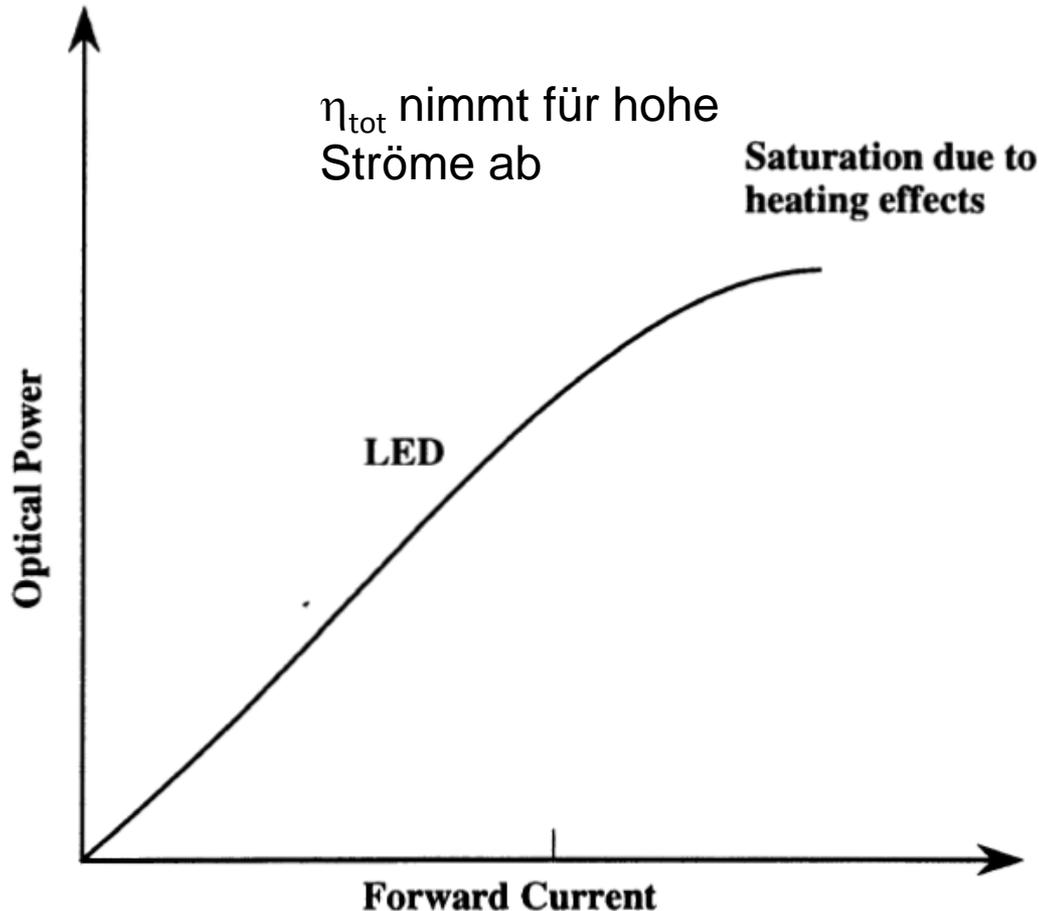


# LED-Leistungsmerkmale

- Die LED basiert auf dem spontanen Emissionsprozess ab, der das Licht aus den injizierten Elektronen und Löchern erzeugt.
- Im Vergleich zu einer Laserdiode ist die Herstellung einer LED relativ einfach.
- Dafür muss jedoch auch ein Preis in den **Leistungsmerkmalen** gezahlt werden
- Die wichtigsten Leistungsmerkmale sind:
  - **Licht-Strom Charakteristik**
  - **spektraler Reinheit**
  - **Zeitverhalten**
  - **Temperaturverhalten**

# Licht-Strom-Charakteristik

Wird ein Strom  $I$  durch eine in Vorwärtsrichtung gepolte LED geschickt, so wird ein bestimmter Bruchteil des Stroms in Licht konvertiert.



Ist  $\eta_{tot}$  die gesamte Effizienz dieser Konversion, dann gilt für den von der Diode emittierten Photonenstrom

$$I_{ph} = \eta_{tot} \cdot \frac{I}{q}$$

Im allgemeinen ist dabei

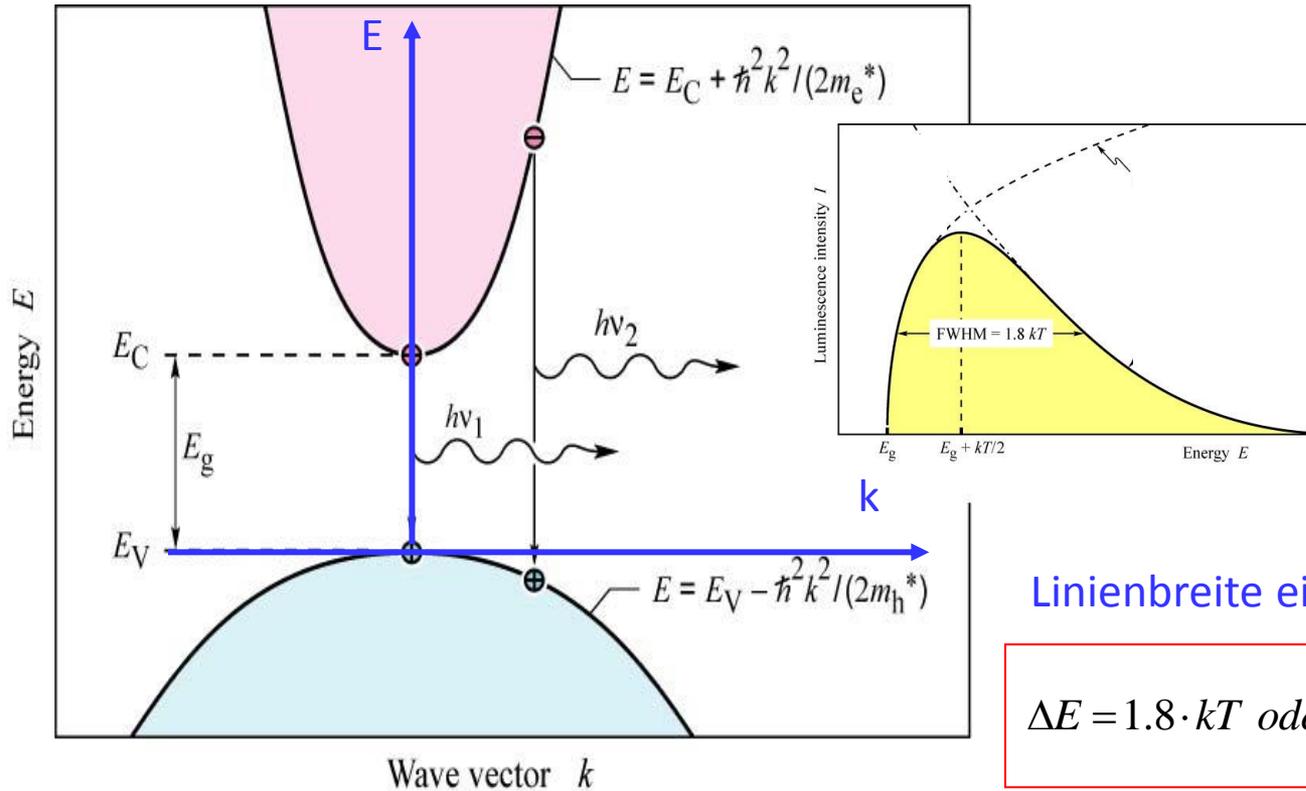
$$\eta_{tot} = \eta_{Qr} \cdot \gamma_{inj} \cdot \eta_{opt}$$

$\eta_{Qr}$  = interne Quantenausbeute

$\gamma_{inj}$  = Injektionseffizienz

$\eta_{opt}$  = Extraktionseffizienz

# Spektrale Reinheit



Für niedrige Injektion:

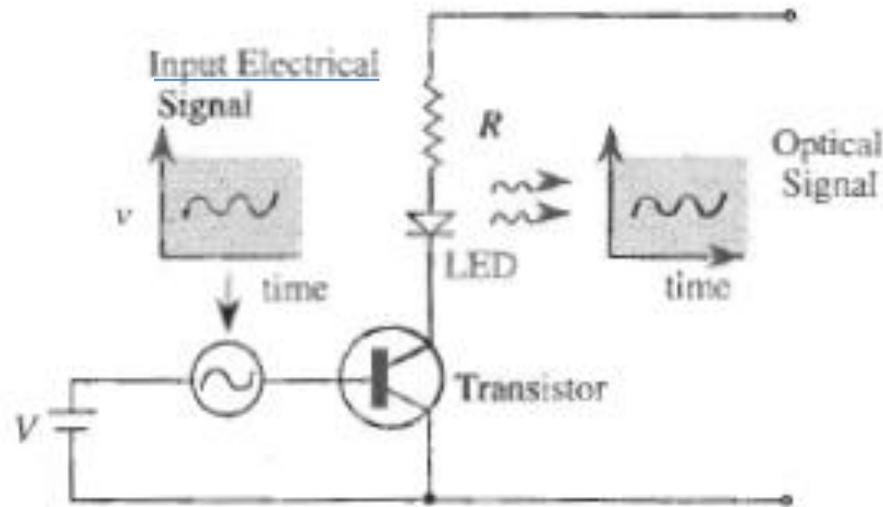
$$FWHM \approx kT$$

Für hohe Injektion ( $n \geq N_c$ ):

$$FWHM \approx \frac{n}{N_c} \cdot kT$$

# Modulationsverhalten

Wichtig für die Signalübertragung ist die Konversion eines elektrischen Signals in ein optisches Signal. Dazu ist unten ein typischer Schaltkreis zur Erzeugung eines optischen Signals mit Hilfe einer LED dargestellt.



Eine LED ist grundsätzlich eine in Vorwärtsrichtung betriebene p-n Diode, in der Minoritätsladungsträger in den aktiven Bereich injiziert werden. Um das austretende Signal zu modulieren müssen deshalb die injizierten Ladungsträger moduliert werden.

# Modulationsverhalten

- Das Modulationsverhalten wird durch zwei Faktoren bestimmt:
  - wie schnell lässt sich die Spannung an der Diode ändern
  - wie reagiert die Lichtemission auf eine Modulation der Spannung
- Modulation des Spannung:
  - Ersatzschaltbild: R und C in Serie => RC bestimmt Modulierbarkeit
  - möglichst geringer Serienwiderstand!!
  - möglichst kleine Kapazität  $\Leftrightarrow$  begrenzt durch Diodenfläche  
(Beachte: optische Leistung  $\sim$  Fläche)
- Modulation Strom/Licht:
  - injizierte Minoritätsladungsträger müssen verschwinden
  - Modulationsgeschwindigkeit wird durch Rekombinationszeit bestimmt  
(Kleinsignalverhalten)
  - durch „Carrier-Sweep-Out“ kann die Fall-time reduziert werden ( $\sim$ Faktor 3)
  - Hier werden die Minoritätsträger durch eine „Gegenspannung“ aus der aktiven Zone geholt (Großsignalverhalten)

# Modulationsverhalten

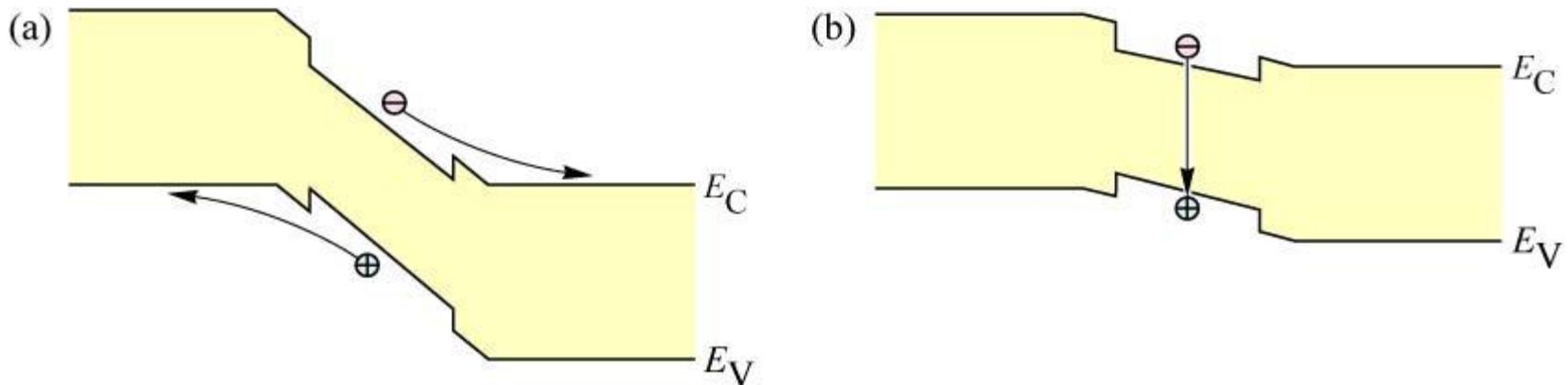


Fig. 24.4. Illustration of two mechanisms determining the fall time. (a) Return to zero bias results in carrier sweep-out of the active region. The sweep-out time can be very short,  $\ll 1$  ns. (b) If the modulating voltage amplitude is smaller, carriers are *not* swept out of the active region, so that the intensity decay is determined by the spontaneous recombination lifetime.

# Modulationsverhalten

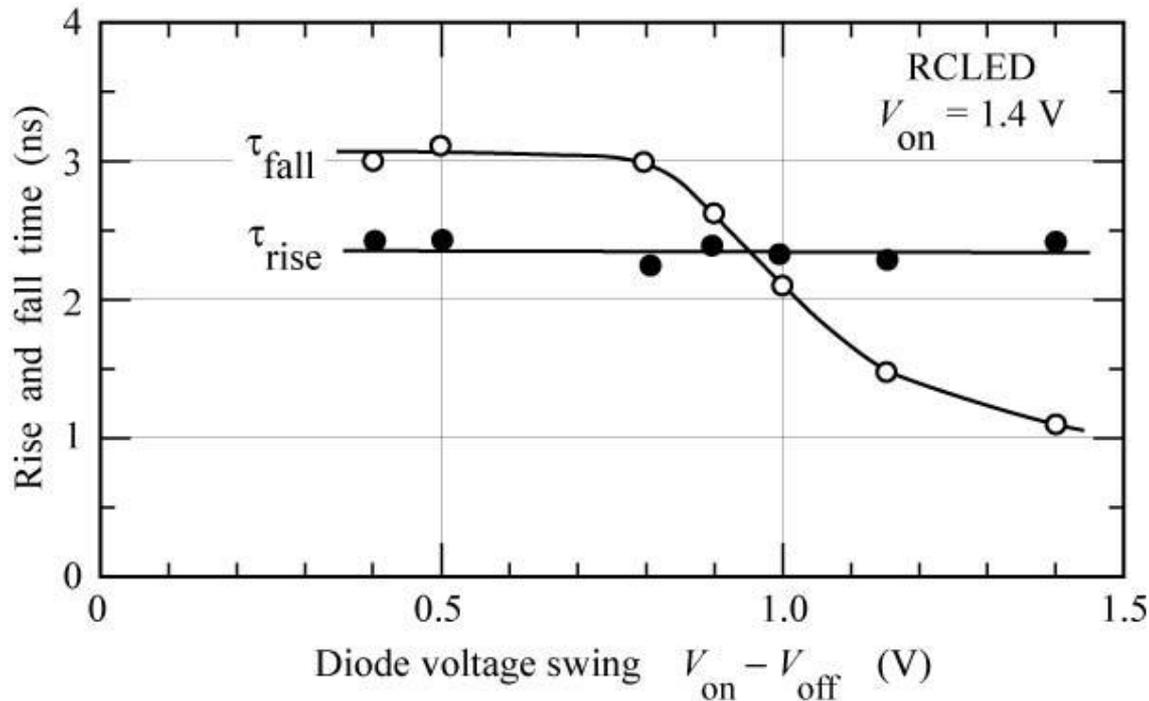
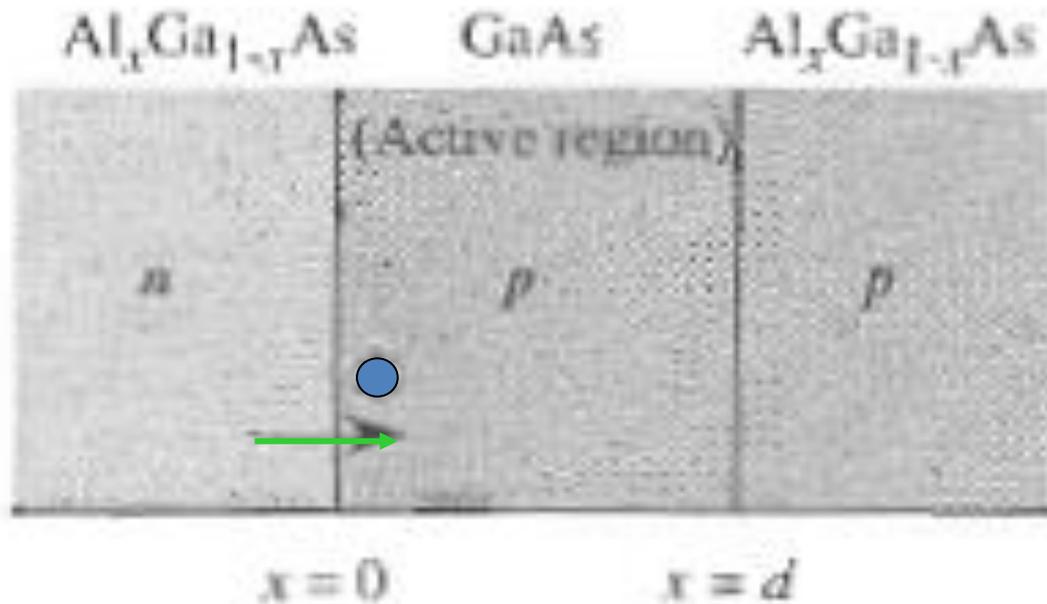


Fig. 24.3. Rise time and fall times as a function of the voltage swing. The fall time of the diode decreases with increasing voltage swing due to sweep-out of carriers out of the active region.

