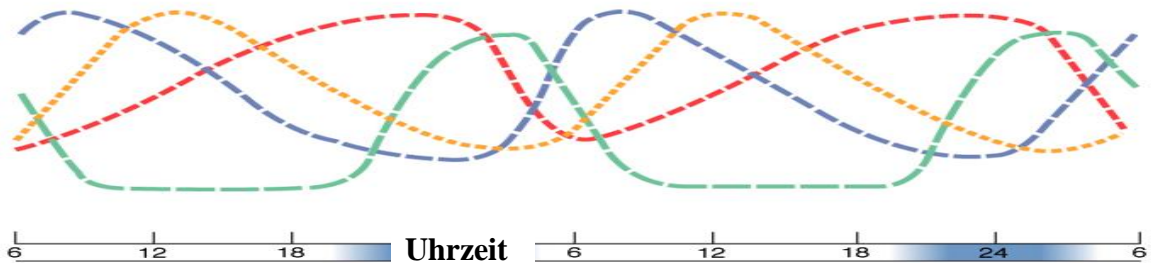
**Physiologisch betrachtet leben wir also vorrangig in Dunkelheit
Zudem geringe Melatonin-suppression bzw. zirkadiane Wirksamkeit**

2.4 Photometrische Lichtgrößen

Zirkadiane Wirksamkeit $c(\lambda)$



Lichtquelle	Lichteffizienz photopisch	Lichteffizienz zirkadian/photopisch
Tageslicht 6500 K	100 lm/W	2,78
FL 3000 K	90 lm/W	1,00
FL 4100 K	90 lm/W	1,85
LED 5500 K	200 lm/W	2,91 (~ LCDs)



- Körpertemperatur
- Melatonin (Schlafhormon)
- Cortisol (Stresshormon)
- Aufmerksamkeit

2.5 Energie- und Lichteffizienz

Definitionen

Energieeffizienz (energy efficacy): $\eta = W_{\text{hv(sichtbar)}} / W_{\text{elektrisch}} [\%]$

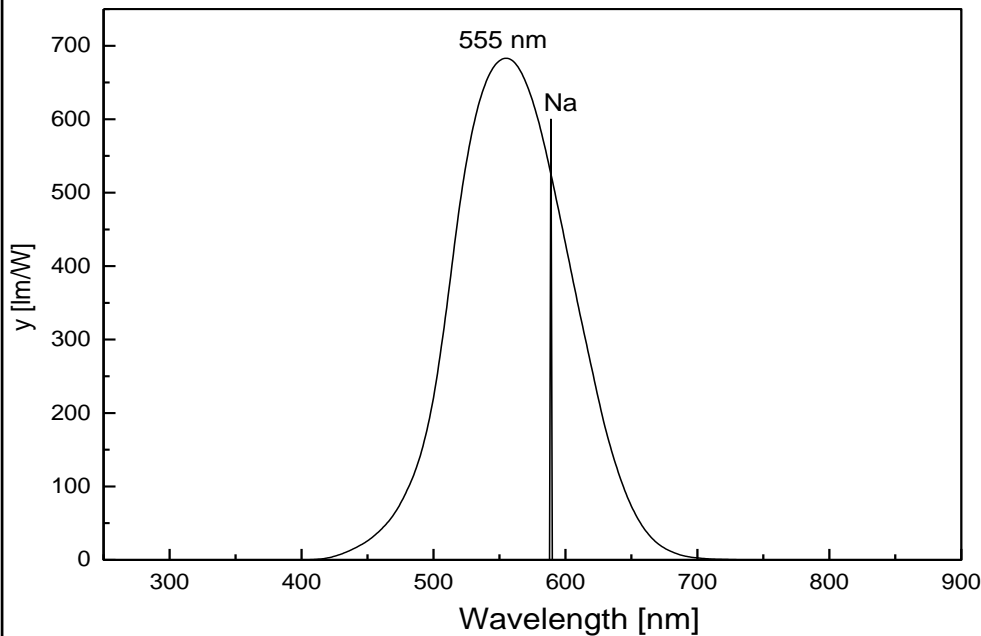
Lichteffizienz (luminous efficacy): $\eta_v = \Phi_v / W_{\text{elektrisch}} [\text{lm/W}]$

<u>Lichtquelle</u>	<u>Energieeffizienz [%]</u>	<u>Lichteffizienz [lm/W]</u>
• Farbfernseher	1	2 - 3
• Glühlampe	5	10
• Halogenlampe	8 - 10	15 - 20
• Energiesparlampe	15 - 20	70
• Hg-Hochdrucklampe	15 - 20	65
• Leuchtstoffröhre	29	100
• Na-Hochdrucklampe	31	130
• Na-Niederdrucklampe	40	200
• Kaltweiße LED	75	250

2.5 Energie- und Lichteffizienz

Die Lichteffizienz oder Lichtausbeute einer Lichtquelle ergibt sich auch aus der Energieeffizienz (η) und dem Lumenäquivalent (LE)

Beispiel: Na-Niederdrucklampe Emission bei 589,3 nm (Energieeffizienz $\eta = 40\%$)



Lumenäquivalent einer Lichtquelle = Anzahl Lumen pro 1 Watt optischer Photonen

$$LE = \int_{380}^{780} y(\lambda)E(\lambda)d\lambda$$

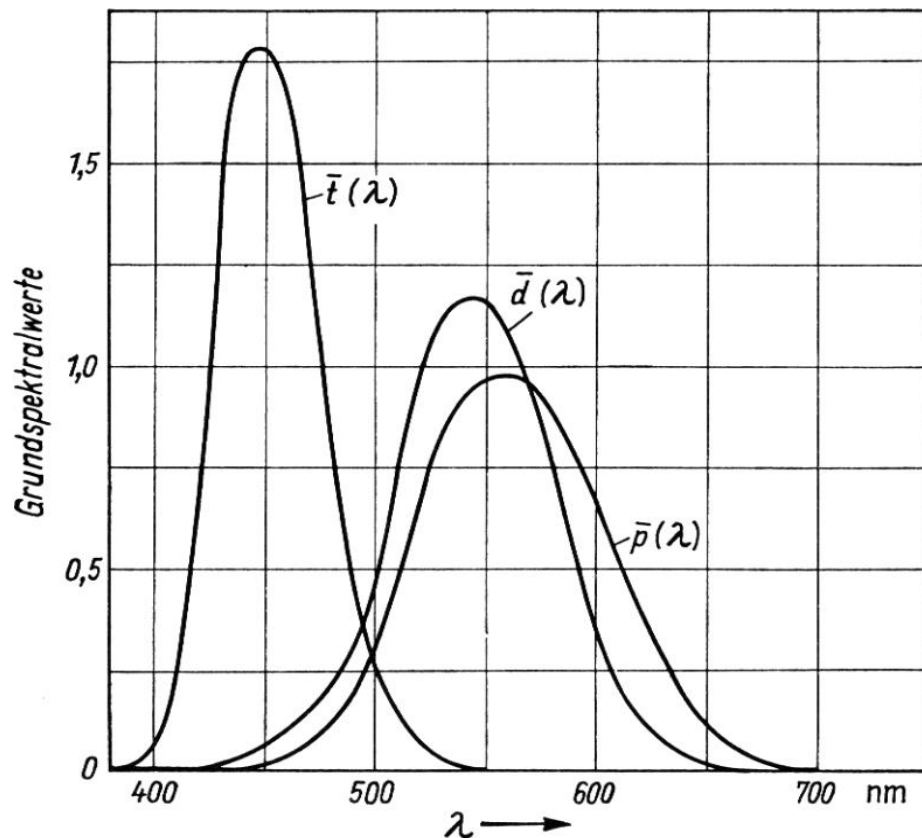
Lichteffizienz oder -ausbeute einer Lichtquelle = Energieeffizienz η * LE

η = 40%
LE = 500 lm/W_{opt}
⇒ Lichteffizienz = 200 lm/W_{el}

2.6 Farbkoordinaten

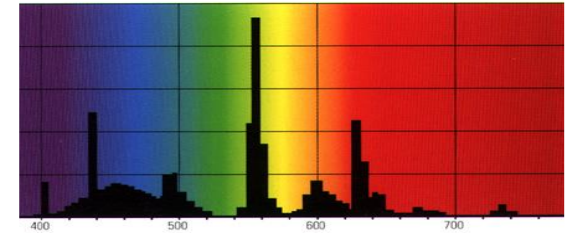
Das menschliche Auge besitzt drei verschiedene Zapfen mit drei verschiedenen Farbstoffen \Rightarrow „trichromatischem“ Sehen

Die Absorptionskurven dieser drei Farbstoffe werden mit $t(\lambda)$, $d(\lambda)$ und $p(\lambda)$



Mit Hilfe dieser drei Absorptionskurven lassen sich aus einem Emissionsspektrum

$I(\lambda)$



die folgenden Größen berechnen:

$$T = \int I(\lambda) \cdot t(\lambda) \cdot d\lambda$$

$$D = \int I(\lambda) \cdot d(\lambda) \cdot d\lambda$$

$$P = \int I(\lambda) \cdot p(\lambda) \cdot d\lambda$$

2.6 Farbkoordinaten

Tristimulus values

Eine bestimmte Wellenlänge, z.B. 550 nm, stimuliert also mindestens zwei Pigmente, z.B. D/P im Verhältnis 4/3. Das Gehirn verrechnet dies zum Farbeindruck grasgrün.

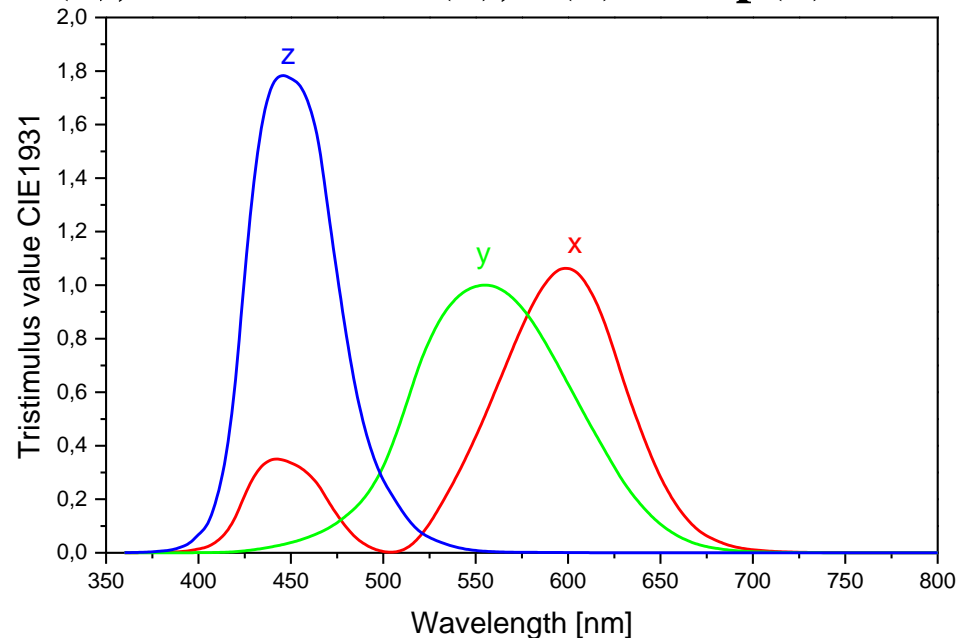
Anstelle der 3 Absorptionskurven $t(\lambda)$, $d(\lambda)$ und $p(\lambda)$ verwendet man daher besser die drei Stimulanskurven $x(\lambda)$, $y(\lambda)$ und $z(\lambda)$, die sich aus $t(\lambda)$, $d(\lambda)$ und $p(\lambda)$ als Linearkombination ergeben.

Aus ihnen lassen sich die drei Größen X, Y und Z berechnen

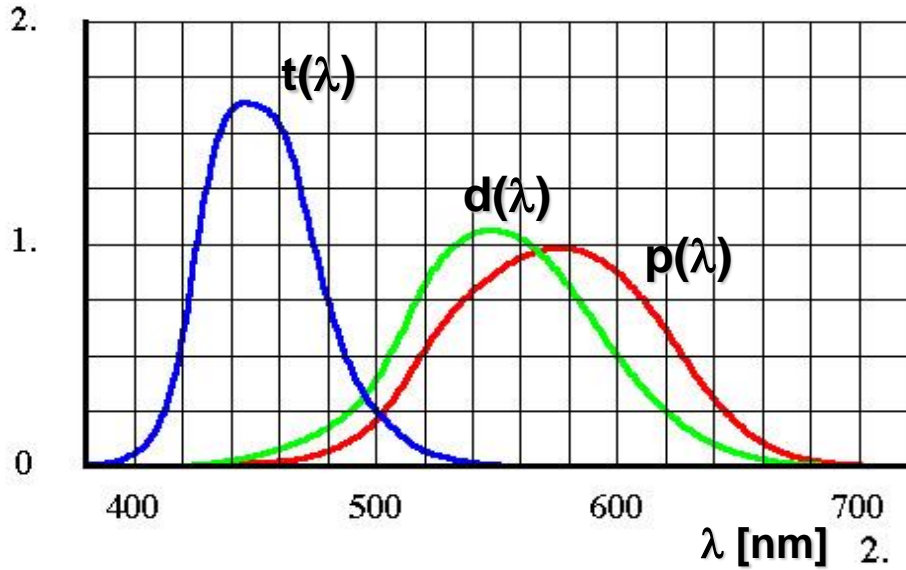
$$X = \int I(\lambda) \cdot x(\lambda) \cdot d\lambda$$

$$Y = \int I(\lambda) \cdot y(\lambda) \cdot d\lambda$$

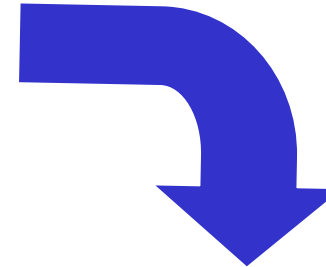
$$Z = \int I(\lambda) \cdot z(\lambda) \cdot d\lambda$$



2.6 Farbkoordinaten

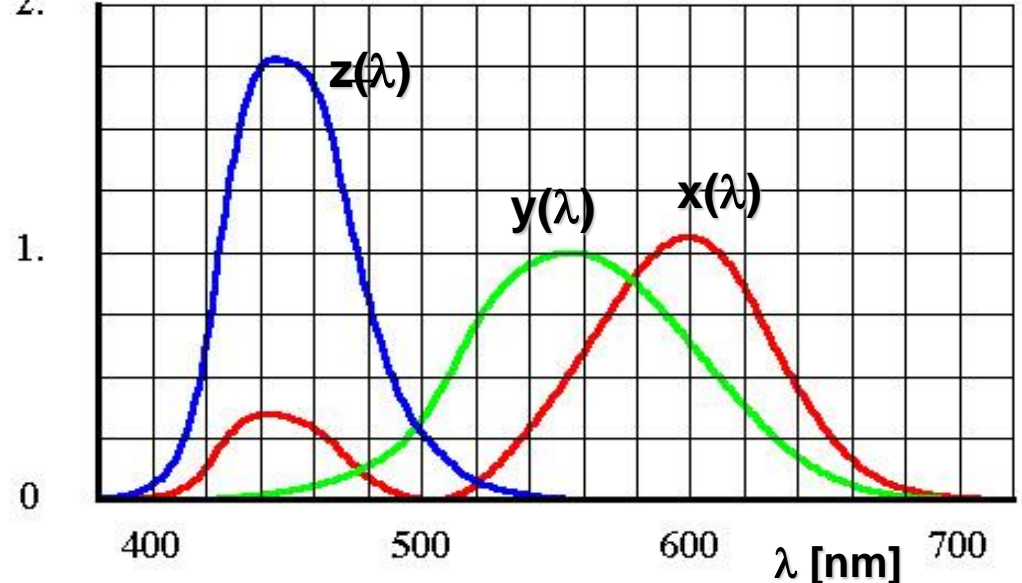


Linearkombinationen



$$\begin{pmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,86 & -1,13 & 0,22 \\ 0,36 & 0,63 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 1,09 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t(\lambda) \\ d(\lambda) \\ p(\lambda) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,86 & -1,13 & 0,22 \\ 0,36 & 0,63 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 1,09 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T \\ D \\ P \end{pmatrix}$$



2.6 Farbkoordinaten

Ableitung des Farbpunktes x, y

Die drei Größen X, Y, Z kann man als 3-dimensionalen Vektor auffassen.

Die Richtung des Vektors (X, Y, Z) gibt die Farbe an und seine Länge die Helligkeit.

Für den Farbeindruck ist aber nur die Richtung entscheidend.

Somit gibt der renormierte Vektor (x, y, z) mit

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

den gleichen Farbeindruck wie (X, Y, Z) an.

Für (x, y, z) gilt: $x + y + z = 1$

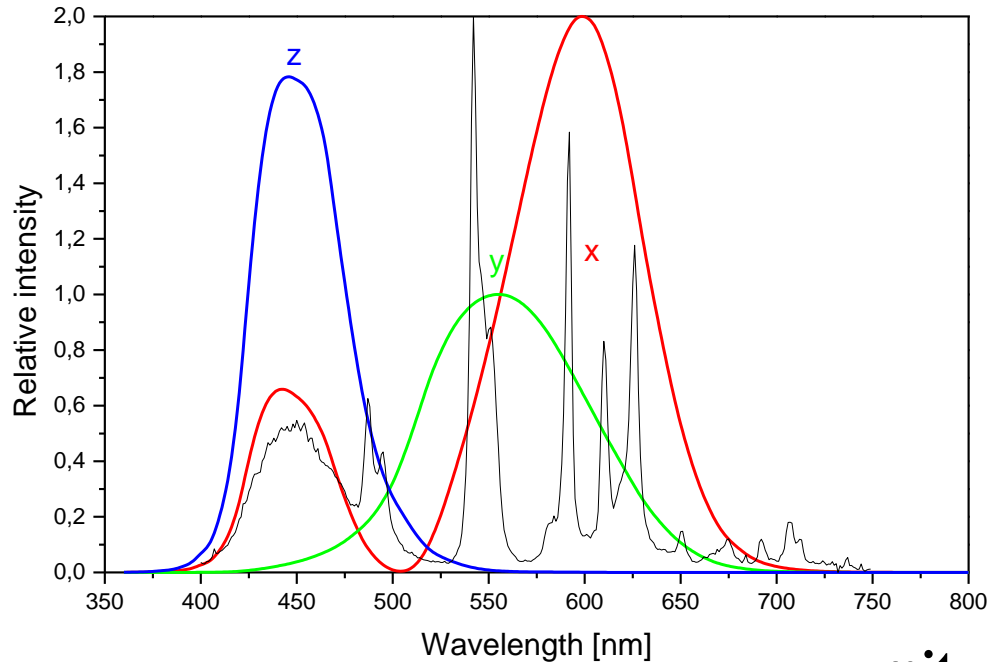
Somit braucht man nur x und y anzugeben, um eine Farbe zu charakterisieren.