# Kleinsignalmodulation: Geometrie

## Minoritätsladungsträgerinjektion



# Kleinsignalmodulation

Die Kontinuitätsgleichung für die Ladungsträger (wir betrachten nur e-Injektion)

$$\frac{dn(x)}{dt} = -\frac{n(x)}{\tau} + D_n \frac{\partial^2 n(x)}{\partial x^2}$$

Wobei der erste Term die Rekombination der Ladungsträger beschreibt (einschließlich der

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}}$$

nicht-strahlenden Prozesse) und der zweite Term die Diffusionskomponente des Teilchenstromflusses ist.

Da in einem vorwärtsbetriebenen p-n-Übergang die elektrischen Felder klein sind, kann jetzt der Driftstrom vernachlässigt werden.

Durch Anlegen eines kleinen Modulationssignals (Kleinsignalmodulation)

$$J(x, t) = J_0(x) + J_1(x) \cdot \exp(i\omega t)$$

$$n(x, t) = n_0(x) + n_1(x) \cdot \exp(i\omega t)$$

# Kleinsignalmodulation

Einsetzen in die Kontinuitätsgleichung liefert

$$D_n \frac{\partial^2 n_0(x)}{\partial x^2} - \frac{n_0(x)}{\tau} = 0$$

Gleichstromanteil

$$D_n \frac{\partial^2 n_1(x)}{\partial x^2} - \frac{n_1(x)}{\tau} = i\omega n_1(x)$$

Wechselstromanteil

bzw. 
$$D_n \frac{\partial^2 n_1(x)}{\partial x^2} - \frac{(1-i\omega\tau)}{\tau} n_1(x) = 0$$

Definieren wir jetzt  $L_n = \sqrt{D_n \tau}$  und  $L_n(\omega) = \sqrt{\frac{D_n \tau}{1+i\omega\tau}}$

So erhalten wir:  $\frac{\partial^2 n_0(x)}{\partial x^2} = \frac{n_0(x)}{L_n^2}$   $\longrightarrow$   $n_0(x) = n \cdot \exp\left(-\frac{x}{L_n}\right)$

$$\frac{\partial^2 n_1(x)}{\partial x^2} = \frac{n_1(x)}{L_n^2(\omega)}$$

Wir können jetzt die zeitliche Antwort einer LED durch die **Übertragungsfunktion  $r(\omega)$**

$$r(\omega) := \frac{J_{\text{photon}_1}(\omega)}{\frac{J_1(\omega)}{q}} = \frac{q \cdot J_{\text{photon}_1}(\omega)}{J_1(\omega)}$$

definieren, d.h. durch das Verhältnis des AC-Anteils der Photonenstromdichte zum AC-Anteils der Elektronenstromdichte

# Kleinsignalmodulation: Photonenstromdichte

$r(\omega) \Rightarrow 0 =$  keine Lichtmodulation bei Variation des Stroms

Unter der Annahme, dass nur Elektronen für den Stromfluss verantwortlich sind gilt:

$$n_1(x=0) = n_1(0)$$

Des Weiteren nehmen wir an, dass die Ladungsträger rekombinieren bevor sie den Rand der aktiven Zone erreichen, d.h.  $L_n \ll d$ .

$$n_1(x=d) = 0$$

Damit erhalten wir als Lösung unserer Gleichung

$$n_1(x) = n_1(0) \cdot \exp\left(-\frac{x}{L_n(\omega)}\right)$$

Die **Photonenstromdichte**  $J_{ph}$  erhalten wir durch Integration über die aktive Zone

$$\begin{aligned} J_{ph}(\omega) &= \frac{1}{\tau} \cdot \int_0^d n_1(\omega) dx = \frac{1}{\tau} \cdot \int_0^d n_1(0) \cdot \exp\left(-\frac{x}{L_n(\omega)}\right) dx = \\ &= \frac{1}{\tau} \cdot n_1(0) \int_0^d \exp\left(-\frac{x}{L_n(\omega)}\right) dx = \frac{1}{\tau} \cdot n_1(0) (-L_n(\omega)) \exp\left(-\frac{x}{L_n(\omega)}\right) \Bigg|_0^d \end{aligned}$$

$$J_{ph}(\omega) = \frac{n_1(0)}{\tau} L_n(\omega)$$

# Kleinsignalmodulation: Bandbreite

Für die elektrische Stromdichte  $J_1$  gilt

$$J_1(\omega) = q \cdot D_n \cdot \frac{dn_1(x)}{dx} = -q \cdot D_n \frac{n_1(0)}{L_n(\omega)}$$

sodass für die Übertragungsfunktion:

$$r(\omega) := \frac{q \cdot J_{ph1}(\omega)}{J_1(\omega)} = \frac{|L_n(\omega)|^2}{\tau D_n} = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}$$

$$L_n(\omega) = \sqrt{\frac{D_n \tau}{1 + i\omega\tau}}$$

In diesem Ausdruck sehen wir wie wichtig die **Rekombinationszeit**  $\tau$  ist und **die Bandbreite einer LED limitiert**.

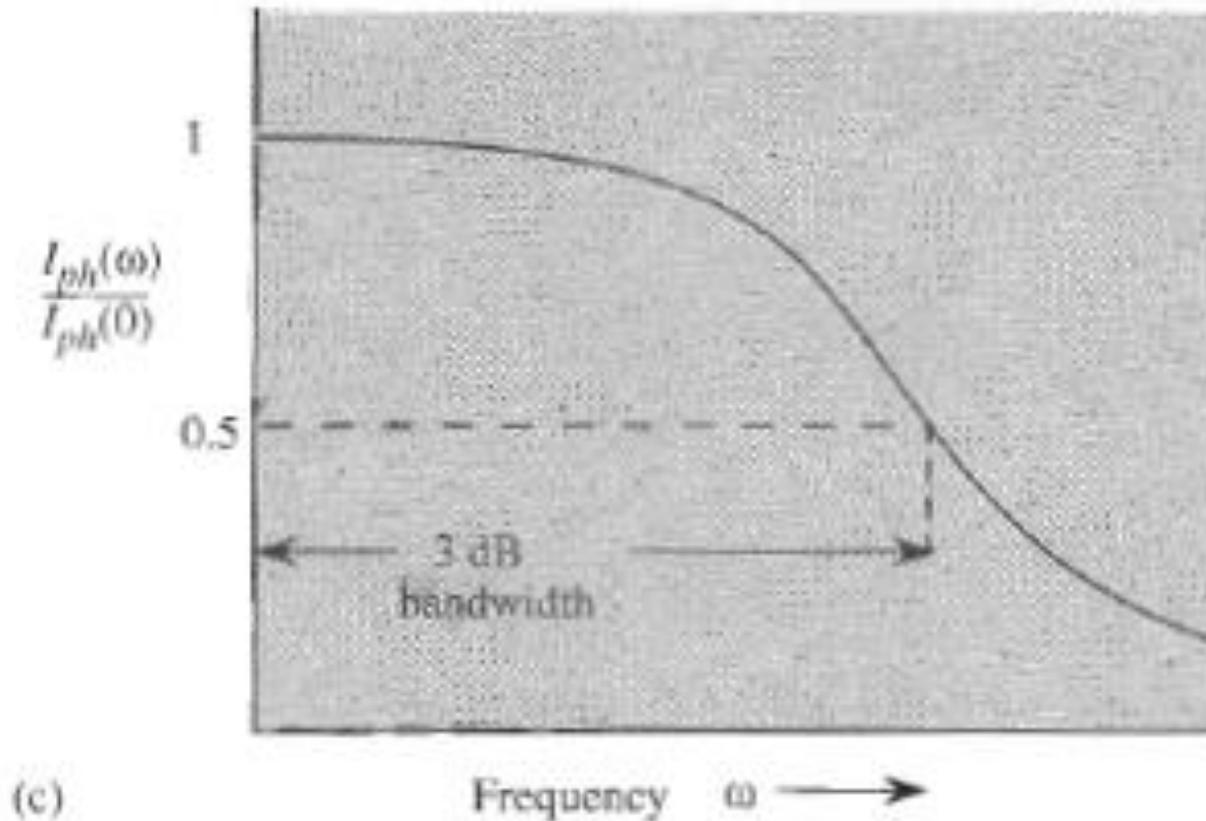
Die **Modulationsbandbreite**  $f_c$  ist als diejenige Frequenz  $f_c$  definiert, bei der die Leistungsamplitude die Hälfte des Wertes annimmt bei  $\omega = 0$  (3dB-Bandbreite)

$$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{1}{\tau}$$

mit

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}}$$

# Kleinsignalmodulation: Übertragungskennlinie



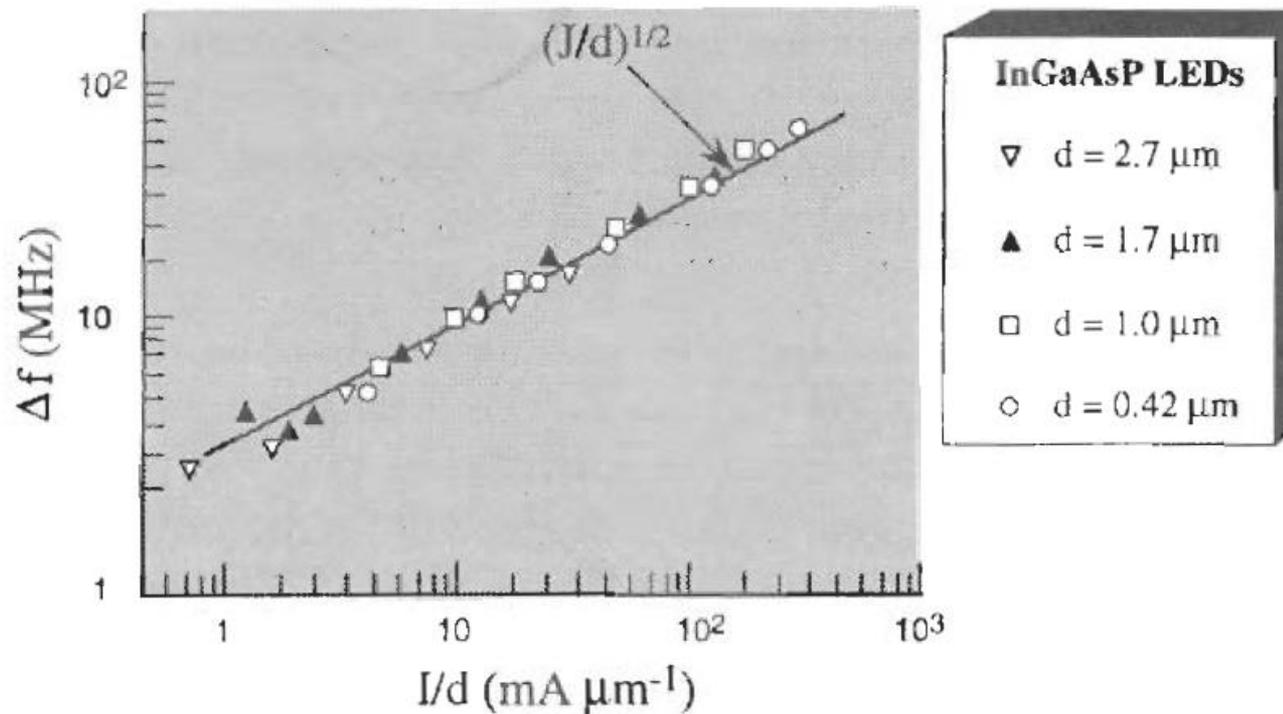
$$3dB \square \frac{I_{ph}(\omega)}{I_{ph}(\omega \rightarrow 0)} = \frac{1}{2}$$

Genauer eigentlich -3dB

# Kleinsignalmodulation: Modulationsbandbreite

Bei hochwertigen Bauelementen wird  $\tau \sim \tau_r$ ; nichtstrahlende Prozesse machen die LED zwar schneller, aber sind unerwünscht.

Da die strahlende Lebensdauer von der Ladungsträgerdichte oder der Dotierung der aktiven Schicht abhängt, wird jetzt durch Injektion von mehr Strom die Rekombinationszeit  $\tau$  kleiner und die Modulationsbandbreite nimmt zu.



$$J = \frac{qnd}{\tau} \quad \frac{J}{d} \approx \frac{1}{\tau}$$
$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau} \quad f_c \approx \frac{J}{d}$$

# Kleinsignalmodulation: Modulationsbandbreite

Beachte auch, dass die Ladungsträgerdichte in der aktiven Zone proportional zu  $J/d$  ( $=I/Ad = I/V$ ) ist, wobei  $J$  die Stromdichte und  $d$  die Dicke der aktiven Zone ist. Je dünner die aktive Schicht ist, desto höher wird bei gleichem Injektionsstrom die Ladungsträgerdichte und damit verbunden ist eine kürzere Rekombinationszeit und eine höhere Modulationsbandbreite.

Zwei Möglichkeiten um Modulationsbandbreite zu erhöhen:

1. **Verringerung der aktiven Zone**
2. **Erhöhung der Dotierung der aktiven Schicht**

Die ultimative Bandbreite der LED ist durch die Zeit  $\tau_0$  bestimmt. Für GaAs ergibt sich:

$$f_{c\_max} = \frac{1}{2\pi\tau_0} = 2.65 \cdot 10^8 \text{ Hz} \cong 260 \text{ MHz}$$

# Kleinsignalmodulation: Ausgangsleistung

Zusätzlich zur Modulationsgeschwindigkeit benötigt man für viele Anwendungen auch hohe Ausgangsleistungen (Kommunikation, Anzeigesysteme,...). Diese beiden Forderungen lassen sich aber nicht immer vereinbaren. Für hohe optische Leistung benötigt man ein Bauelement mit möglichst langer aktiver Zone wie aus folgender Überlegung ersichtlich wird.