z ergibt sich aus $z = 1 - x - y$

2.6 Farbkoordinaten

Bestimmung des Farbpunktes x, y

Beispiel: Fluoreszenzlampe



mit

$$X = K \int_{380}^{780} P(\lambda)x(\lambda)d\lambda$$

$$Y = K \int_{380}^{780} P(\lambda)y(\lambda)d\lambda$$

$$Z = K \int_{380}^{780} P(\lambda)z(\lambda)d\lambda$$

P(λ) = Spektrale Energieverteilung

K = Normierungsfaktor

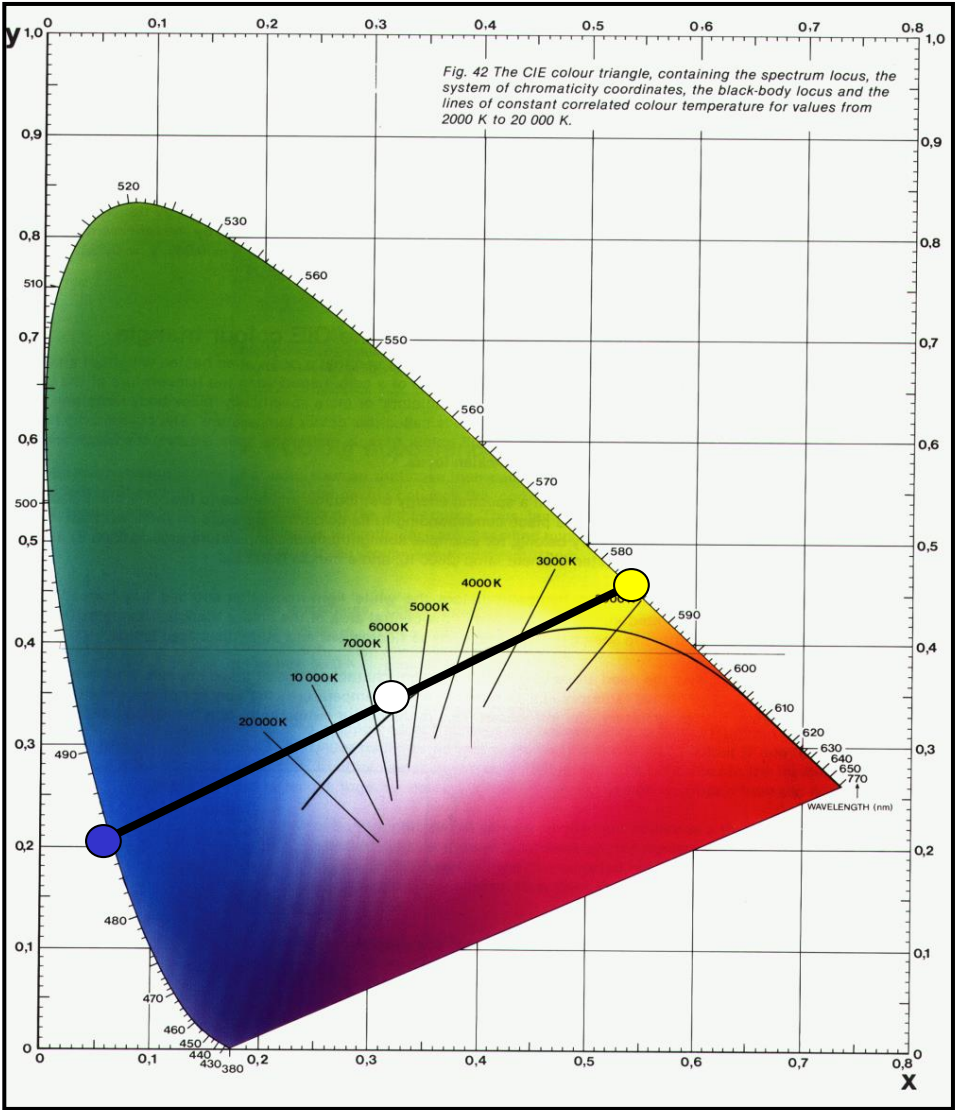
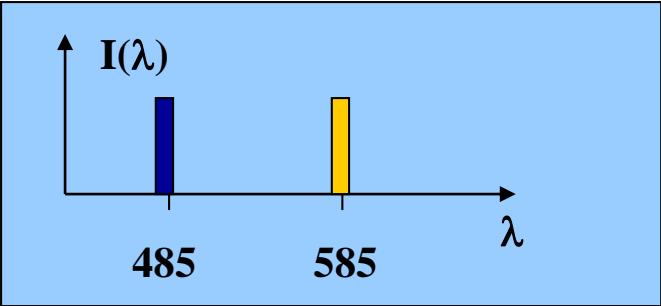
Resultat: x = 0,325; y = 0,305

2.6 Farbkoordinaten

Das (x, y) Koordinatensystem C.I.E. 1931 (Commission Internationale de l'Eclairage)

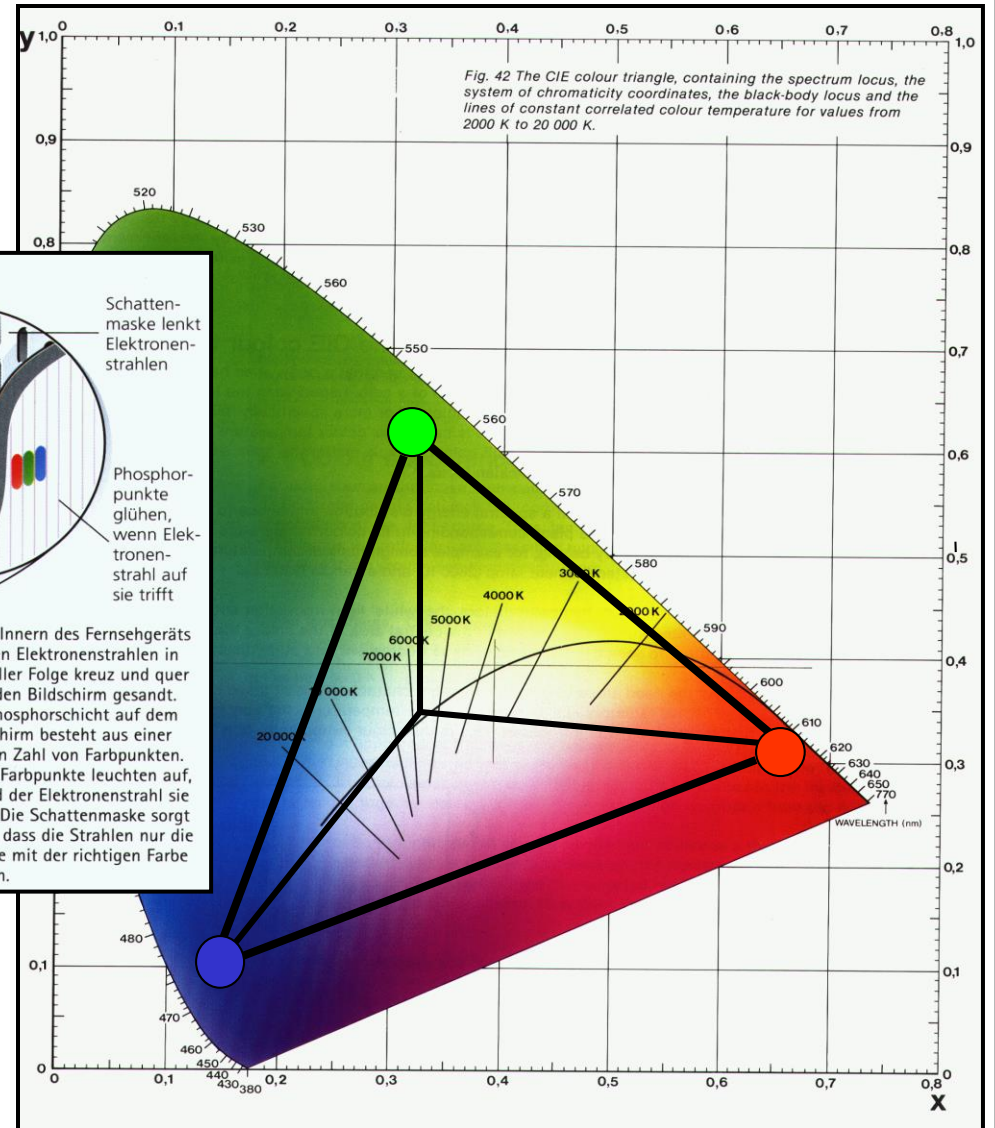
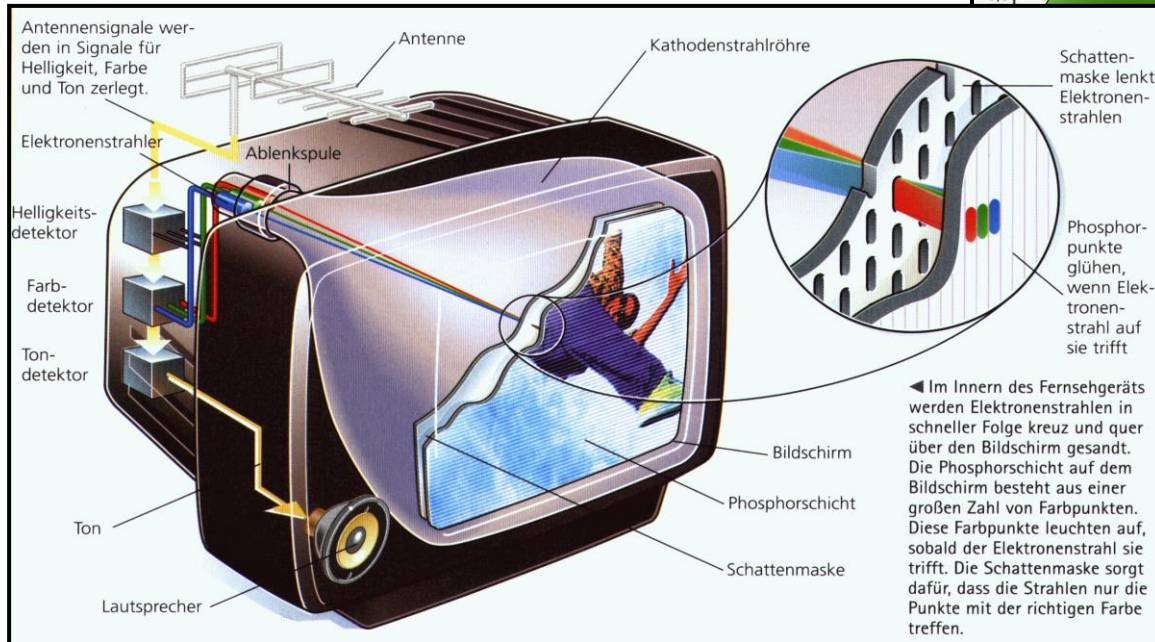
Man kann Farben addieren

Gelb 585 nm + Blau 485 nm
=
weiß



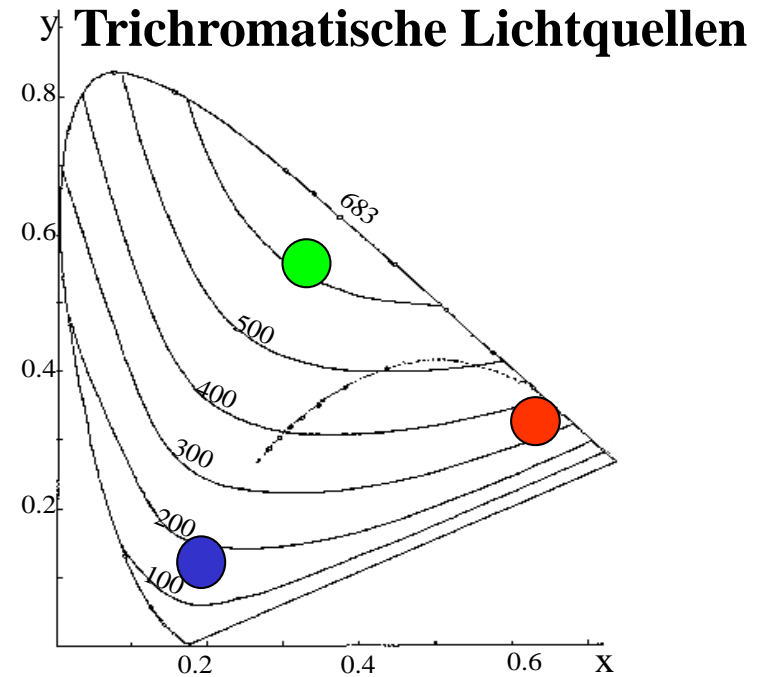
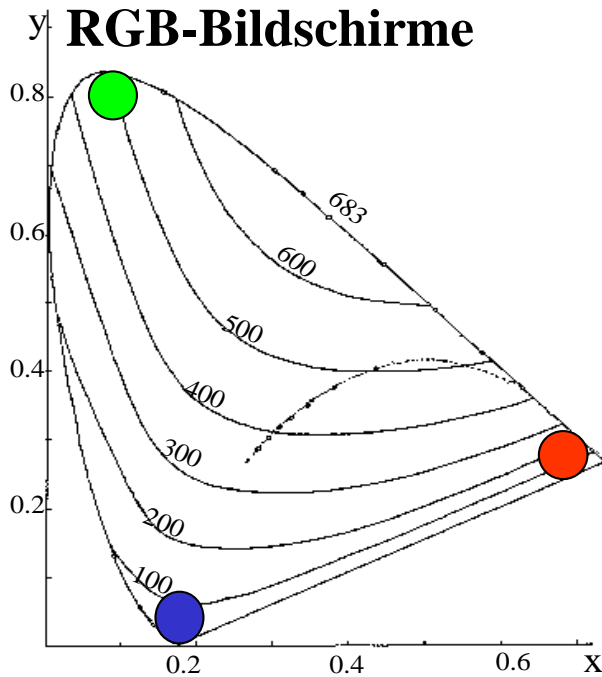
2.6 Farbkoordinaten

Farbmischung in der Braun'schen Röhre (Kathodenstrahlröhre)



2.6 Farbkoordinaten

Farbmischung: Bildschirme vs. Lichtquellen



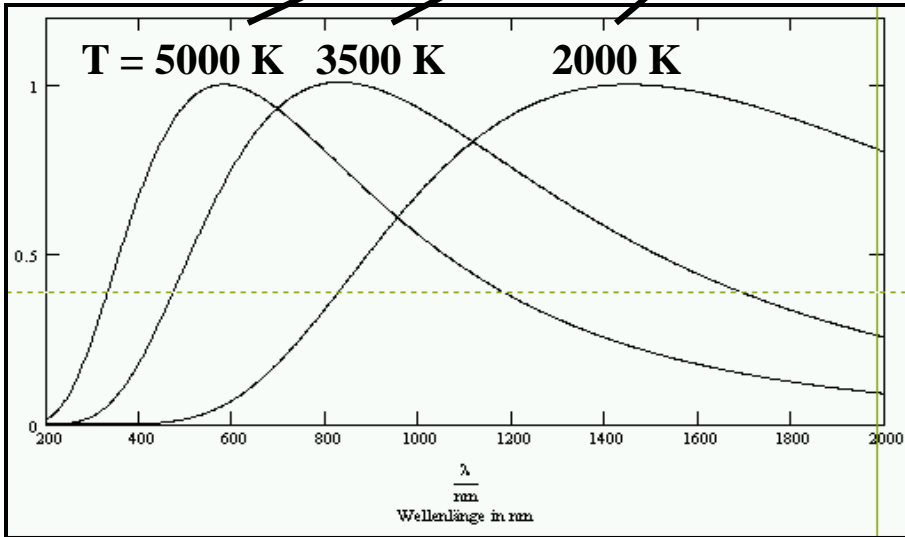
Das Lumenäquivalent gibt an wie effizient ein Leuchtstoff oder eine Lichtquelle elektromagnetische Strahlung in Lichtstrom umwandelt

- **Optimal ist grüne Emission @ 555 nm**
- **Praktibel in Bildschirmen: R ~ 630 nm, G ~ 520 nm, B ~ 440 nm**
- **Praktibel in Lichtquellen: R ~ 610 nm, G ~ 550 nm, B ~ 460 nm**

2.7 Farbtemperatur

Schwarzkörperstrahler

Spektren von Schwarzkörperstrahlern



Planck'scher Kurvenzug,
engl.: Black body line (BBL)

- $T = 5000 \text{ K } (x, y) = (0,35; 0,35)$
- $T = 3500 \text{ K } (x, y) = (0,40; 0,39)$
- $T = 2000 \text{ K } (x, y) = (0,53; 0,42)$