Der Photonenstrom ist

$$I_{ph} = \eta_{tot} \cdot \frac{I}{q} = \eta_{tot} \frac{n \cdot d \cdot A}{\tau_r}$$

Die optische Leistung einer LED ist damit

$$P_{opt} = I_{ph} \cdot \hbar\omega = \eta_{tot} \cdot \frac{\hbar\omega \cdot n \cdot d \cdot A}{\tau_r}$$

Um die Ausgangsleistung zu erhöhen sollte man folgendes beachten:

# Kleinsignalmodulation: Ausgangsleistung

## i) Injizierte Ladungsträgerdichte:

Durch Erhöhung der Ladungsträgerkonzentration kann die Ausgangsleistung nicht beliebig erhöht werden

- a) Aufwärmungsproblematik
- b) Augerrekombination
- c) Leckströme

→ maximal injizierte Ladungsträger ca.  $10^{18}\text{cm}^{-3}$ . →  $\tau_r \sim 1$  bis 2 ns

## ii) Bauelementfläche:

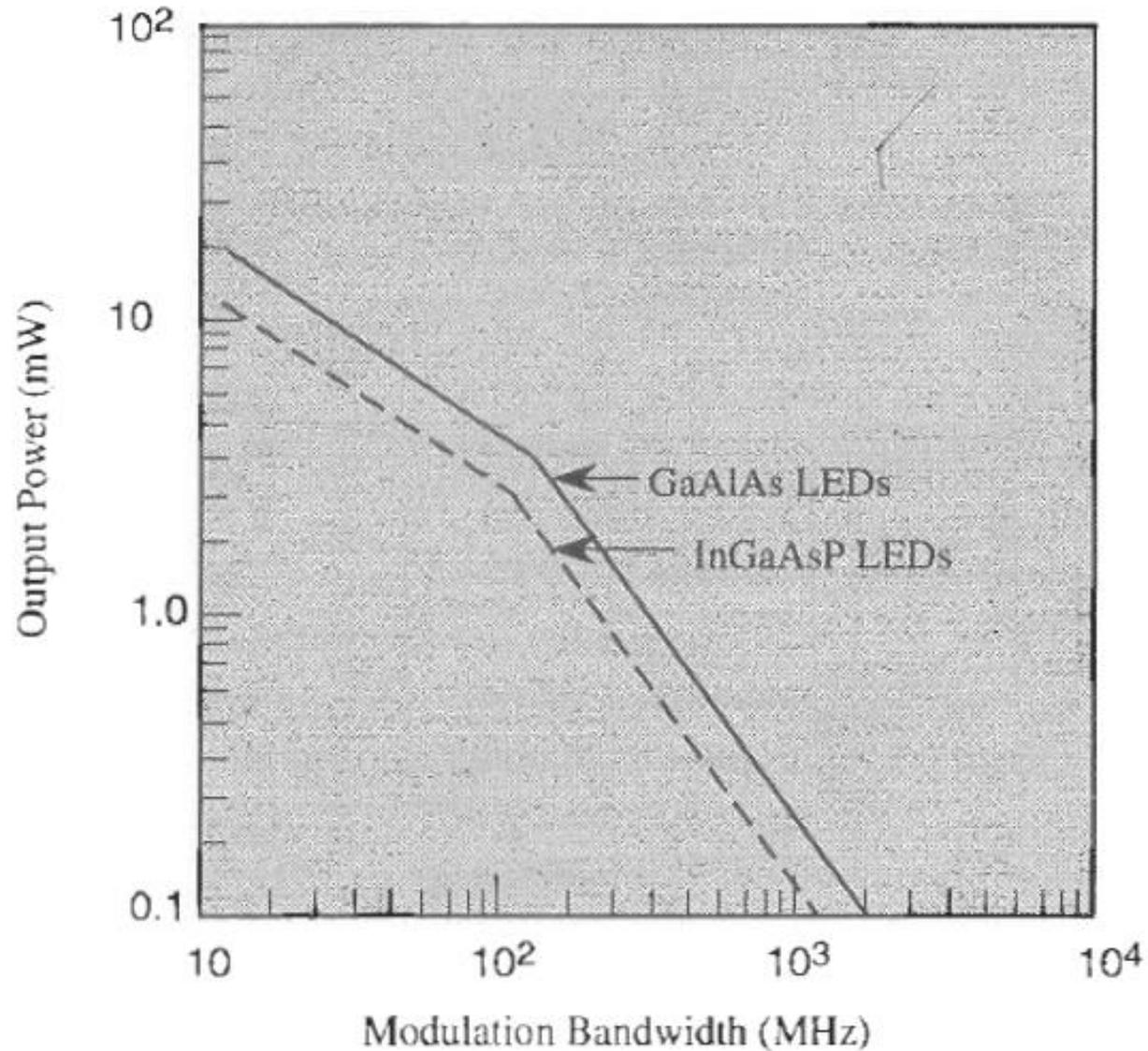
Vergrößerung der Fläche kann ebenfalls Ausgangsleistung erhöhen, dies wird jedoch durch die Herstellungstechnologie begrenzt – Zunehmende Anzahl der Defekte.

Zusätzlich wird auch die Kapazität größer => RC-Konstante begrenzt Modulationsgeschwindigkeit

## iii) Aktive Dicke des verstärkenden Bereichs:

Eine Verbreiterung der aktiven Schicht  $d$  führt zu einer Begrenzung der Bandbreite der LED aufgrund von Transiteffekten. Die Transitzeit ist durch Diffusionsprozesse kontrolliert und durch folgende Beziehung  $\tau_{tr} \sim d^2/2D$  gegeben, wobei  $D$  der Diffusionskoeffizient der langsameren Ladungsträger ist (Löcher).

# Ausgangsleistung vs. Modulationsbandbreite



# Zuverlässigkeit/Leistungsmerkmale

Lichtausgangsleistung soll über einen langen Zeitraum konstant bleiben!

LED-Fehler werden in 3 Kategorien unterteilt:

a) Kindheitsfehler (infant failure)

Verhinderung durch anfängliche Einbrenntests (burn-in),  
wobei das Bauelement mit hoher Leistung über 100 h betrieben wird

b) Verrückte, statistische Fehler

extreme statistische Fluktuationen in Bauelementdefekten

c) Langsam fortschreitende Fehler

graduelle Degradation der Ausgangsleistung

→ große „mittlere Ausfallszeit“ (mean time to failure MTTF - 3dB drop)

GaAs basierende LEDs >  $10^6$  h

InP basierende LEDs >  $10^9$  h

Wichtiger Fehlermechanismus für GaN-LEDs:

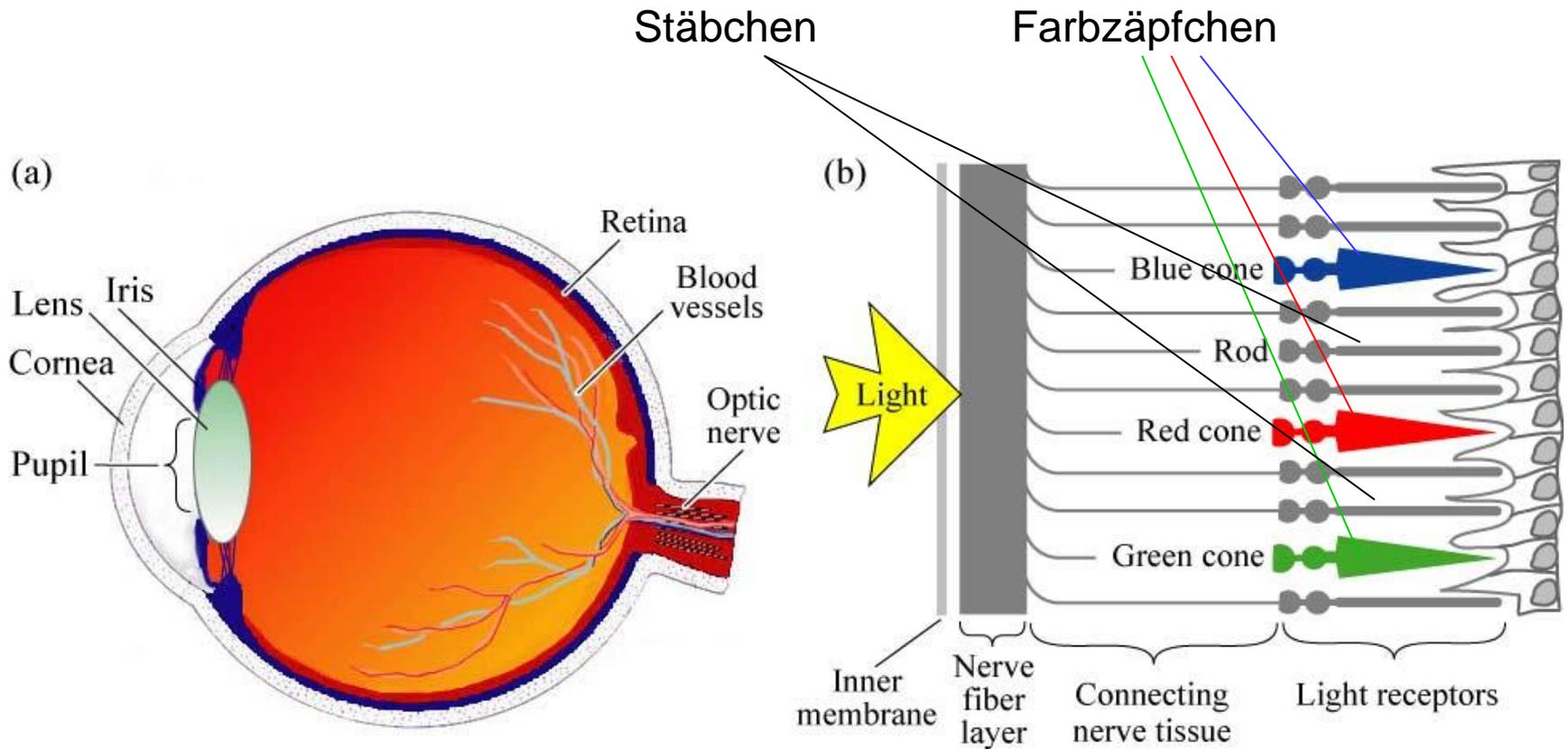
Wanderung von Versetzungslinien in die aktive Zone

→ Dark line defects

# Leistungsmerkmale für Beleuchtungsanwendungen

- Modulationsgeschwindigkeit spielt keine Rolle
- Leistung ist wichtig (Helligkeit)
- Effizienz ist wichtig (Energiesparen)
- spektrale Anforderungen  $\Leftrightarrow$  menschliches Auge

# Farbempfindlichkeit des Auges



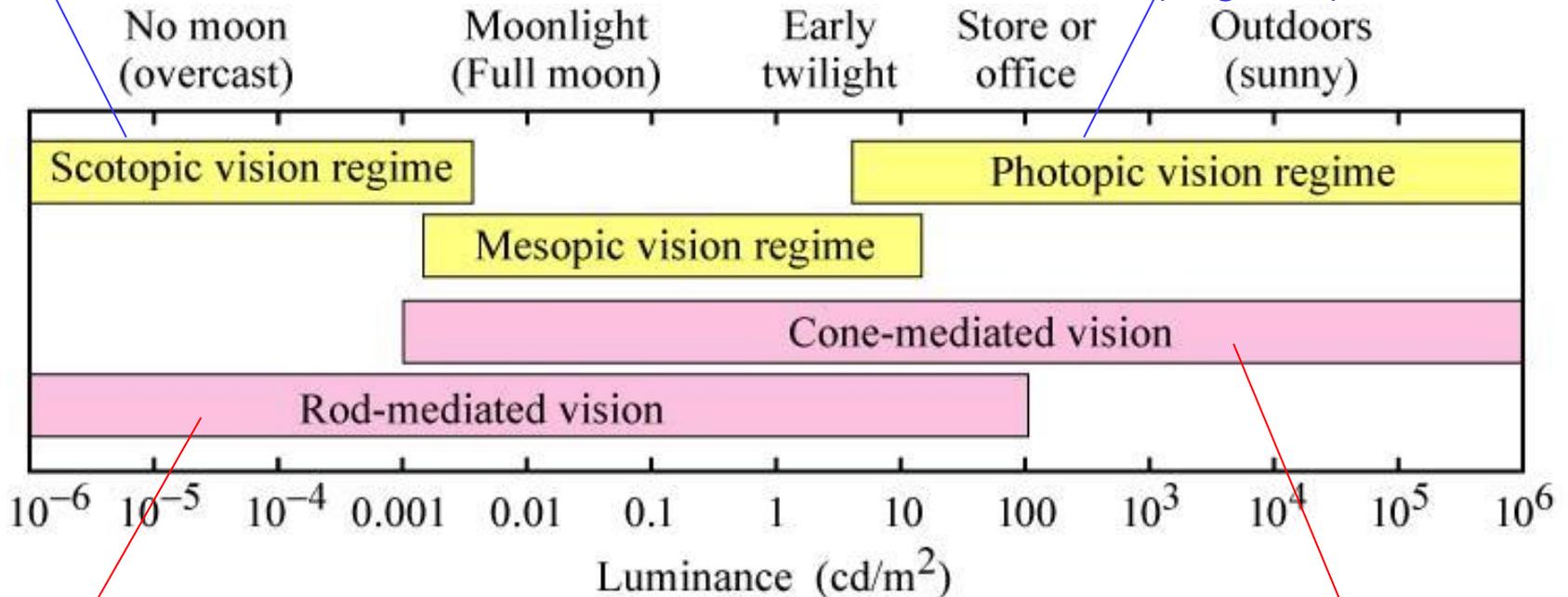
(a) Cross section through a human eye. (b) Schematic view of the retina including rod and cone light receptors (adapted from Encyclopedia Britannica, 1994).

# Empfindlichkeit des Auges

Ungefährer Bereich der Sichtbarkeit und der Rezeptorenbereiche

Skotisches Sehen  
(Nachtsicht)

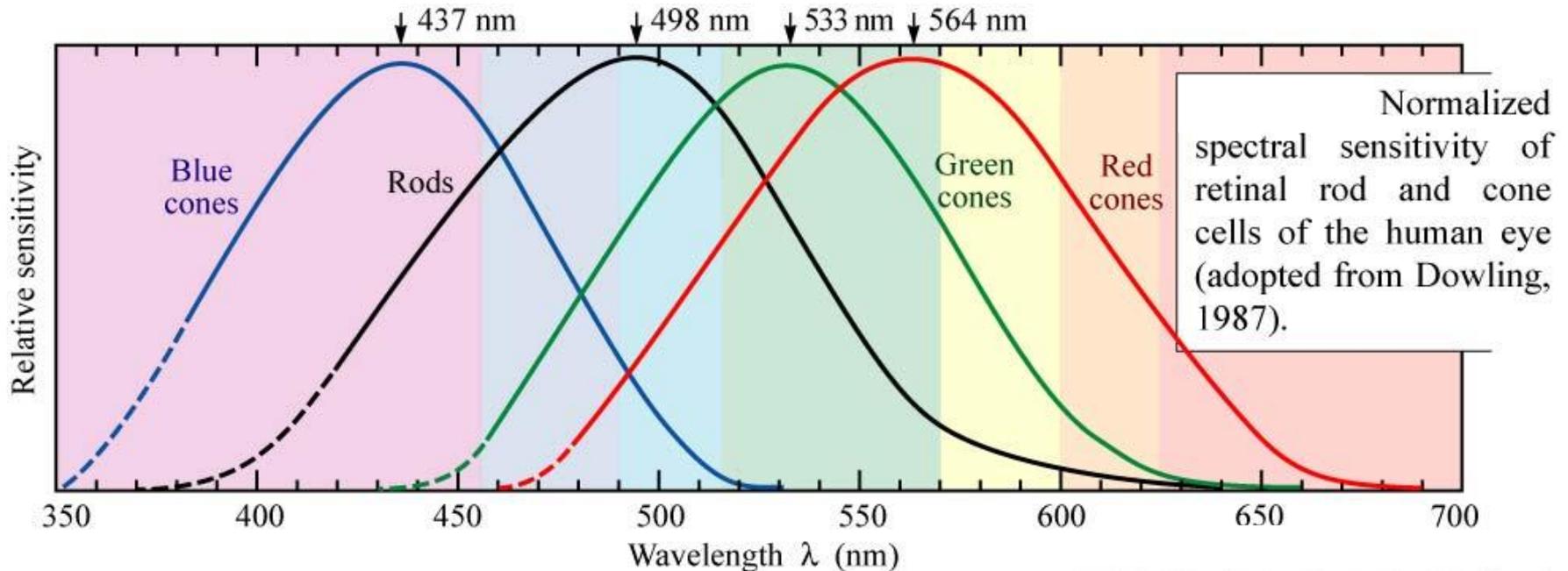
Photopisches Sehen  
(Tagsicht)



Stäbchen

Zäpfchen

# Spektrale Empfindlichkeit von Stäbchen und Zäpfchen



Skoptisches Sehen (Nachtsicht) ist unempfindlicher im roten Spektralbereich

# Radiometrie/Fotometrie

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

# Photometrische Basiseinheit: Candela

## 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 Gesamtlichtmenge 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  $1/683$  Watt pro Steradian (Raumeinheitswinkel) aussendet.

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



# Definitionen: Photometrische Größen

## **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.

# Definitionen: Photometrische Größen

## 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 $E$ (lux=lm/m<sup>2</sup>)

SI-Einheit: Lux; abgekürzt: lx

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>

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

Beachte: In alle Definitionen geht die Empfindlichkeit des Auges ein!!

# Definitionen: Photometrische Größen (Farben)

## **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

# Definitionen: Photometrische Größen

**Lichtstrom** (Einheit: lm)  $\Phi_{lum} = 683 \frac{lm}{W} \int_{\lambda} V(\lambda) P(\lambda) d\lambda$

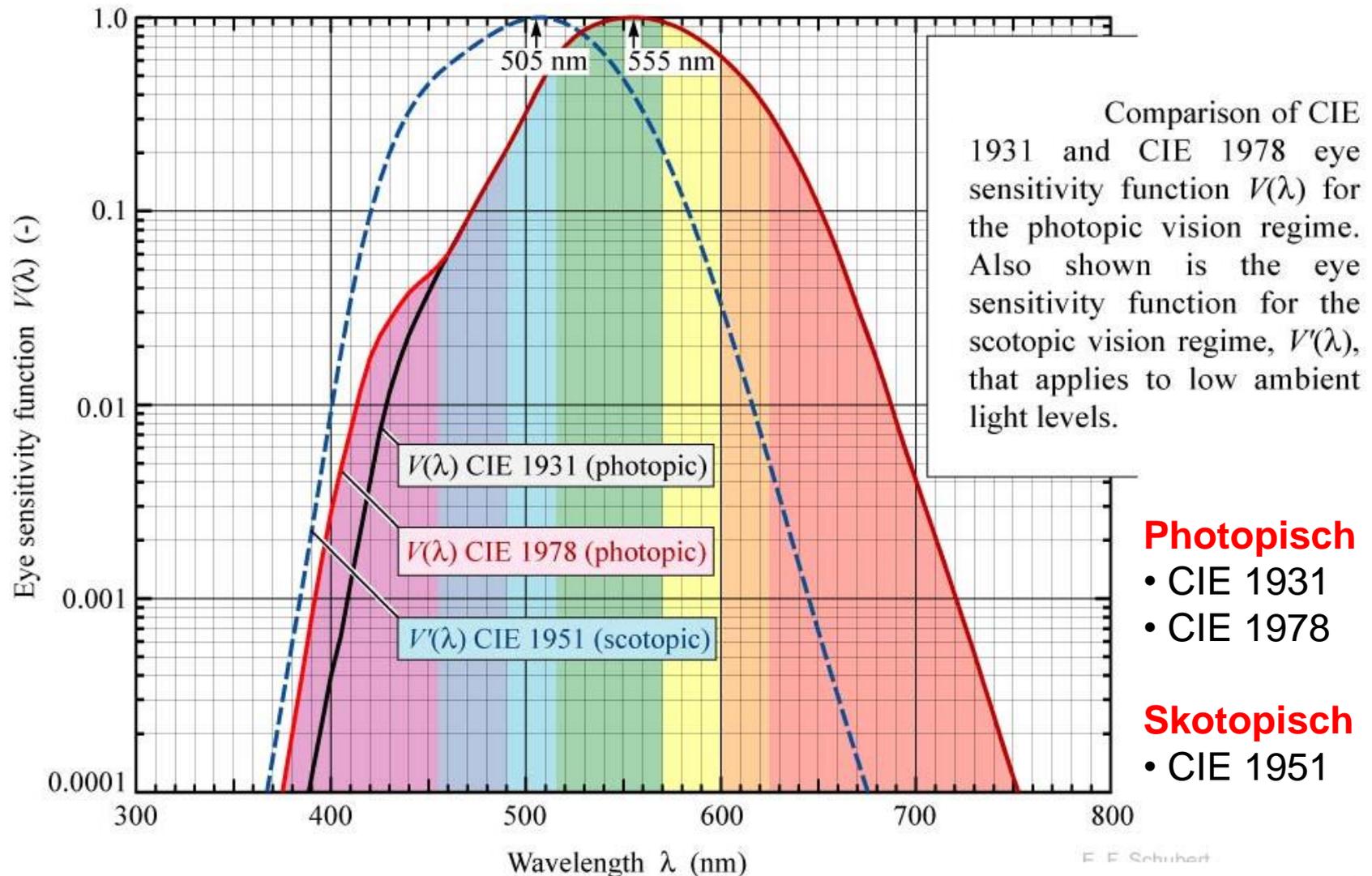
$V(\lambda)$  = spektrale Empfindlichkeit des Auges

$P(\lambda)d\lambda$  = optische Leistung im Bereich  $[\lambda, \lambda+d\lambda]$

**Luminous efficacy** (Unit: lm/W)  
(Konversionseffizienz von opt. Leistung in Lichtstrom)  $\frac{\Phi_{lum}}{P} = \left( 683 \frac{lm}{W} \int_{\lambda} V(\lambda) P(\lambda) d\lambda \right) / \left( \int_{\lambda} P(\lambda) d\lambda \right)$

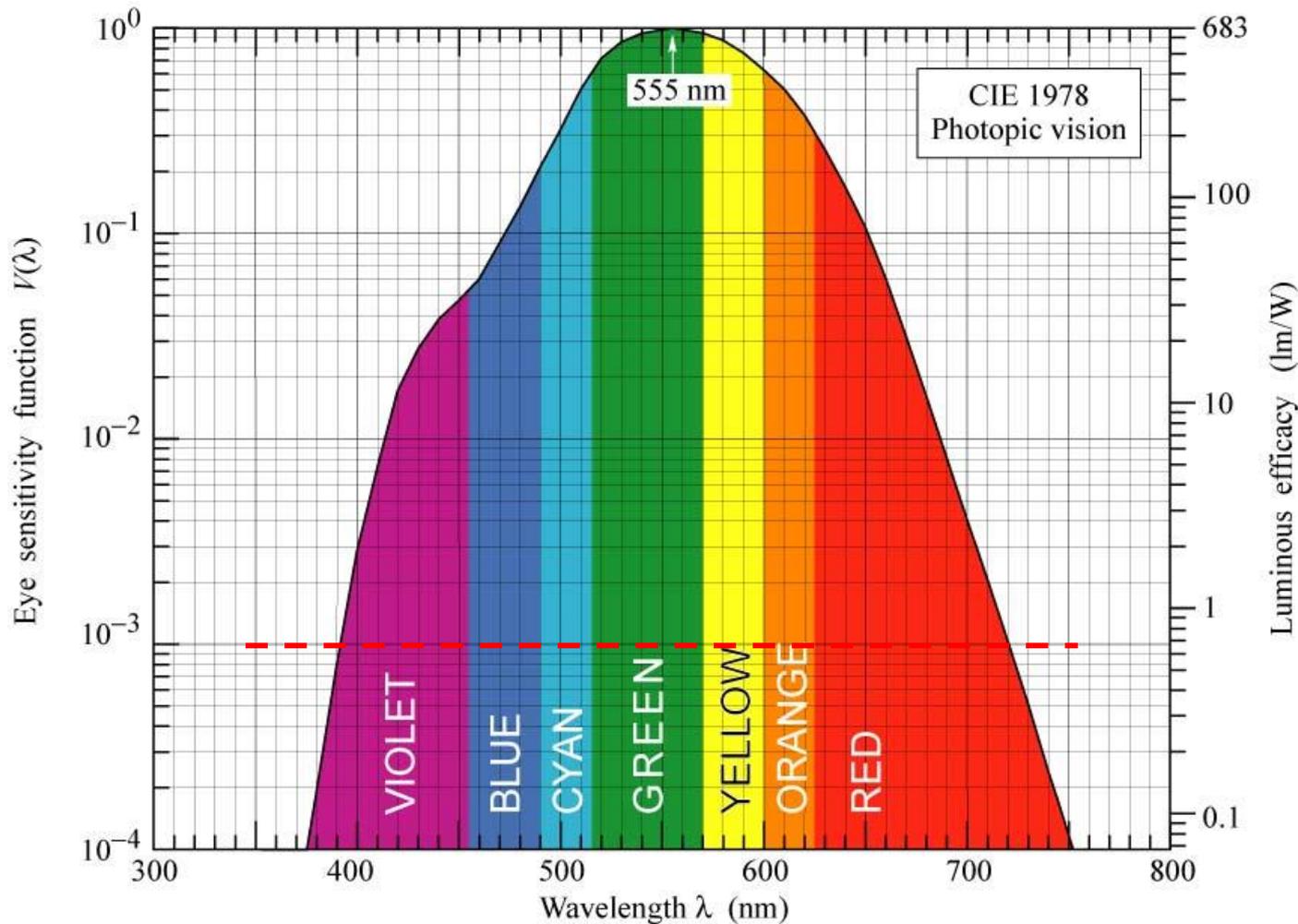
**Luminous efficiency** (Unit: lm/W)  
(Lichtausbeute - Lichtstrom aus elektr. Leistung)  $\eta = \Phi_{lum} / (IV)$

# Spektrale Empfindlichkeit des Auges



(CIE = Commission Internationale de l'Éclairage)

# Spektrale Empfindlichkeit des Auges (Tagsicht)



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).

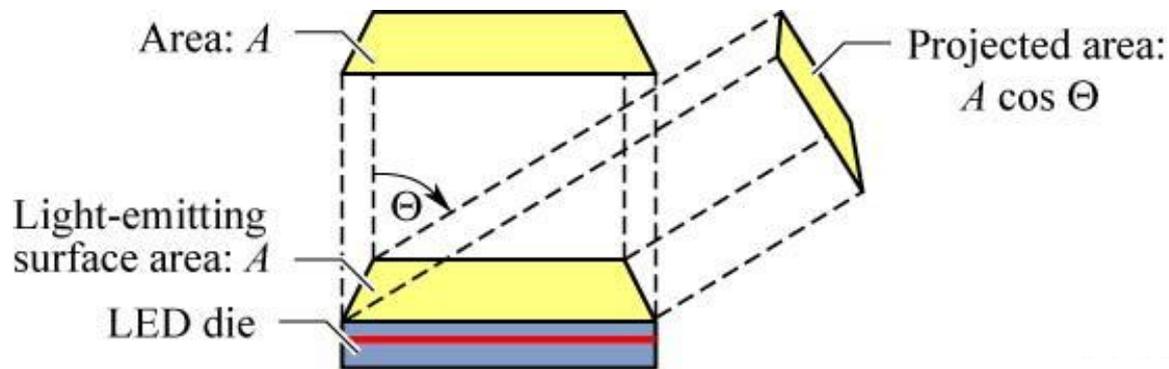
- Visible range: 390 – 720 nm
- **Definition of lumen:** Green light (555 nm) with power 1 W of has luminous flux 683 lm
- **Efficacy of radiation (luminous efficacy)** gives number of lumens per optical Watt
- Amongst LEDs with same output power, green LEDs are brightest

# Leuchtdichte einer Oberflächenquelle

## Leuchtdichte $L$

abgeleitete SI-Einheit: Candela pro Quadratmeter; abgekürzt:  $\text{cd}/\text{m}^2$

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



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

- Die Lichtstärke einer LED mit „Lambert’scher Abstrahlcharakteristik“ hängt ebenfalls vom Winkel  $\Theta$  entsprechend eines Cosinusetzes ab. Deshalb ist die Leuchtdichte (luminance) einer LED unabhängig vom Winkel.
- Für einen Flächenstrahler bei dem die Lichtstärke nicht von  $\Theta$  abhängt, würde die Leuchtdichte mit steigendem  $\Theta$  zunehmen!

# Beleuchtungsstärke

**Beleuchtungsstärke  $E$  (lux=lm/m<sup>2</sup>)**

SI-Einheit: Lux; abgekürzt: lx

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

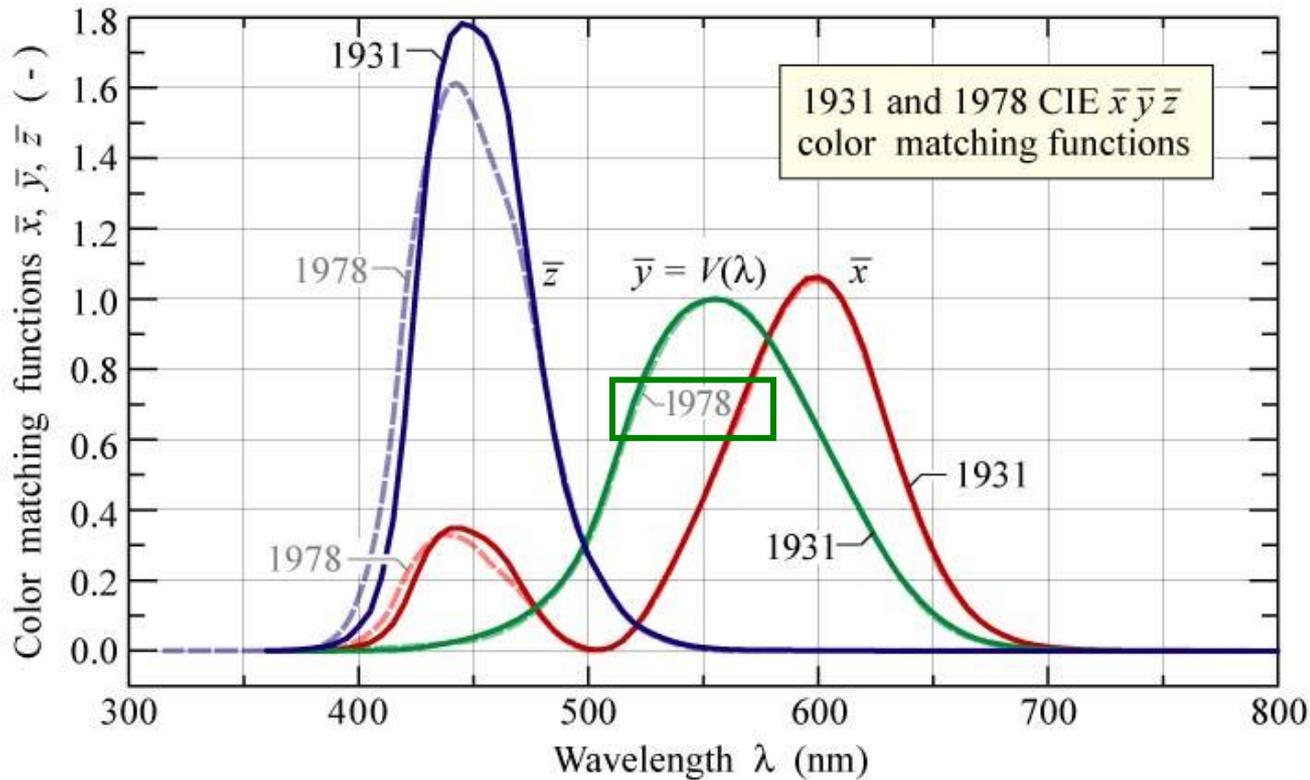
Beleuchtungsbedingung	Beleuchtungsstärke
Vollmond	1 lux
Straßenbeleuchtung	10 lux
Raumbeleuchtung	30 – 300 lux
Schreibtischbeleuchtung	100 – 1000 lux
Operationstisch	10000 lux
Direktes Sonnenlicht	100000 lux

Beachte:  $E$  betrachtet die „Lichtverhältnisse“ vom Empfänger aus. m<sup>2</sup> bezieht sich auf die Detektorfläche.

# „Farbe“ von Licht

- Die Farbe von Licht ist für die Wirkung auf unseren Körper von großer Bedeutung
- Für monochromatisches Licht hat man nur eine Wellenlänge.
- Viele Farben entstehen aber durch Überlagerung von Licht mit verschiedenen Wellenlängen
- Weißes Licht = Überlagerung vieler verschiedener Wellenlänge, so dass ein Farbeindruck ähnlich dem des Sonnenlichtes entsteht
- Farbeindruck entsteht durch die unterschiedliche Anregung der Farbzäpfchen
- Wie kann man einen Farbeindruck einer Lichtquelle beschreiben/quantifizieren?

# Farbanpassungsfunktionen



CIE (1931) and CIE (1978)  $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$  color matching functions (CMFs). The  $\bar{y}$  CMF is identical to the eye sensitivity function  $V(\lambda)$ . Note that the CIE 1931 CMF is the currently valid official standard.