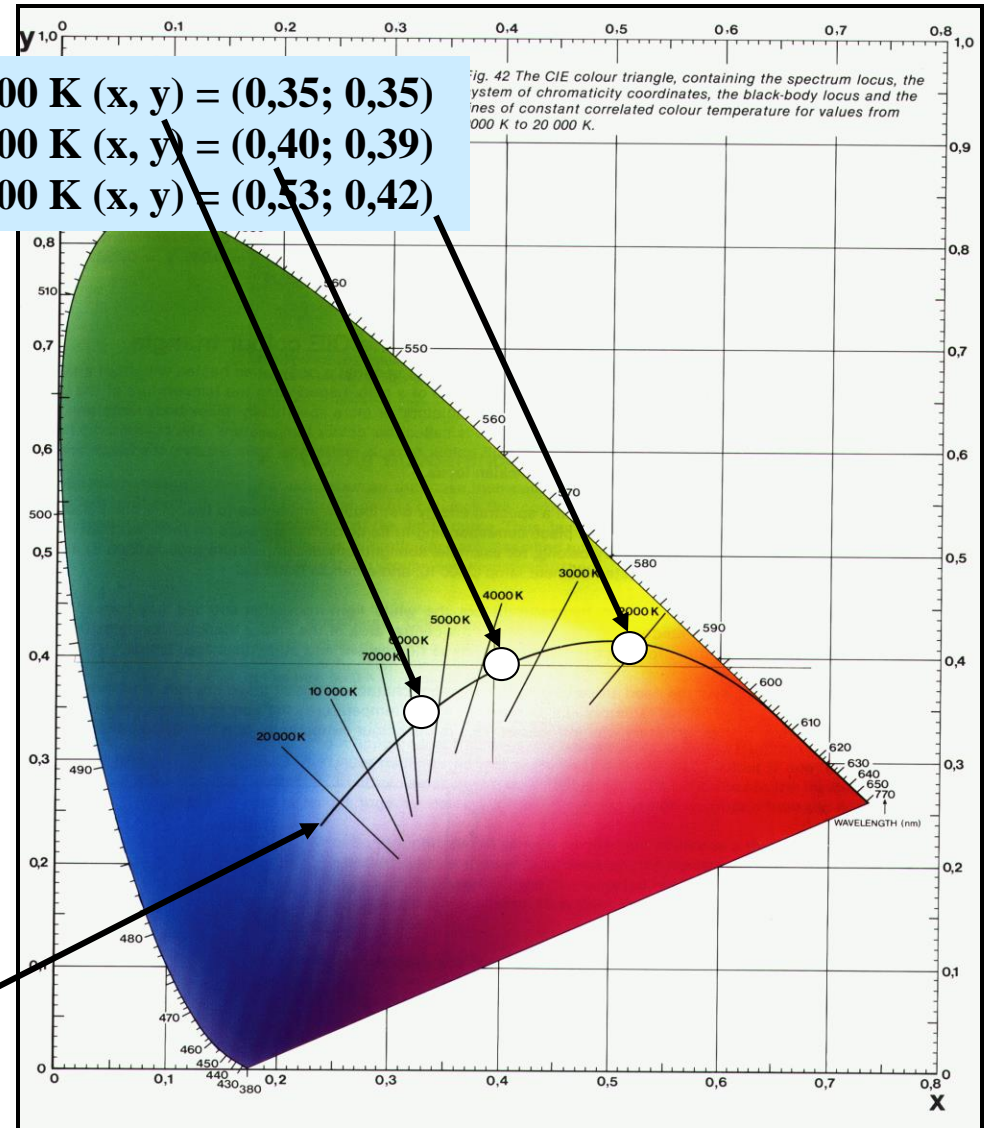


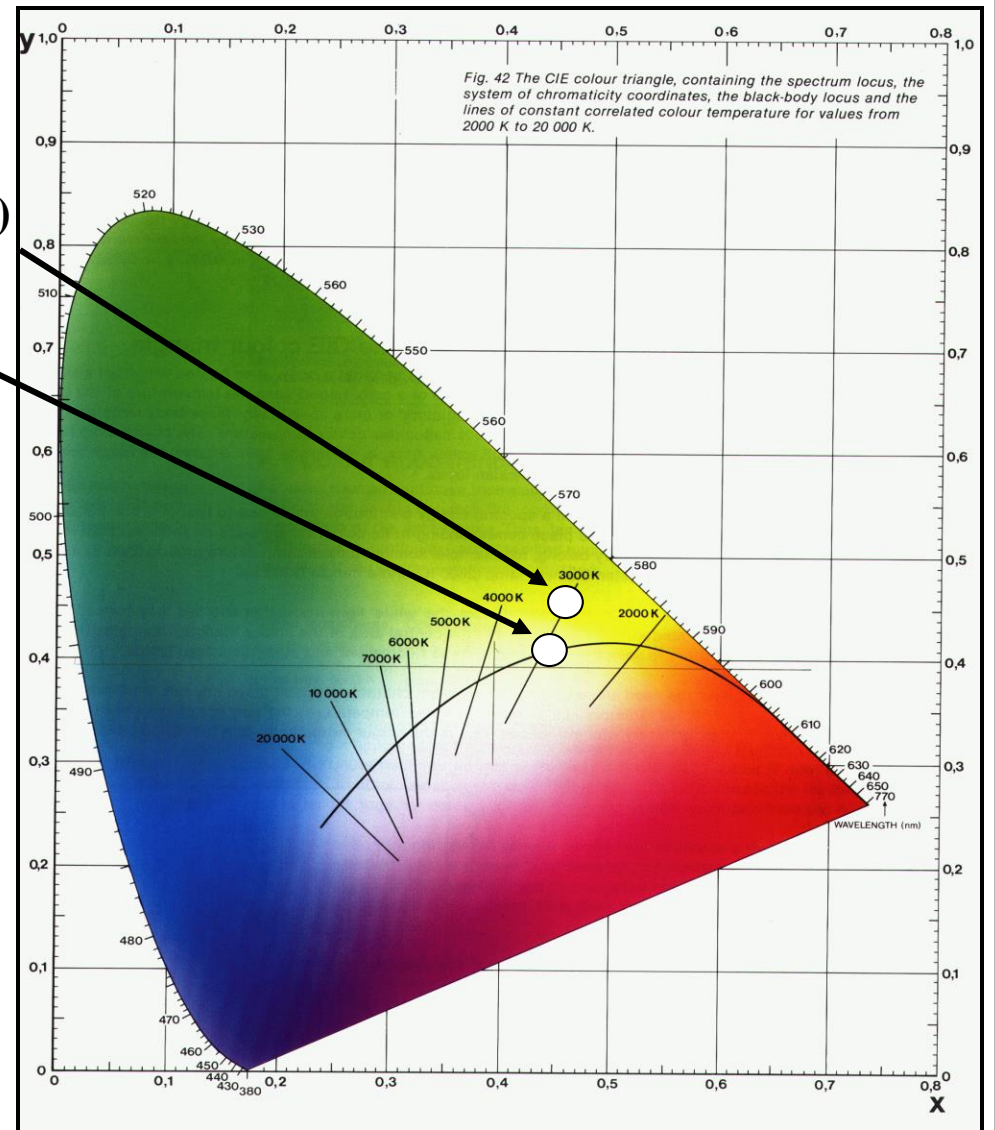
Fig. 42 The CIE colour triangle, containing the spectrum locus, the system of chromaticity coordinates, the black-body locus and the lines of constant correlated colour temperature for values from 2000 K to 20 000 K.

2.7 Farbtemperatur

Andere weiße Lichtquellen

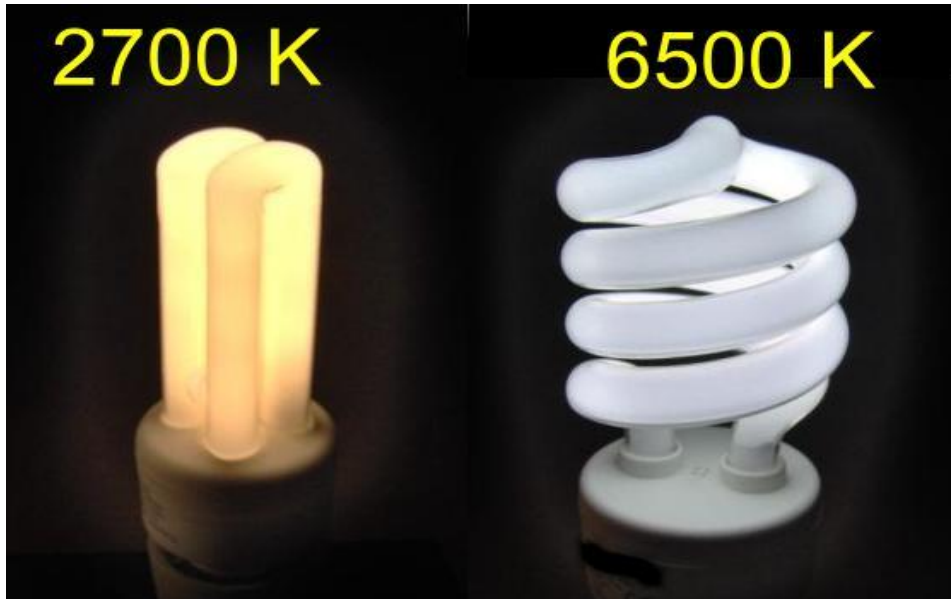
Die Farbtemperatur einer beliebigen weißen Lichtquellen mit dem Farbpunkt (x, y) ist die Farbtemperatur desjenigen Schwarzkörperstrahlers, der dem Farbpunkt (x', y') am nächsten kommt. Sie wird mit T_c oder CCT (correlated colour temperature) bezeichnet.

<u>Beispiel</u>	<u>T_c [K]</u>
blauer Himmel	15000
bewölkter Himmel	6500
Standard D65	6500
Leuchtstoffröhre	4000
Halogenlampe	3300
Glühlampe	2700
Na-Niederdrucklampe	1800
Kerze	1500



2.7 Farbtemperatur

Am Beispiel von Energiesparlampen



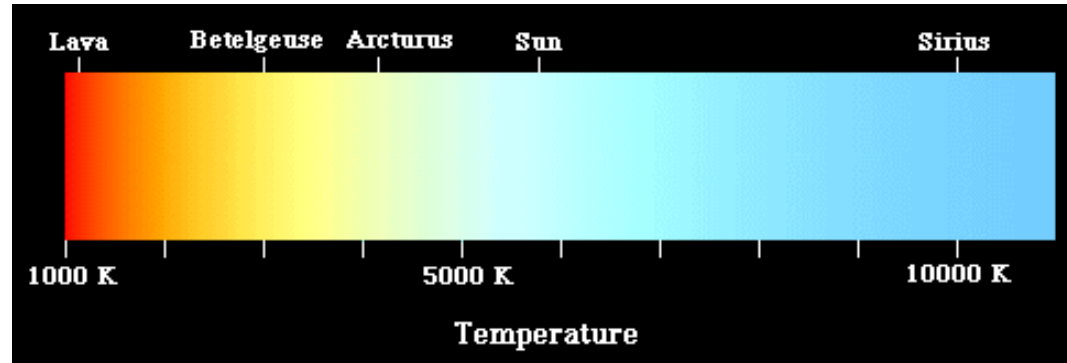
Energiesparlampen mit unterschiedlicher Farbtemperatur im Vergleich

Anstatt der Lichtfarbe in Kelvin werden meist die folgenden Bezeichnungen verwendet

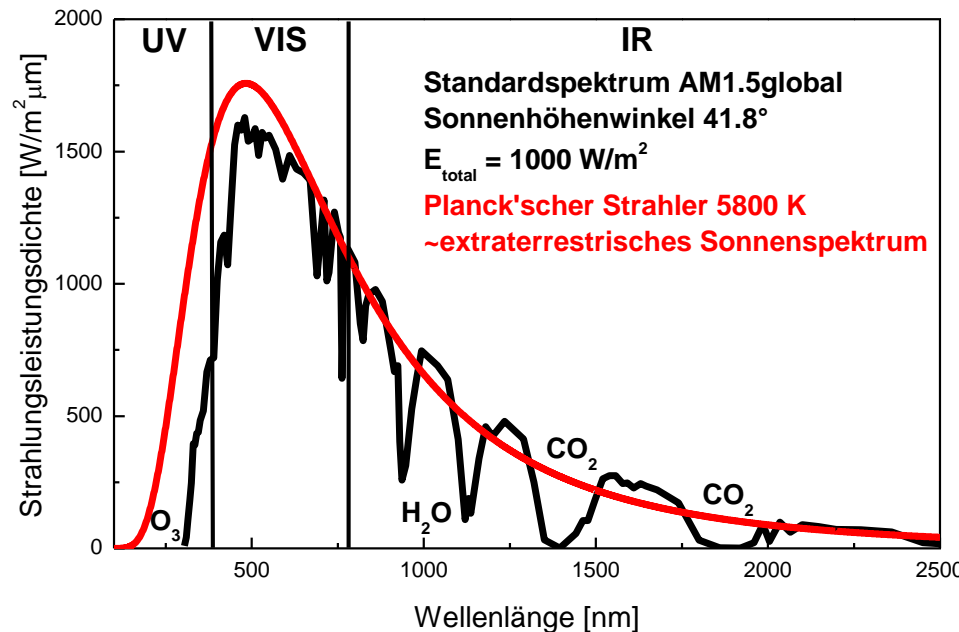
Lichtfarbe in Kelvin	Bezeichnung
2700	extra-warm-weiß
2900	warm-weiß
4000	neutral-weiß
5500	Tageslicht
6500	kalt-weiß

2.7 Farbtemperatur

Sterne: Recht gute Modelle für schwarze Strahler, d.h. die Farbtemperatur entspricht in etwa der Oberflächentemperatur (Fraunhoferlinien sind spektral schmal)