- Farbanpassungsfunktionen  $\bar{x}$   $\bar{y}$   $\bar{z}$  sind ähnlich den spektralen Empfindlichkeiten der Zäpfchen
- Beachte: Es gibt jedoch verschiedene Standards für diese Farbanpassungsfunktionen

# Tristimuluswerte/Farbkoordinaten

Optische Leistung einer Lichtquelle:  $P = \int_{\lambda} P(\lambda) d\lambda$

Tristimulus Werte X, Y und Z:

$$X = \int_{\lambda} \bar{x}(\lambda) P(\lambda) d\lambda$$

$$Y = \int_{\lambda} \bar{y}(\lambda) P(\lambda) d\lambda$$

$$Z = \int_{\lambda} \bar{z}(\lambda) P(\lambda) d\lambda$$

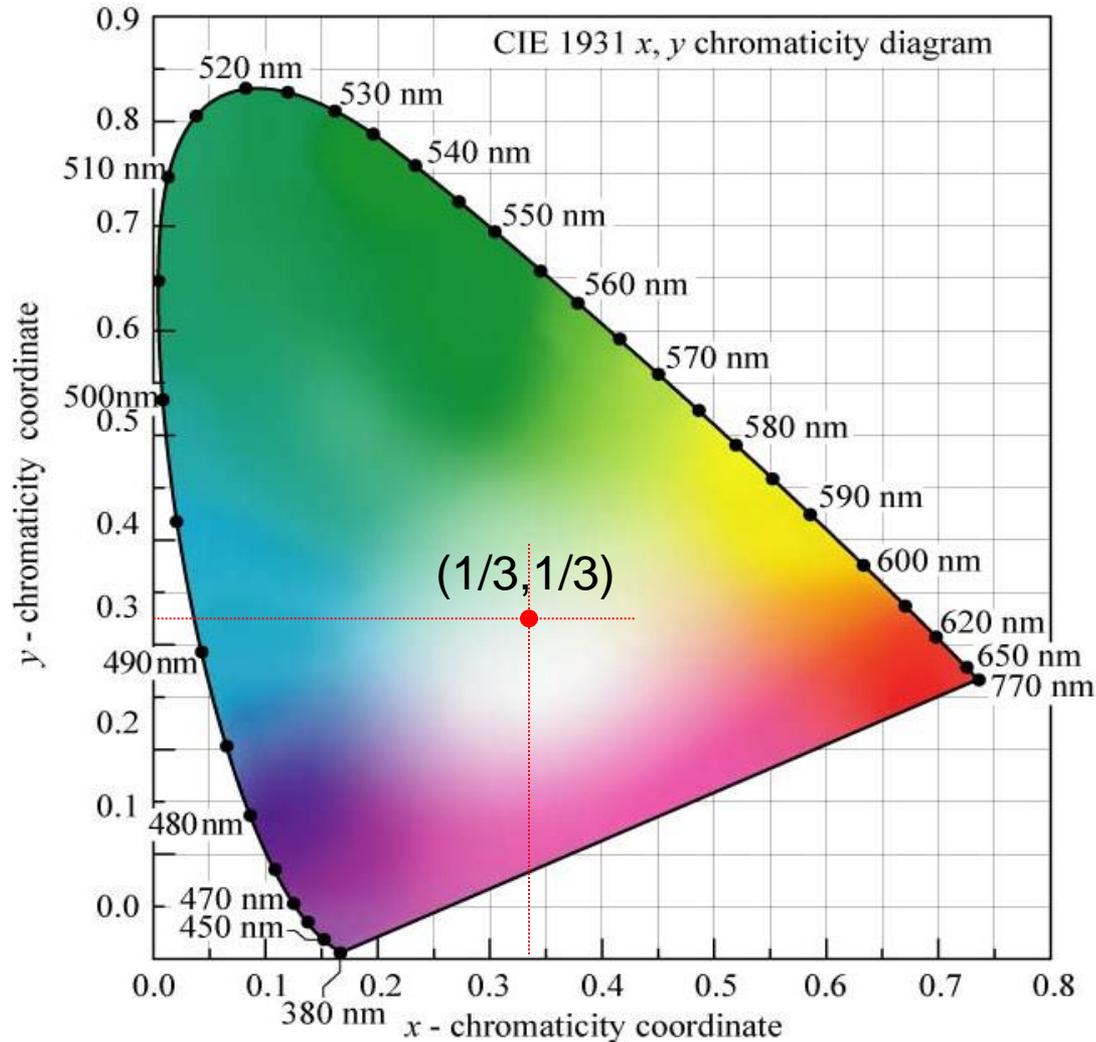
Farbanpassungsfunktion

Farbdiagramm (Chromaticity diagram) und Farbkoordinaten (chromaticity coordinates) x, y

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

Die z Farbkoordinate wird nicht benötigt, da  $x+y+z=1$

# Farbdiagramm

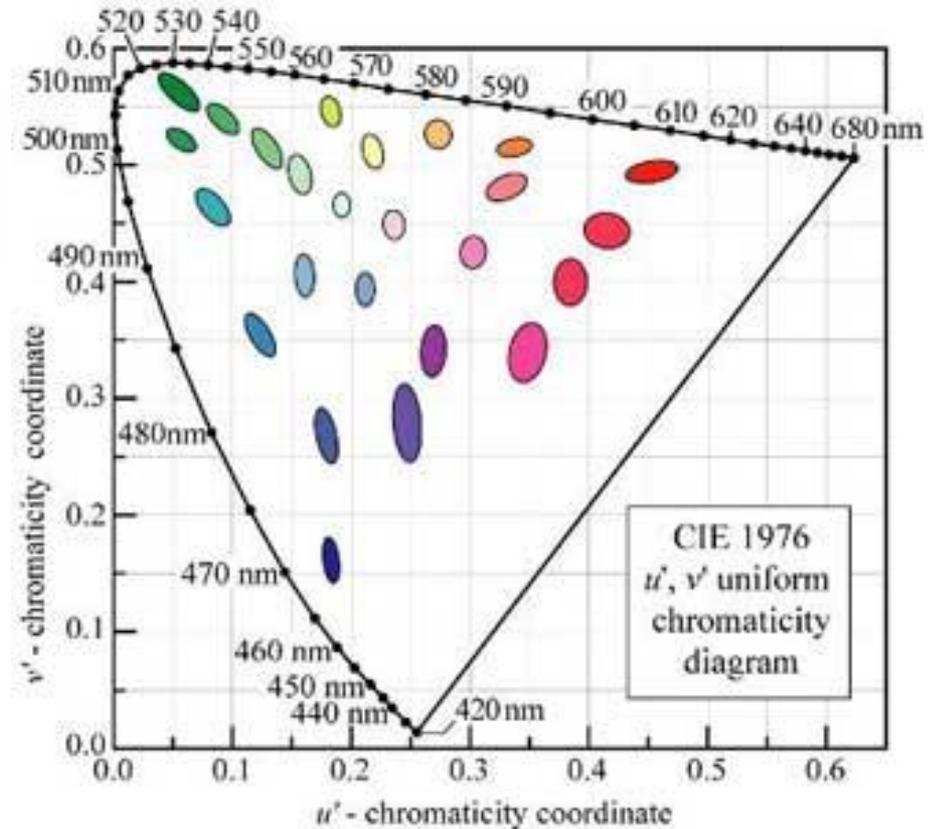
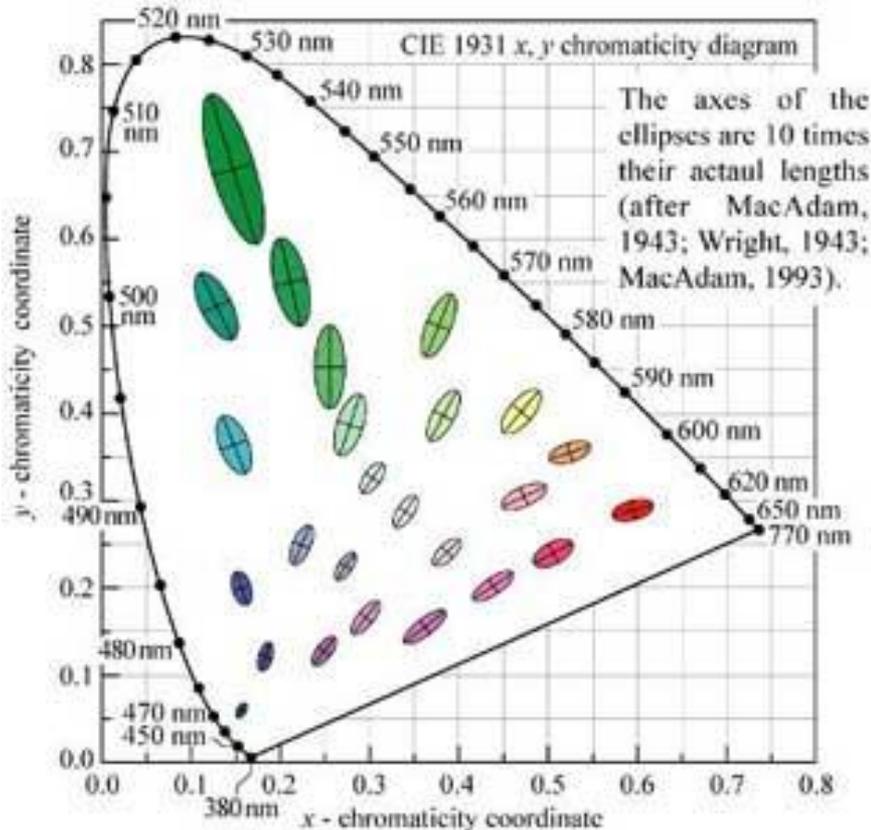


CIE 1931  
(x, y) chromaticity diagram. Monochromatic colors are located on the perimeter and white light is located in the center of the diagram.

Equal energy point:  
 $(x, y, z) = (1/3, 1/3, 1/3)$

# Farbunterschiede: MacAdam-Ellipsen

MacAdam analysierte die Farbdifferenz eng benachbarter Punkte im Farbdiagramm. Für einen wahrnehmbaren Farbunterschied muss eine minimale geometrische Distanz vorhanden sein. Farben innerhalb der elliptischen Bereiche erscheinen identisch.



- Innerhalb der MacAdam Ellipsen kann keine Farbdifferenz wahrgenommen werden
- Die gezeigten Ellipsenachsen sind 10 mal größer als in Realität
- Der Mensch kann ca. 50000 verschiedene Farben wahrnehmen

# Vereinheitlichte Farbkoordinaten

Im Farbdigramm ist es wünschenswert wenn die Farbunterschiede proportional zu geometrischen Distanzen sind. Dies motiviert die Einführung vereinheitlichter Farbkoordinatensysteme  $(u,v)$  bzw.  $(u',v')$ .

$$u = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \quad v = \frac{6Y}{X + 15Y + 3Z} \quad (\text{CIE, 1960})$$

und

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \quad v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} \quad (\text{CIE, 1976})$$

Mit den Koordinaten  $x$ ,  $y$ , und  $z$  gilt folgender Zusammenhang:

$$u = u' = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \quad v = \frac{6y}{-2x + 12y + 3} \quad v' = \frac{9y}{-2x + 12y + 3}$$

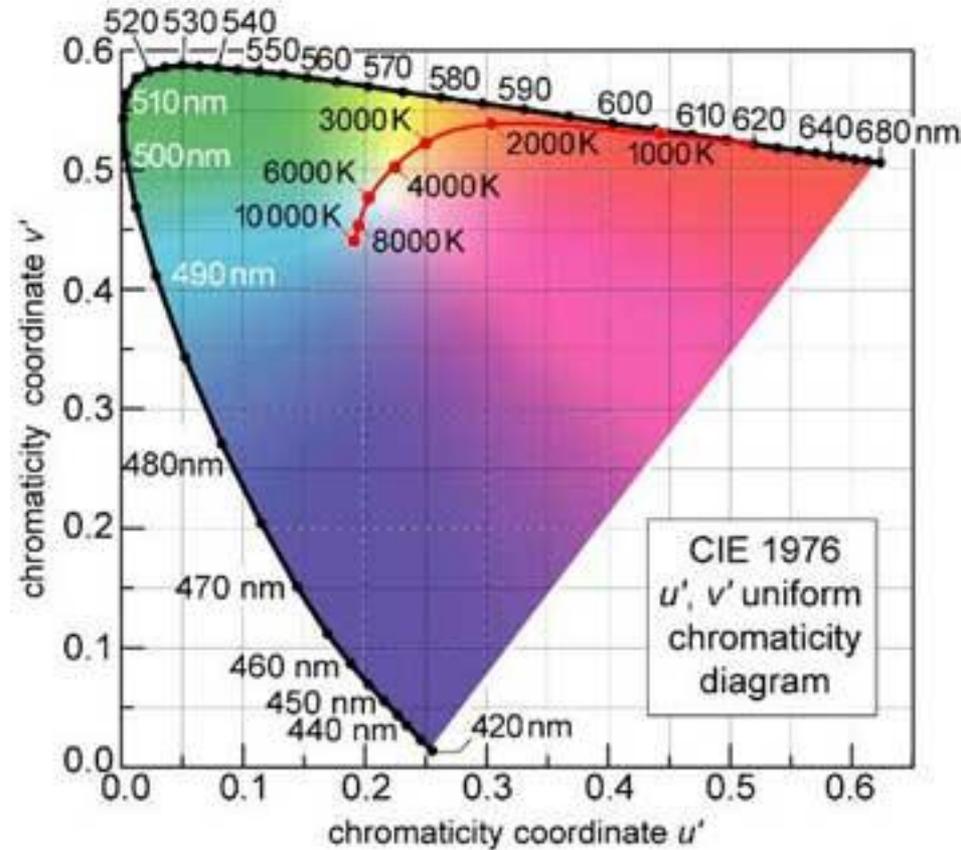
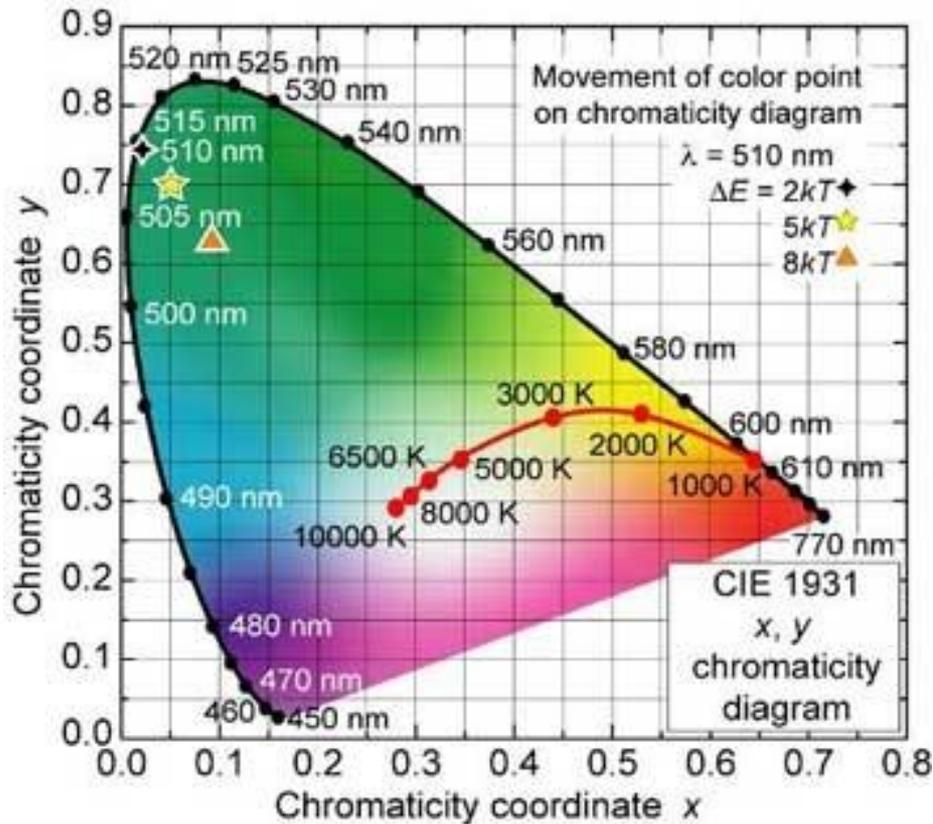
umgekehrt erhält man:

$$x = \frac{9u'}{6u' - 16v' + 12} \quad y = \frac{2v'}{3u' - 8v' + 6}$$

und

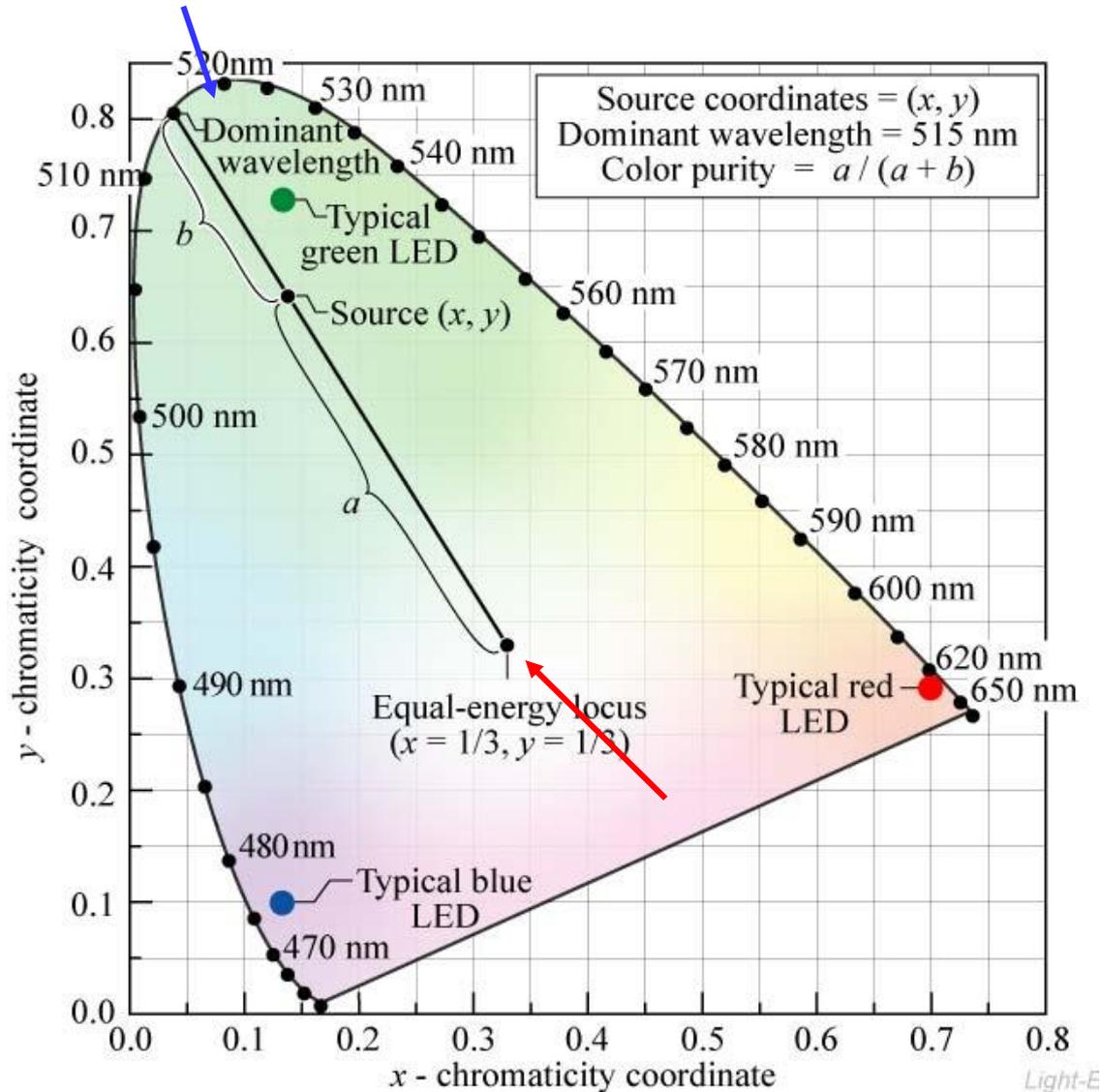
$$x = \frac{3u}{2u - 8v + 4} \quad y = \frac{2v}{2u - 8v + 4}$$

# Farbdiagramme



- Farbdiagramme erlauben uns die **Farbe zu quantifizieren**
- Farbtemperatur
- Planckscher Strahler

# Farbreinheit und Farbsättigung

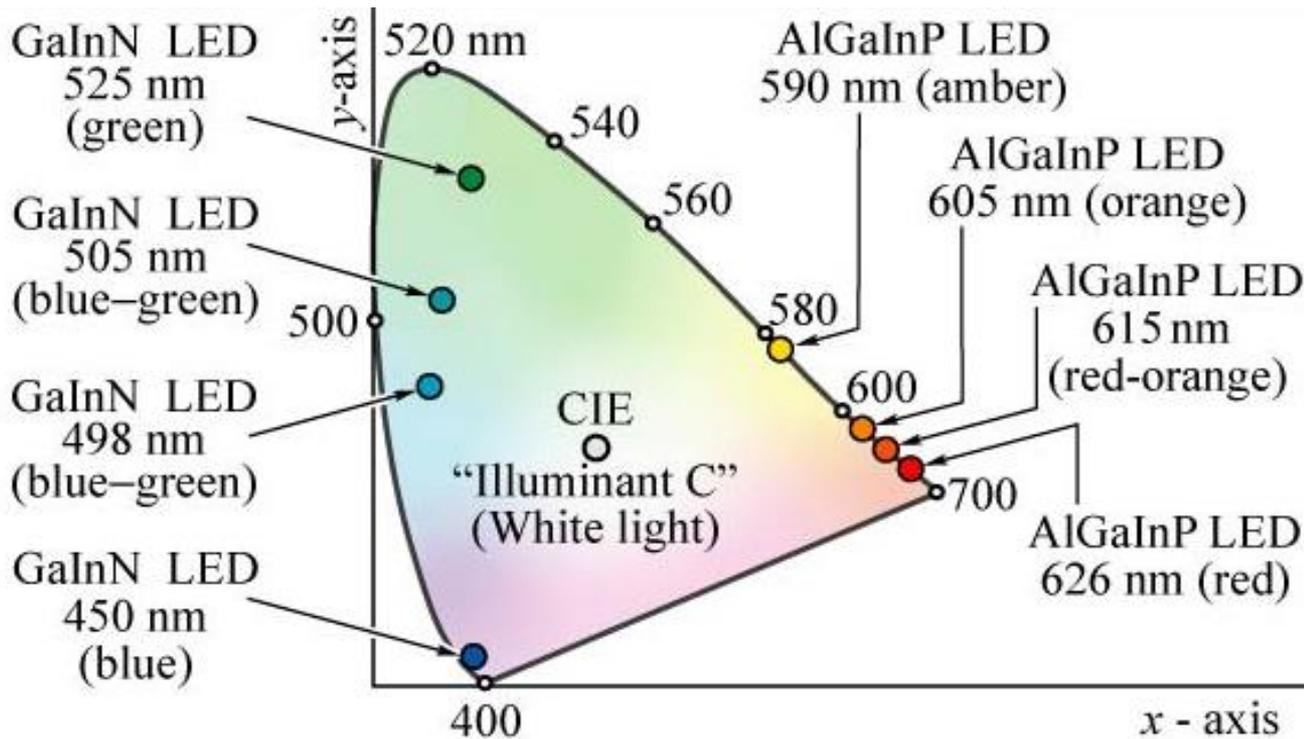


$$\begin{aligned}
 \text{Farbreinheit} &= \frac{a}{a+b} \\
 &= \frac{\sqrt{(x-x_{ee})^2 + (y-y_{ee})^2}}{\sqrt{(x_d-x_{ee})^2 + (y_d-y_{ee})^2}}
 \end{aligned}$$

equal energy locus

dominant wavelength

# LEDs im Farbdigramm



Location of LED light emission on the chromaticity diagram (adopted from Schubert and Miller, 1999).

## Bemerkung:

- rote und blaue LEDs liegen Nahe am Rand
- grüne LEDs sind nach innen verschoben
- Farbreinheit und Farbsättigung



# Farbräume und Farbraumssysteme

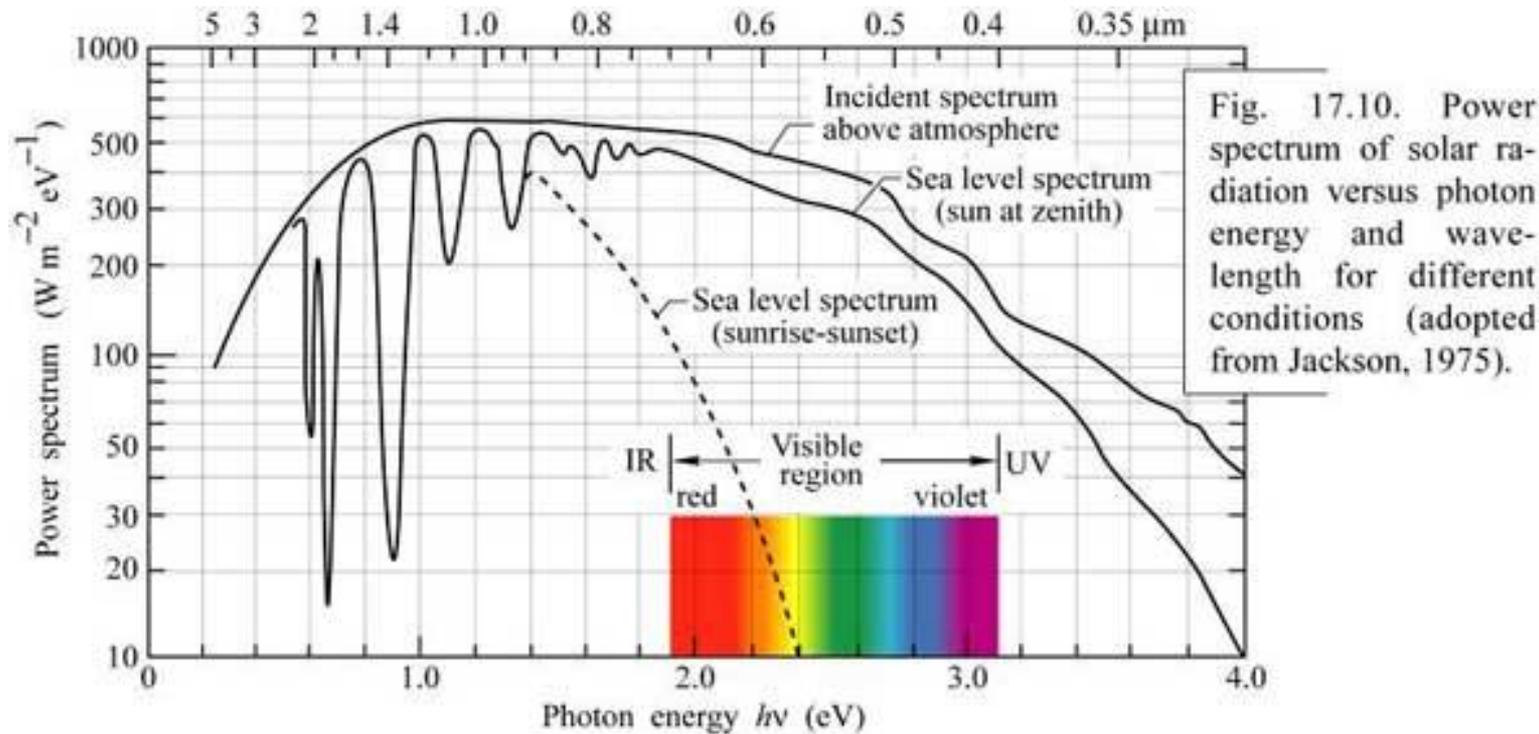
In vielen Anwendungsbereichen spielen spezialisierte Modelle und deren Räume eine Rolle:

- RGB-Farbraum – Computermonitore, Internetstandard
- CMYK-Farbraum – e, Druck-Endstufe
- HSV-Farbraum mit den Varianten HSL, HSB, HSI – Design, Dokumentation von Malerei, Videokunst
- Lab-Farbraum – CIE-Farbendreieck
- LCh-Farbraum bezeichnet keinen Farbraum, sondern die Darstellung von HSV oder LAB in Polarkoordinaten
- I1I2I3-Farbraum – rechentechnisch optimierter Raum der Bildverarbeitung
- YCbCr-Farbmodell (manchmal kurz YCC genannt, vgl. unten) – digitales Fernsehen, sowohl digitales PAL als auch digitales NTSC, DVB, JPEG, MPEG, DVD-Video, u. a.
- YPbPr-Farbmodell – analoges HDTV, analoges Komponenten-Videokabel
- YUV-Farbmodell – analoges PAL und NTSC
- YIQ-Farbmodell – veraltet, früher verwendet bei analogem NTSC
- YCC-Farbmodell – Kodak Photo CD

## Farbraumssysteme

- CIExyz-Farbraumssystem (Chromatizitätskoordinaten)
- CIEYxy-Farbraumssystem (Chromatizitätskoordinaten)
- CIEYuv-Farbraumssystem
- CIEYu'v'-Farbraumssystem
- CIELuv-Farbraumssystem
- CIELaB-Farbraumssystem

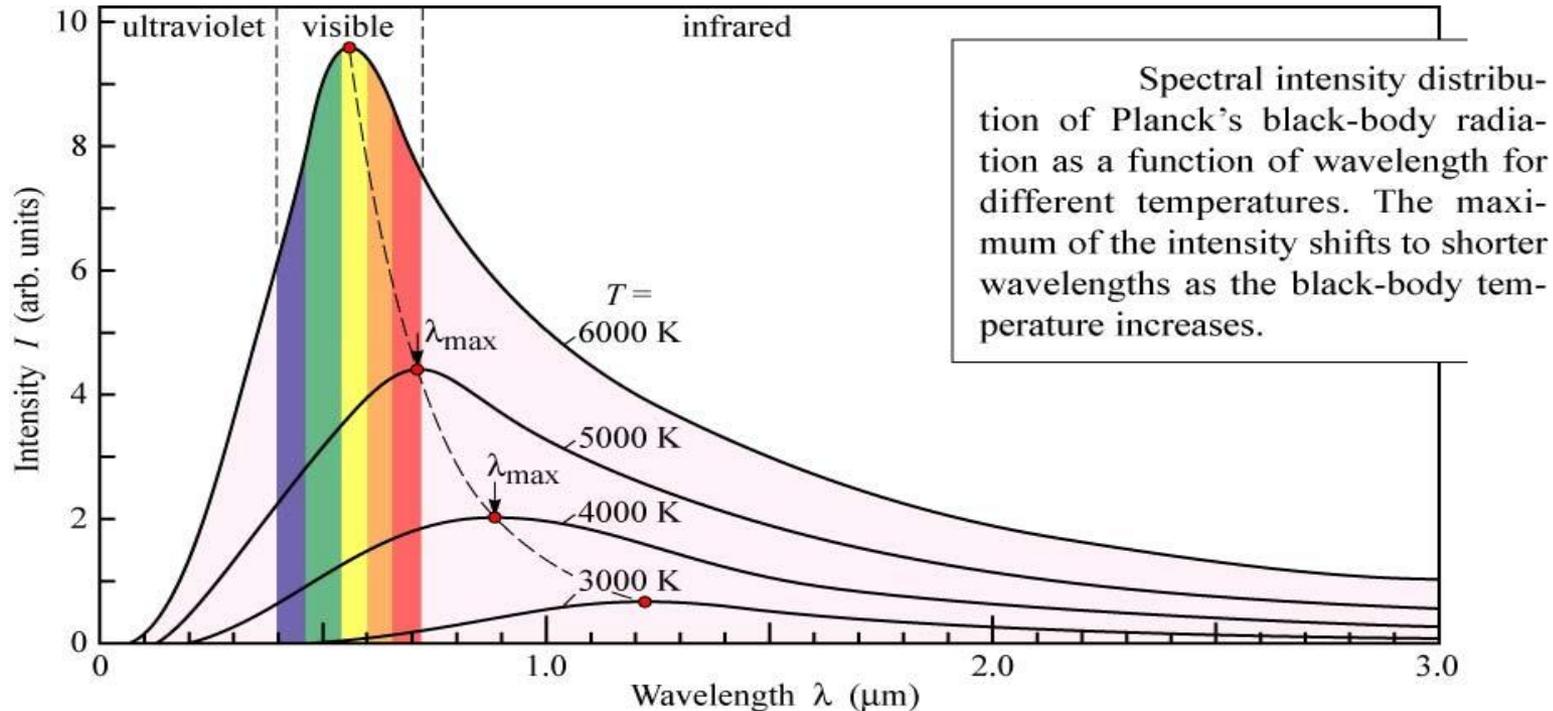
# Weißes Licht / Sonnenspektrum



- Bemerkung: Es gibt viele Wege weißes Licht herzustellen
- Sonnenlicht ist kein effizienter Weg um Weißlicht herzustellen, da es von der Tageszeit, Jahreszeit, Höhe, Wetter und anderen Faktoren abhängt.

# Plancksche Strahlung

Die Schwarzkörperstrahlung wird durch einen einzigen Parameter, nämlich die **Temperatur** charakterisiert.