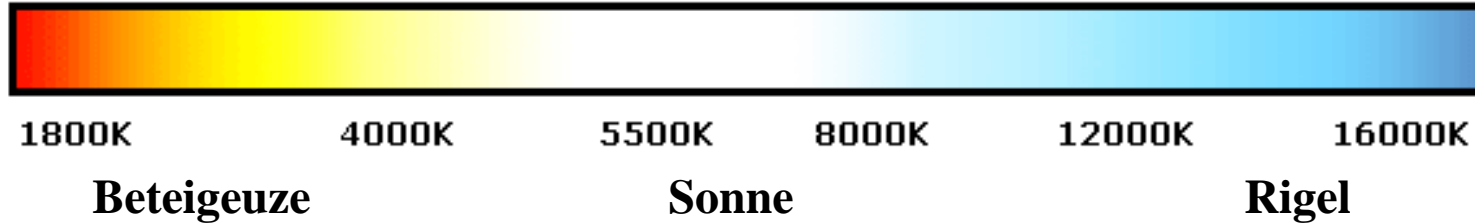
Terrestrisches und extraterrestrisches Sonnenspektrum



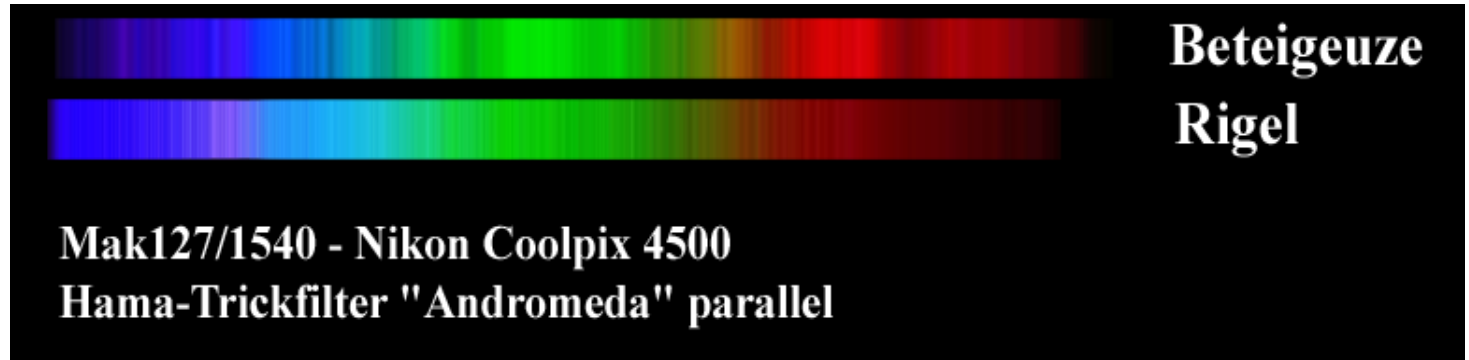
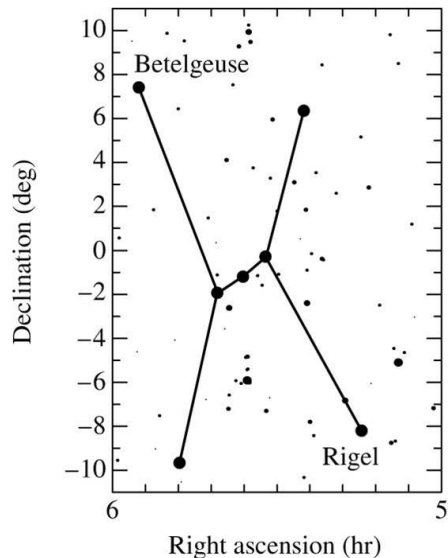
Das solare Spektrum wird aufgrund der atmosphärischen Extinktion durch den Sonnenhöhenwinkel moduliert

2.7 Farbtemperatur

Sterne: Das stellare Spektrum definiert das Tageslichtspektrum der umkreisenden Planeten. Bei der Erde ist es das solare Spektrum



Sternbild Orion



→ Einfluss auf die Astrobiologie

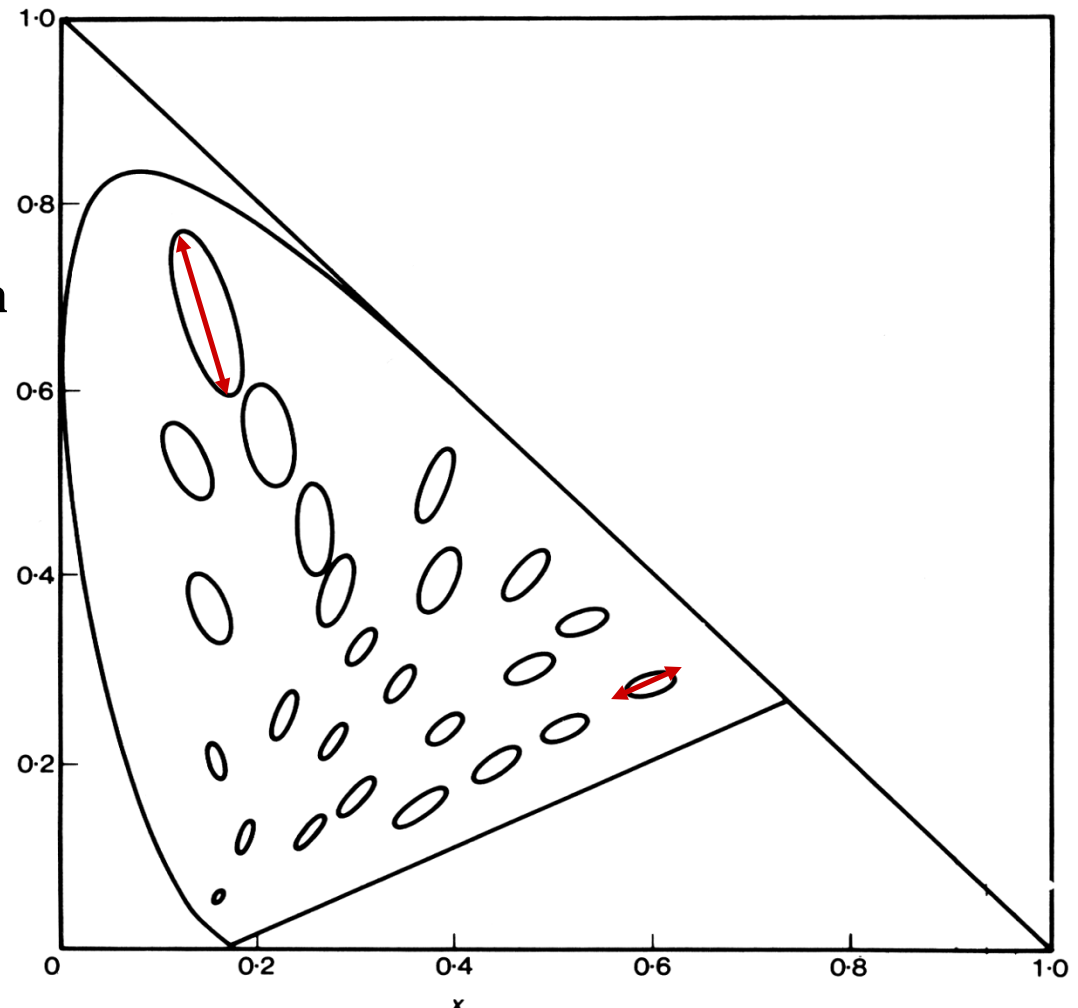
2.7 Farbtemperatur

MacAdam Ellipsen

Sie geben an, inwieweit die Farbpunkte von zwei verschiedenen Lichtquellen sich unterscheiden müssen, so dass man die Lichtquellen in ihrer Farbe unterscheiden kann.

Alle Farben innerhalb der Ellipsen werden vom menschlichen Auge als identisch wahrgenommen.

Ein Nachteil des (x, y) Koordinatensystems ist es, dass gleiche Abstände nicht gleichen Farbdifferenzen entsprechen.



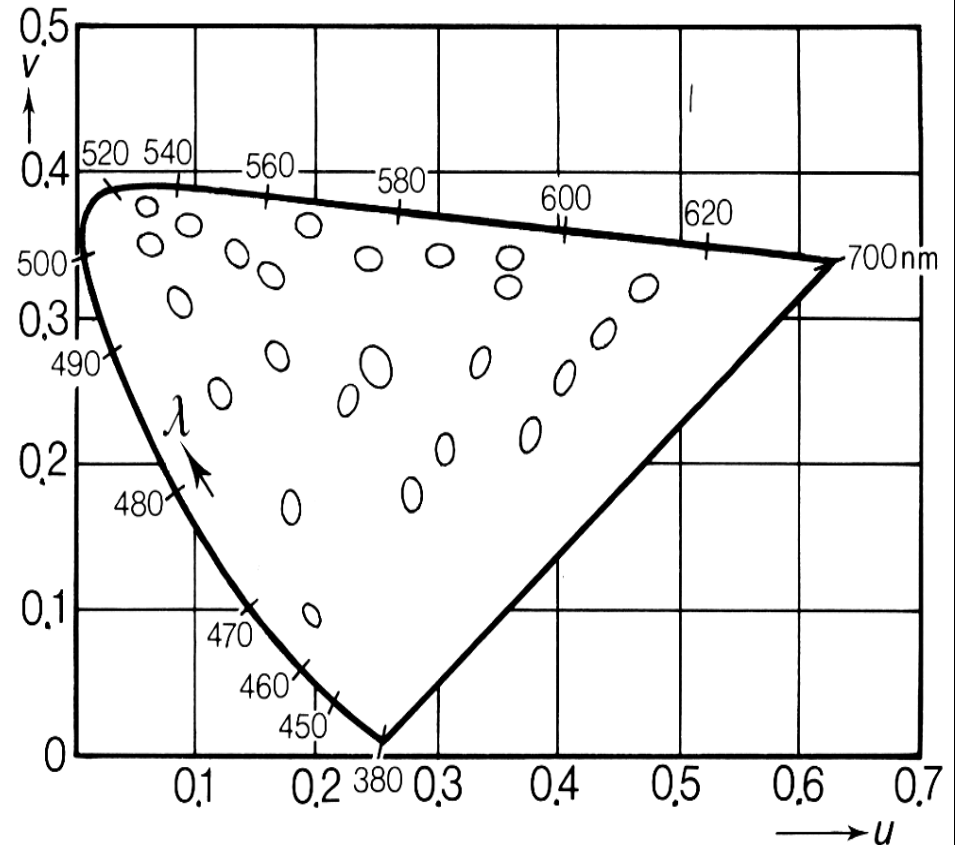
2.7 Farbtemperatur

Das (u', v') Koordinatensystem C.I.E. 1976

Transformiert man die (x, y) Koordinaten in (u', v') Koordinaten, so werden aus den MacAdam Ellipsen näherungsweise gleichgroße Kreise, d. h. gleiche geometrische Abstände entsprechen auch gleichen Farbdifferenzen

Die Transformationsgleichungen lauten:

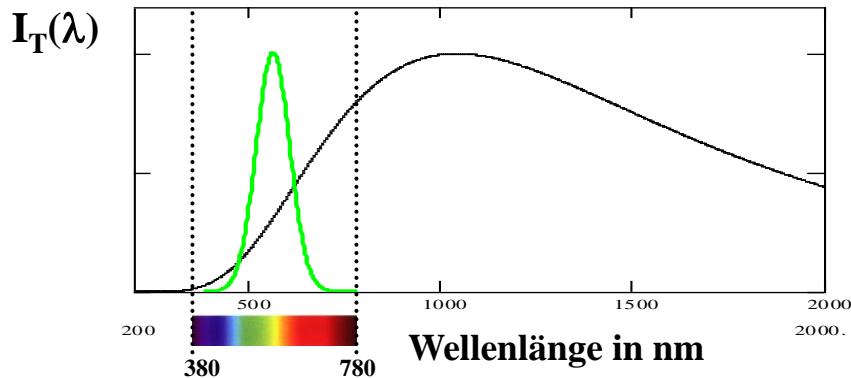
$$u' = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}$$
$$v' = \frac{6y}{-2x + 12y + 3}$$



2.8 Farbwiedergabe

Die Lichtqualität wird durch die Farbwiedergabe beschrieben

Glühlampe

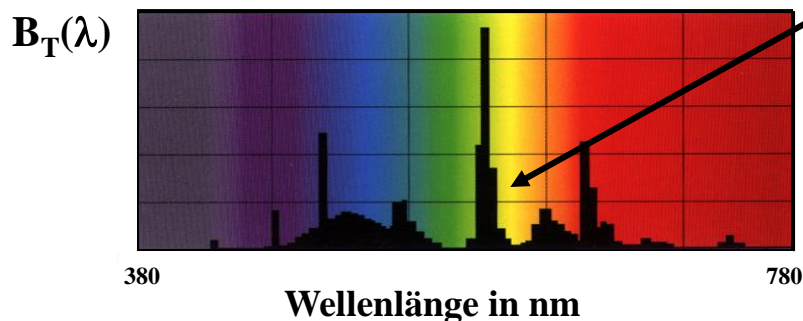


Das Spektrum enthält alle Farben
⇒ gute Lichtqualität

Farbwiedergabeindex = 100 (definiert)
(color rendering index = CRI)

Bestimmte Farben fehlen im Spektrum,
z. B. die Farbe gelb
⇒ man kann mit dieser Lichtquelle die
Farbe gelb nicht sehen

Fluoreszenzlampe



Farbwiedergabeindex < 100

Mathematische Beschreibung

$$I_T(\lambda) \cdot \rho_{gelb}(\lambda) = 0$$

2.8 Farbwiedergabe

Ein Beispiel für schlechte Lichtqualität

Die SOX-Lampe (Na-Niederdruckgasentladungslampe) emittiert monochromatisches Licht (589,0 + 589,6 nm), d.h. man kann im Licht dieser Lichtquellen keine Farben außer gelb wahrnehmen

Der Farbwiedergabeindex ist somit sehr niedrig sein

Bezugslichtarten:	$I_T(\lambda)$
Glühlampe	2700 K
D50	5000 K
D65	6500 K

Plate 8 Relative spectral energy distribution of a low pressure sodium lamp, with human eye sensitivity curve $V(\lambda)$. The two yellow resonance lines of the low pressure sodium discharge at 589 and 589.6 nm lie close to the eye sensitivity maximum at 555 nm, the cause of the high efficacy of this lamp type.

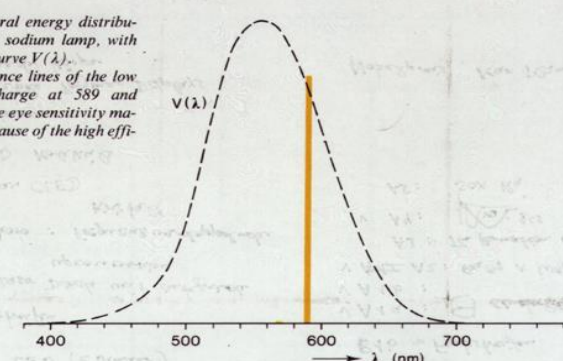


Plate 9 Motorway lighting with low pressure sodium lamps.


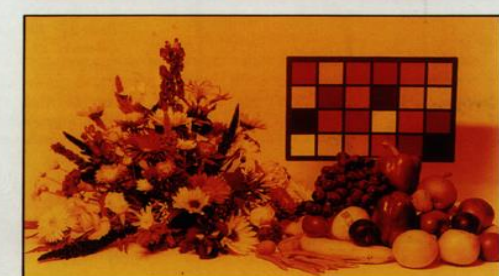


Plate 10 Colour photograph of illumination with a low pressure sodium lamp. Differences in colour are visible only as contrasts in grey.



2.8 Farbwiedergabe

Bestimmung des Farbwiedergabeindex

Definition von R_a (8 Testfarben)

1. Schritt: Man nehme die 8 Testfarben bzw. deren Reflexionsspektren $\rho_i(\lambda)$

2. Schritt: Man berechne von

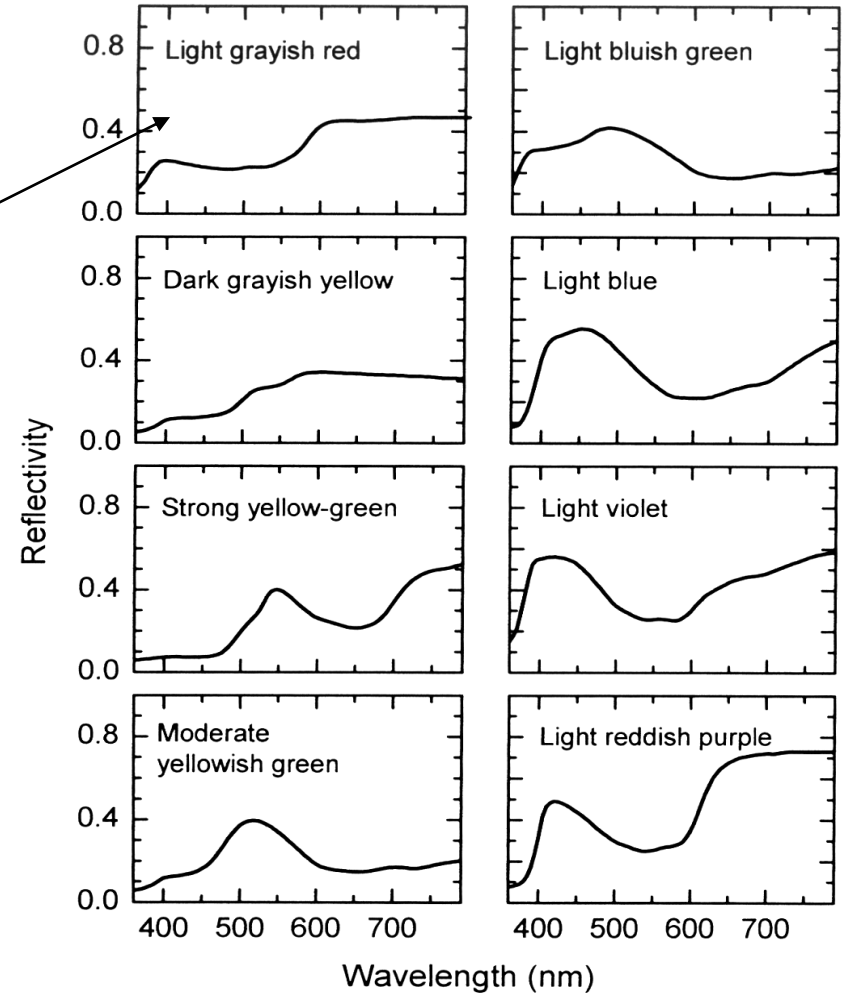
$$I_T(\lambda) \cdot \rho_i(\lambda) \rightarrow (u^*, v^*)$$