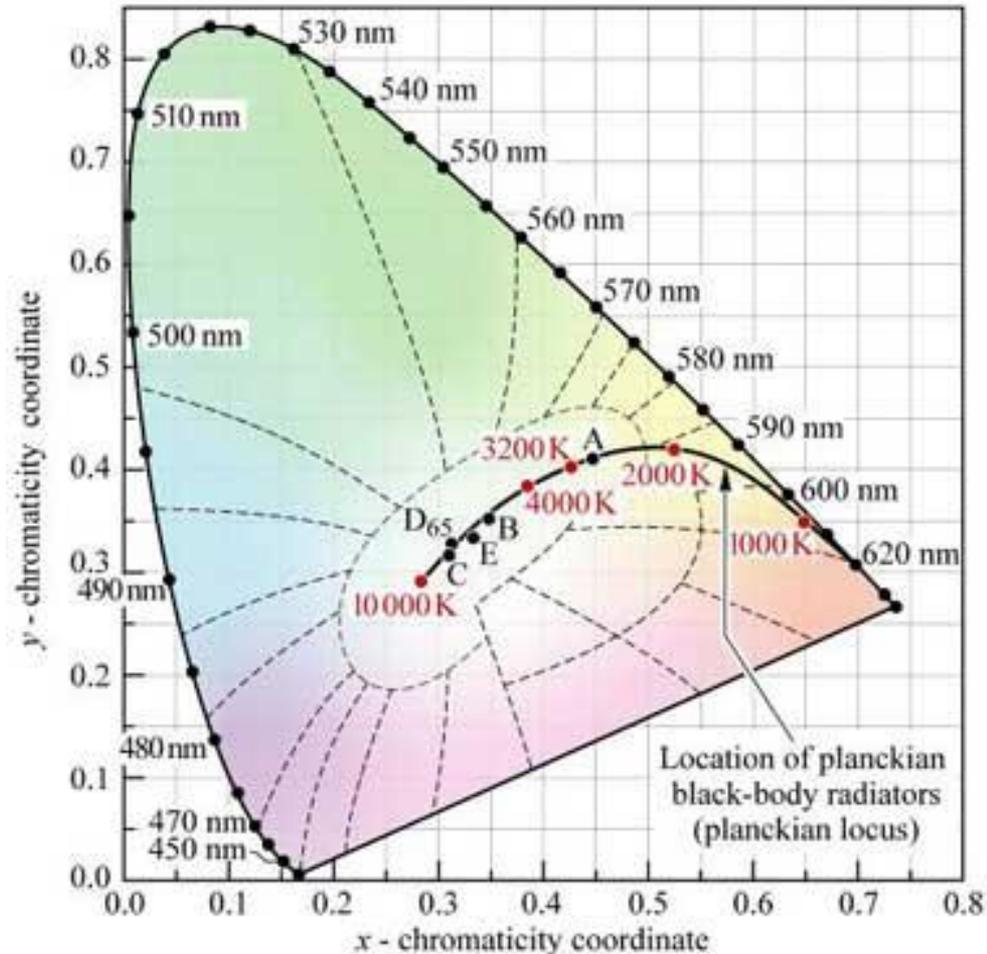
Plancksche Strahlung:

$$I(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]}$$

Wiensches Verschiebungsgesetz

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2880 \mu\text{mK}}{T}$$

# Farbtemperatur



Illuminant A  
 $(x, y) = (0.4476, 0.4074)$   
 (Incandescent source,  $T = 2856$  K)

Illuminant B  
 $(x, y) = (0.3484, 0.3516)$   
 (Direct sunlight,  $T = 4870$  K)

Illuminant C  
 $(x, y) = (0.3101, 0.3162)$   
 (Overcast source,  $T = 6770$  K)

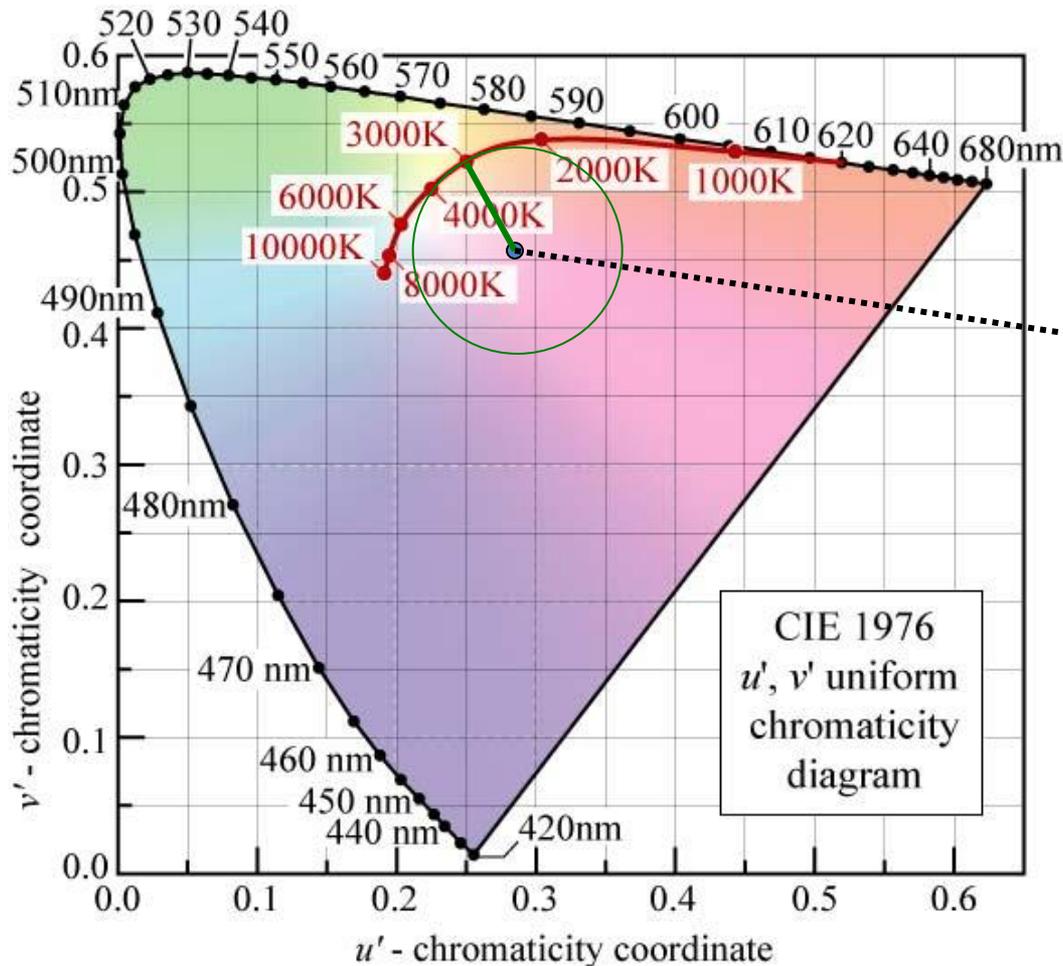
Illuminant D<sub>65</sub>  
 $(x, y) = (0.3128, 0.3292)$   
 (Daylight,  $T = 6500$  K)

Illuminant E (equal-energy point)  
 $(x, y) = (0.3333, 0.3333)$

Chromaticity  
 dia-gram showing planckian  
 locus, the standardized white  
 Illuminants A, B, C, D<sub>65</sub>,  
 and E, and their color tem-  
 perature (after CIE, 1978).

- Planck'sches Spektrum oder Schwarzkörperstrahlungsspektrum
- Mit zunehmender Temperatur glüht das Objekt zuerst rot, orange, gelb und dann weiß (kann zur Temperaturschätzung benutzt werden)

# Korrelierte Farbtemperatur



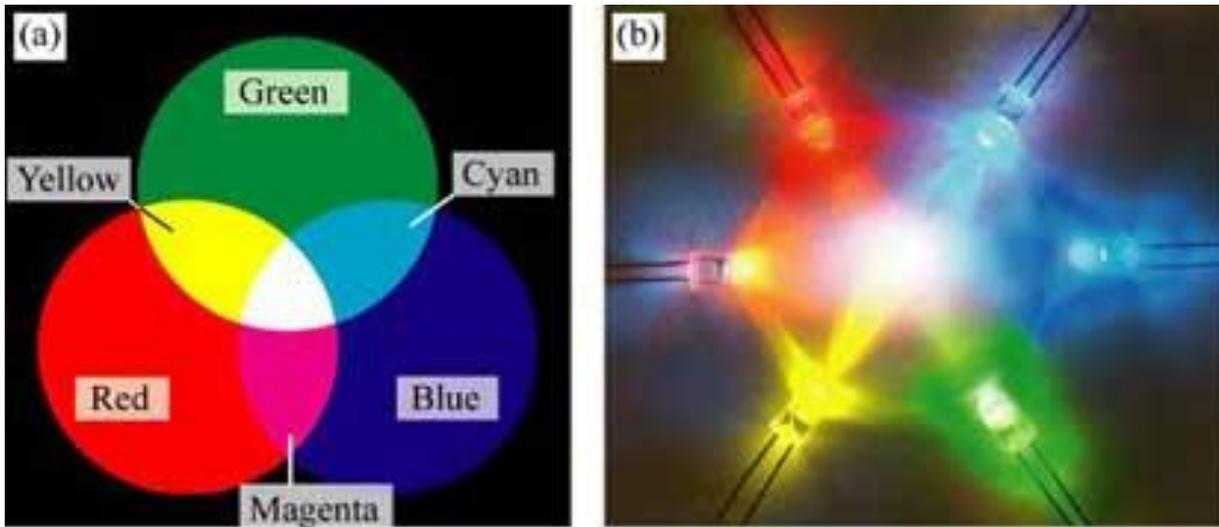
Die korrelierte Farbtemperatur dieser Lichtquelle ist 3000 K

Die einer Lichtquelle „korrelierte Farbtemperatur“ ist im vereinheitlichten ( $u', v'$ ) Farbdigramm, der Punkt der Planck'schen T-Kurve der der Lichtquelle am nächsten liegt (d.h. die kürzeste geometrische Distanz)

# Farbtemperatur: Beispiele

Lichtquelle	Farbtemperatur
Kerze	1.500 K
Glühlampe (40 W)	2.680 K
Glühlampe (100 W)	2.800 K
Glühlampe (200 W)	3.000 K
Halogenlampe, Leuchtstoffröhre (Warmweiß)	3.000 K
Fotolampe Typ B, Halogenglühlampe	3.200 K
Fotolampe Typ A bzw. S, Spätabendsonne kurz vor Dämmerungsbeginn	3.400 K
Leuchtstoffröhre (Kaltweiß)	4.000 K
Xenon-Lampe, Lichtbogen	4.500-5.000 K
Morgensonne-/Abendsonne, D50-Lampe (Druckerei)	5.000 K
Vormittags-/Nachmittagsonne	5.500 K
Elektronenblitzgerät	5.500-5.600 K
Mittagssonne, Bewölkung	5.500-5.800 K
Tageslichtlampe	5.600-7.000 K
Bedeckter Himmel	6.500-7.500 K
Nebel, starker Dunst	7.500-8.500 K
Blauer Himmel (z. B. im Schatten) bzw. kurz nach Sonnenuntergang und kurz vor Sonnenaufgang, <i>Blaue Stunde</i>	9.000-12.000 K
Klares blaues, nördliches Himmelslicht	15.000-27.000 K

# Additive Farbmischung



(a) Schematic of additive color mixing of three primary colors. (b) Additive color mixing using LEDs.

- RGB (rot, grün, blau) - Farbmischung
- Farbskala (Skalenbereich)
- Skalengröße (Fläche im Farbkoordinatendiagramm) nimmt mit der Anzahl der Lichtquellen zu

# Additive Farbmischung

Betrachten wir die Farbkoordinaten aus der Mischung von drei diskreten Emissionsbändern (z.B. LEDs) mit spektralen Leistungsdichten  $P_1(\lambda)$ ,  $P_2(\lambda)$  und  $P_3(\lambda)$  mit peak Wellenlängen von  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  und  $\lambda_3$ . Jedes dieser Emissionsbänder ist schmaler als die drei Farbanpassungsfunktionen und sie haben die drei Farbkoordinaten  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ ,  $(x_3, y_3)$ . Dann ergibt sich der Tristimulus Wert zu

$$X = \int_{\lambda} \bar{x}(\lambda)P_1(\lambda)d\lambda + \int_{\lambda} \bar{x}(\lambda)P_2(\lambda)d\lambda + \int_{\lambda} \bar{x}(\lambda)P_3(\lambda)d\lambda \approx \bar{x}(\lambda_1)P_1 + \bar{x}(\lambda_2)P_2 + \bar{x}(\lambda_3)P_3$$

$$Y = \int_{\lambda} \bar{y}(\lambda)P_1(\lambda)d\lambda + \int_{\lambda} \bar{y}(\lambda)P_2(\lambda)d\lambda + \int_{\lambda} \bar{y}(\lambda)P_3(\lambda)d\lambda \approx \bar{y}(\lambda_1)P_1 + \bar{y}(\lambda_2)P_2 + \bar{y}(\lambda_3)P_3$$

$$Z = \int_{\lambda} \bar{z}(\lambda)P_1(\lambda)d\lambda + \int_{\lambda} \bar{z}(\lambda)P_2(\lambda)d\lambda + \int_{\lambda} \bar{z}(\lambda)P_3(\lambda)d\lambda \approx \bar{z}(\lambda_1)P_1 + \bar{z}(\lambda_2)P_2 + \bar{z}(\lambda_3)P_3$$

wobei  $P_1$ ,  $P_2$ , und  $P_3$  die optischen Leistungen der drei Lichtquellen ist.

# Additive Farbmischung

Mit den Abkürzungen

$$L_1 = \bar{x}(\lambda_1)P_1 + \bar{y}(\lambda_1)P_1 + \bar{z}(\lambda_1)P_1$$

$$L_2 = \bar{x}(\lambda_2)P_2 + \bar{y}(\lambda_2)P_2 + \bar{z}(\lambda_2)P_2$$

$$L_3 = \bar{x}(\lambda_3)P_3 + \bar{y}(\lambda_3)P_3 + \bar{z}(\lambda_3)P_3$$

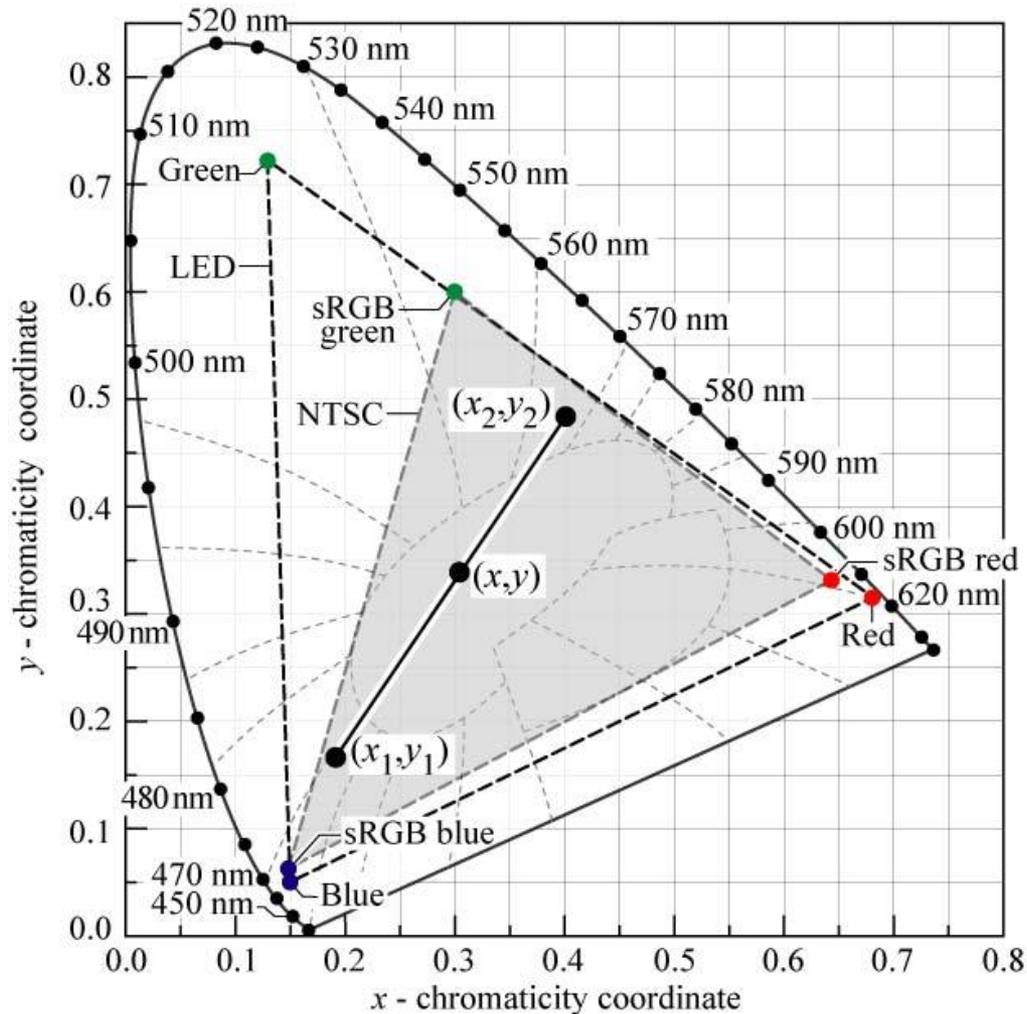
kann die Farbkoordinate (FK) des gemischten Lichtes durch die Farbkoordinaten der Einzelquellen berechnet werden zu

$$x = \frac{x_1L_1 + x_2L_2 + x_3L_3}{L_1 + L_2 + L_3}$$

$$y = \frac{y_1L_1 + y_2L_2 + y_3L_3}{L_1 + L_2 + L_3}$$

Die FK des multi-komponenten Lichtes ist eine lineare Kombination der individuellen FK gewichtet mit den  $L_i$ -Faktoren

# Farbmischung



Principle of color mixing illustrated with two light sources with chromaticity coordinates  $(x_1, y_1)$  and  $(x_2, y_2)$ . The resulting color has the coordinates  $(x, y)$ . Also shown is the triangular area of the chromaticity diagram (color gamut) accessible by additive mixing of a red, green, and blue LED. The locations of the red, green, and blue phosphors of the sRGB display standard ( $x_r = 0.64$ ,  $y_r = 0.33$ ,  $x_g = 0.30$ ,  $y_g = 0.60$ ,  $x_b = 0.15$ ,  $y_b = 0.06$ ) are also shown. The sRGB standard is similar to the NTSC standard.