$$B_T(\lambda) \cdot \rho_i(\lambda) \rightarrow (\tilde{u}^*, \tilde{v}^*)$$

den **Abstand**

3. Schritt: $R_i = 100 - 4,6 * \text{Abstand}$

4. Schritt: $R_a = 1/8 * (R_1 + \dots + R_8)$

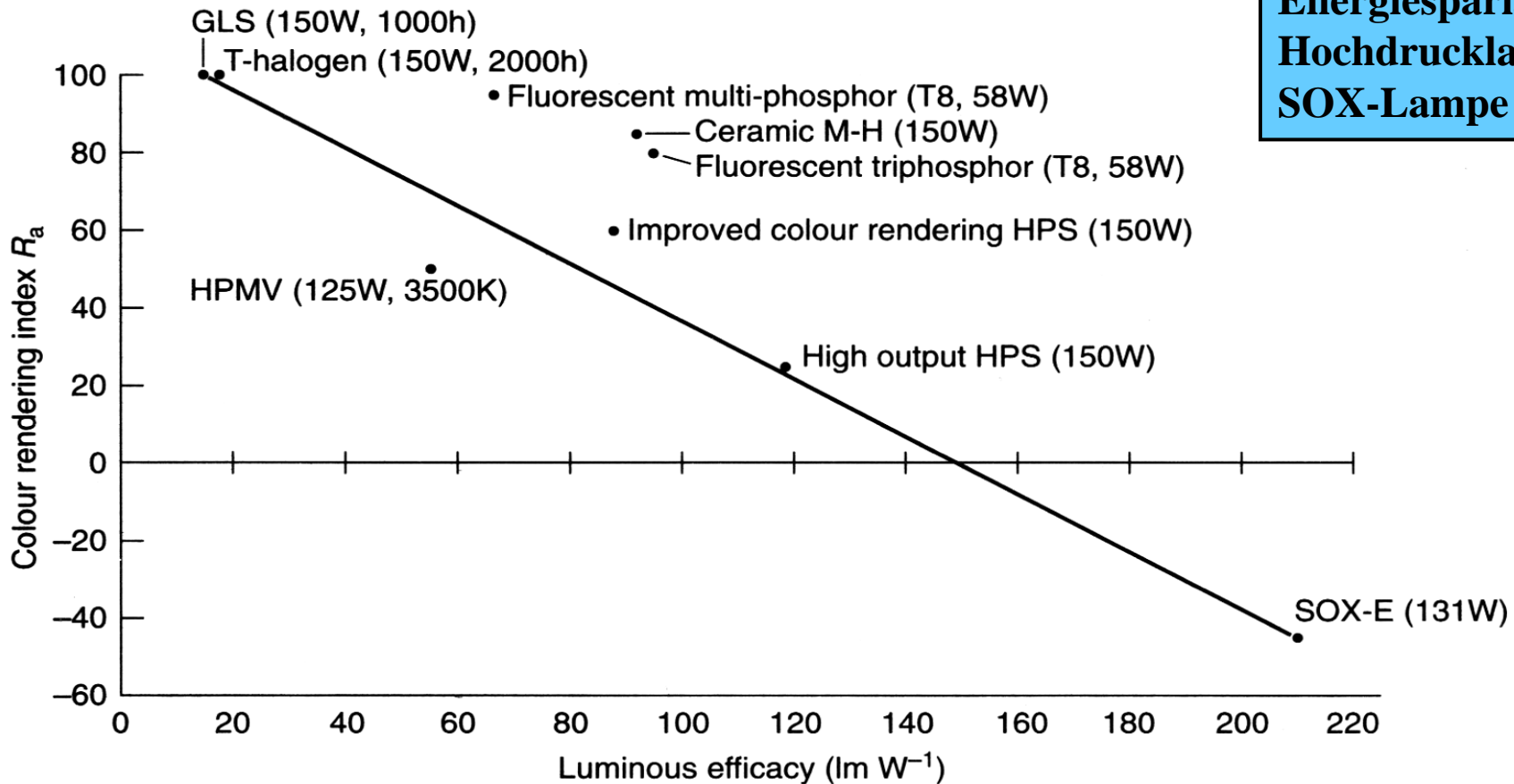


2.8 Farbwiedergabe

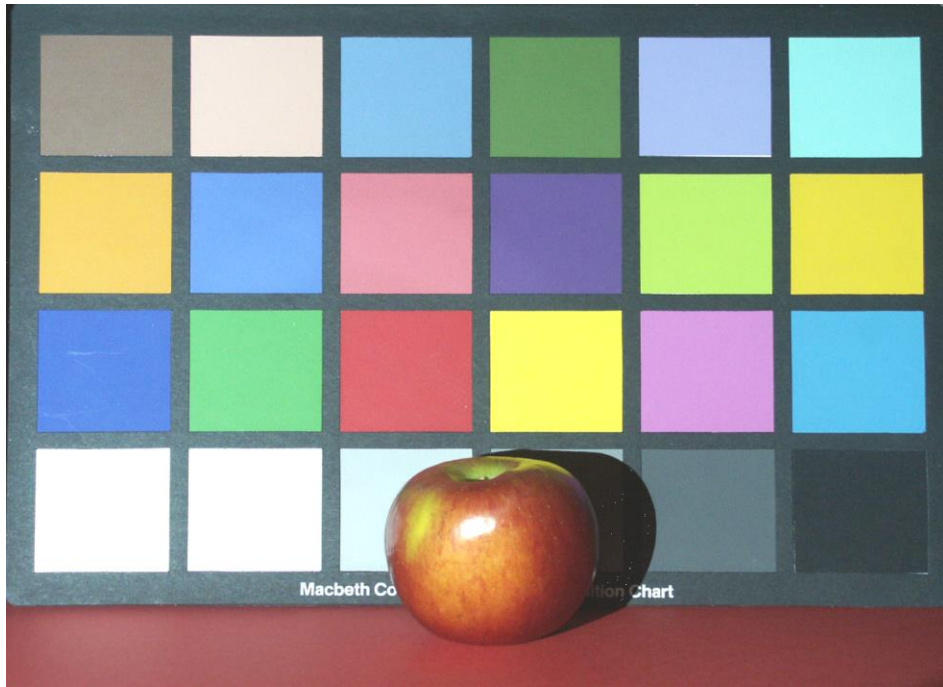
Effizienz gegen Farbwiedergabeindex R_a

<u>Typische R_a Werte</u>	
Glühlampe	100
Energiesparlampe	80
Hochdrucklampe	50
SOX-Lampe	< 0

Chart of luminous efficacy against colour rendition



2.8 Farbwiedergabe



$Ra_8 \approx 65$

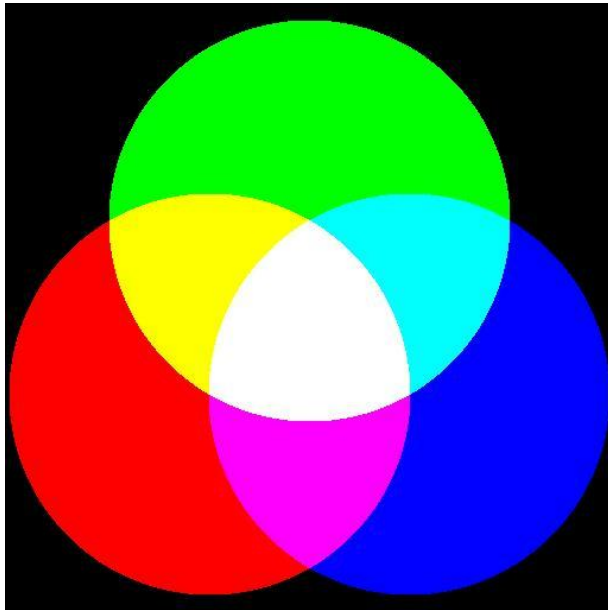
$Ra_8 \approx 95$



2.9 Additive Farbmischung

Primärfarben: Blau, Grün, Rot

Die Farbeindruck einer Lichtquelle entsteht durch die Überlagerung der im Spektrum enthaltenen Grundfarben

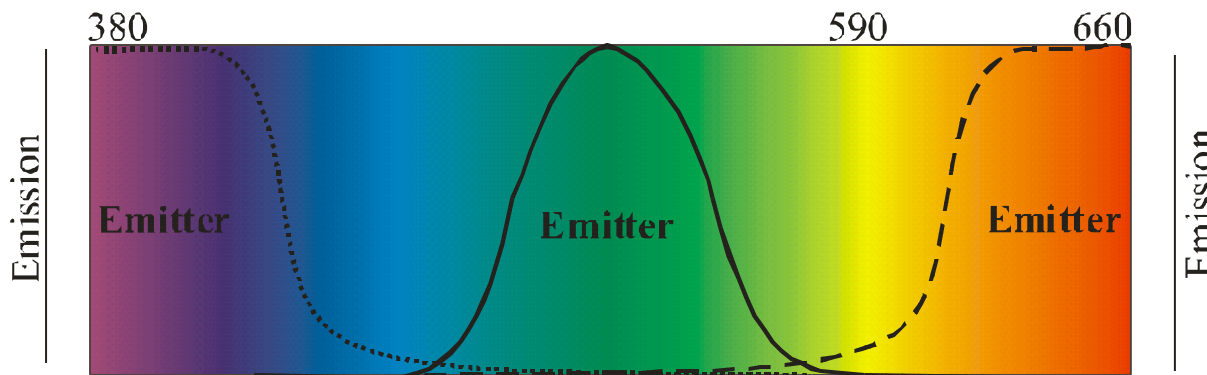


Blau + Rot = Magenta

Rot + Grün = Gelb

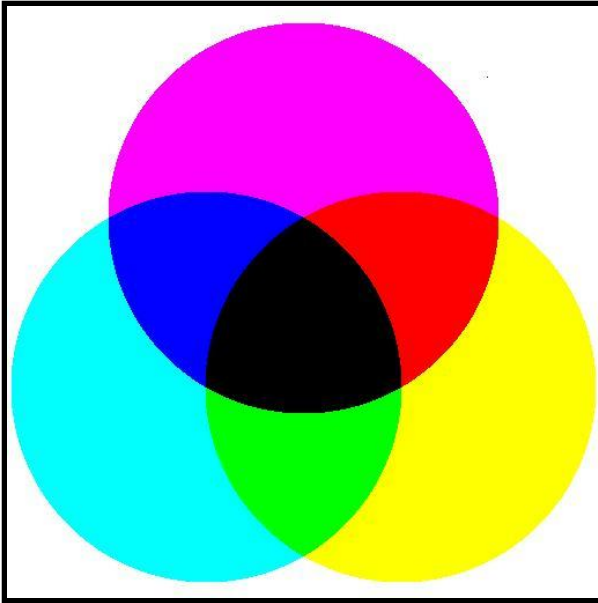
Grün + Blau = Cyan

Lichtquellen, Bildschirme



2.10 Subtraktive Farbmischung

Primärfarben: Cyan, Magenta, Gelb



Der Farbeindruck eines Pigments entsteht durch die selektive Absorption bestimmter Farben aus dem Spektrum des weißen Lichtes

Gelb + Cyan = Grün

Gelb + Magenta = Rot

Magenta + Cyan = Blau

Malerei, Farbdrucker