- Farbbereich
- Farbbereiche für rot-grün-blau Lichtquellen haben dreieckige Form
- Fläche ist der nutzbare Bereich für Bildschirme, Farbdrucker, ...

# Farbwiedergabe (color rendering)

Eine weiteres wichtiges Charakteristika einer weißen Lichtquelle ist die Fähigkeit die richtigen (naturgetreuen) Farben eines physikalischen Objekts, wie z.B. Früchte, Pflanzen, Spielzeuge, ..., bei Beleuchtung wiederzugeben (Kleiderfarbe beim Einkauf in Kaufhäusern). Diese Fähigkeit wird durch die sogenannten Farbwiedergabestufe (color rendering index) Ra oder CRI gemessen.

Bild „französische Impressionen“ von Auguste Renoir beleuchtet von unterschiedlichen Lichtquellen

High CRI



Low CRI



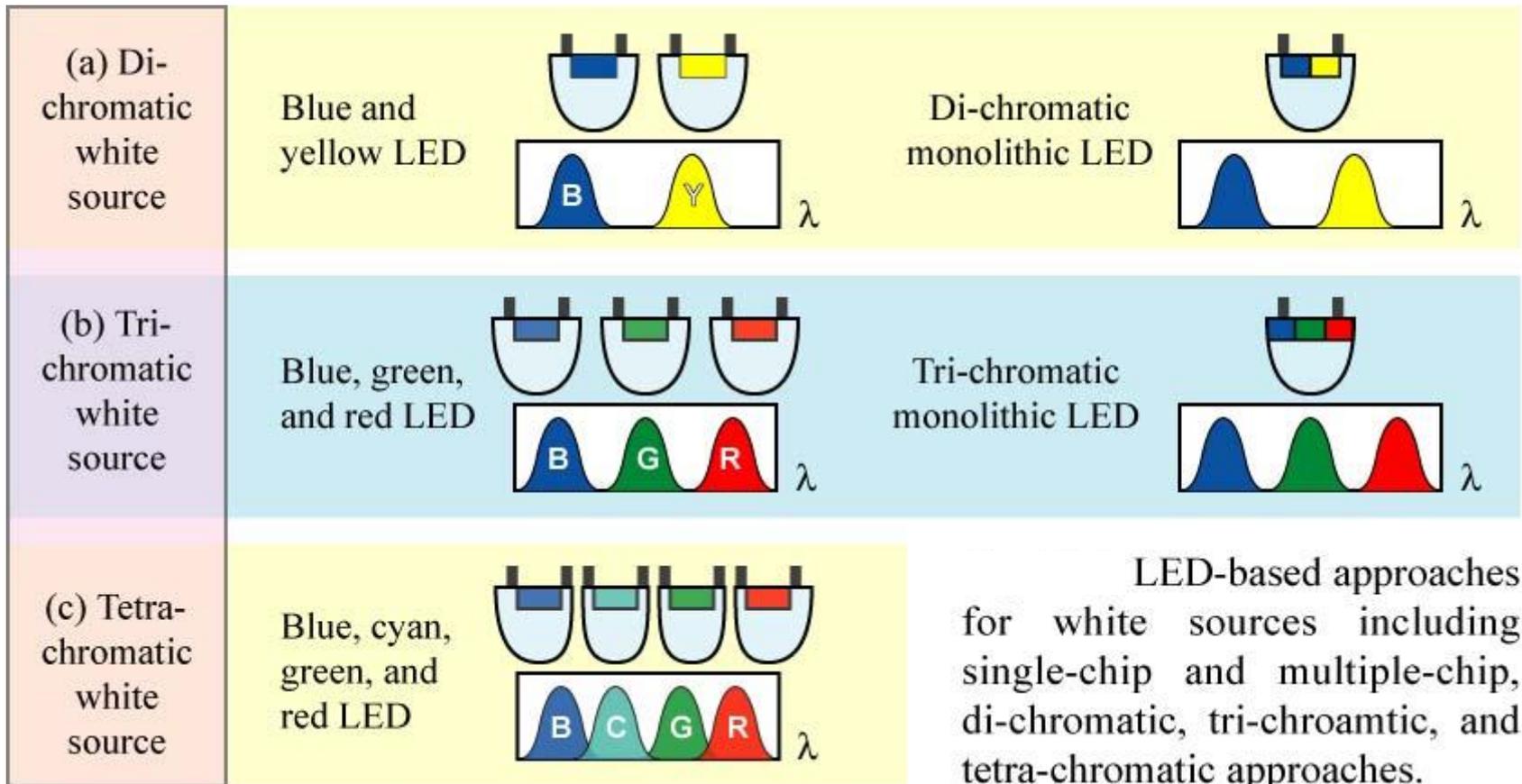
# Farbwiedergabe (color rendering)

- Unter **Farbwiedergabeindex** versteht man eine photometrische Größe, mit welcher sich die Qualität der Farbwiedergabe von **Lichtquellen** gleicher **korrelierter Farbtemperatur** beschreiben lässt. Die abgekürzte Schreibweise für den Farbwiedergabeindex ist "**Ra**".
- Als **Referenz** zur Beurteilung der Wiedergabequalität dient das Licht, das von einem **schwarzen Strahler der entsprechenden Farbtemperatur** abgegeben wird.
- Der Farbwiedergabeindex ist nicht von einer bestimmten Farbtemperatur abhängig. Jede Lichtquelle, die das Spektrum eines schwarzen Strahlers gleicher (korrelierter) Farbtemperatur im Bereich der sichtbaren Wellenlängen perfekt nachbildet, erreicht einen Farbwiedergabeindex von 100. Spektralanteile außerhalb des sichtbaren Bereiches spielen keine Rolle bei der Ermittlung des Farbwiedergabeindex.
- Eine Glühlampe mit farblosem Glaskolben besitzt mit einem *Ra* von 100 ausgezeichnete Farbwiedergabeeigenschaften, während etwa preiswerte Leuchtstofflampen einen Wert von 70 bis 80 erreichen.
- **Eine Lichtquelle, deren Licht sich nur aus einer Wellenlänge zusammensetzt, was etwa bei Natriumdampf-Niederdrucklampen der Fall ist, erlauben überhaupt keine Unterscheidbarkeit von Farben und weisen demzufolge einen sehr niedrigen *Ra*-Wert auf.**

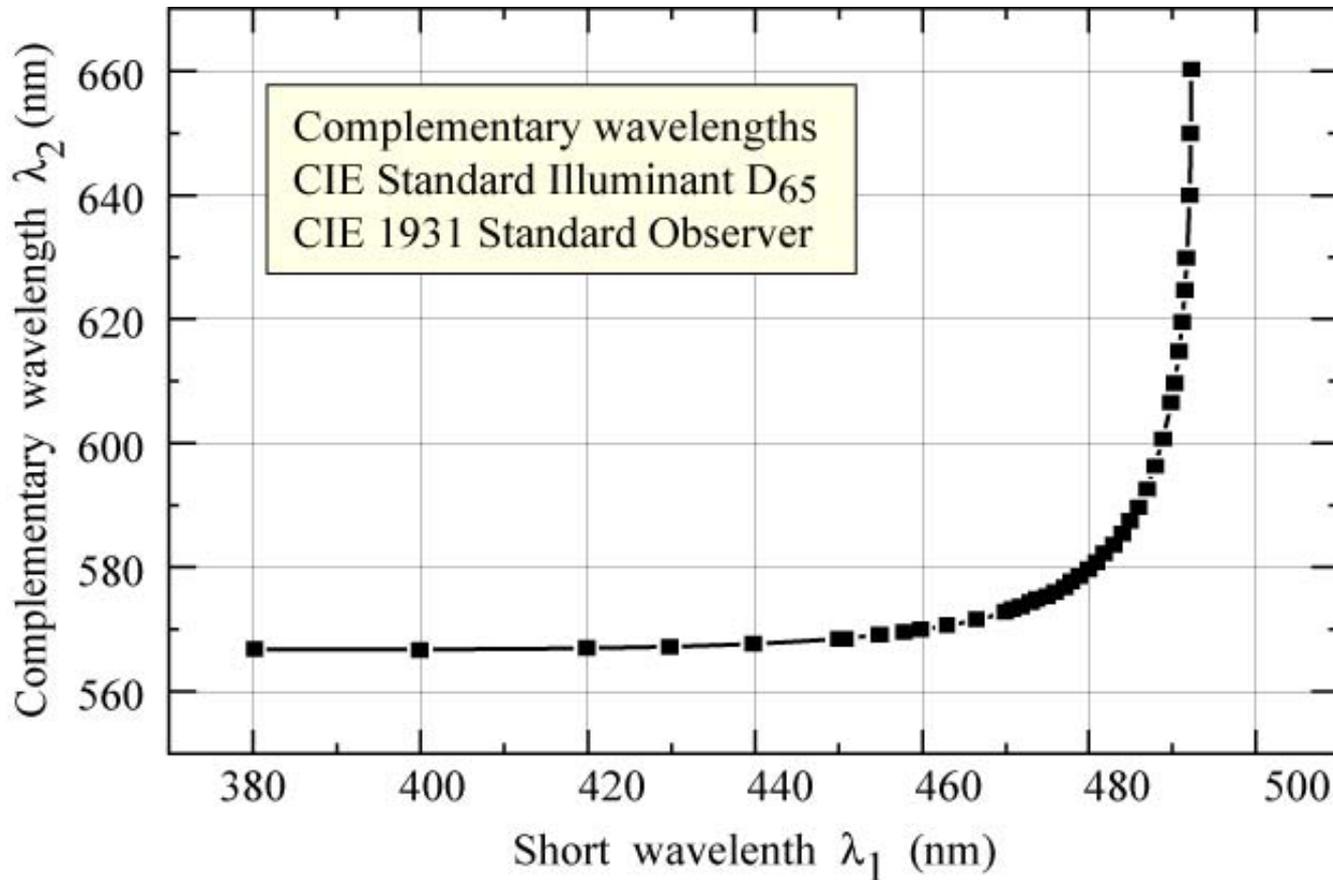
# „Weiße“ LED

Es gibt verschiedene Ansätze weißes Licht mittels LEDs zu erzeugen.

- Erzeugung von Licht im Blauen oder UV-Bereich und Umwandlung mittels „Phosphors“
- Einsatz verschiedenfarbiger LEDs und additive Farbmischung



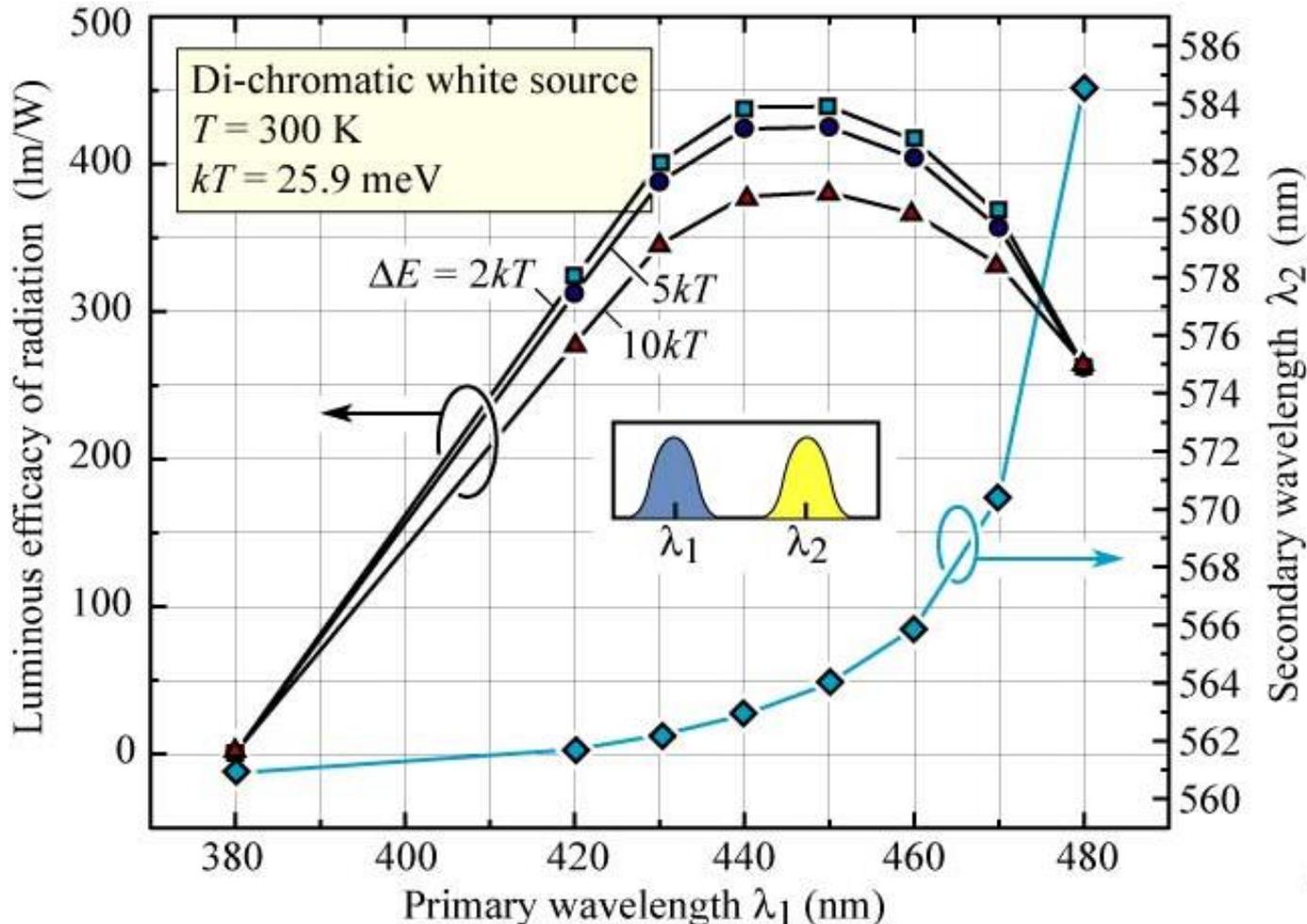
# „Weiße“ LED: Komplementärwellenlängen



- Bei dichromatischen LEDs muss man Komplementärwellenlängen wählen, um „weißes“ Licht zu erhalten.
- Bestimmtes Verhältnis der beiden Intensitäten.

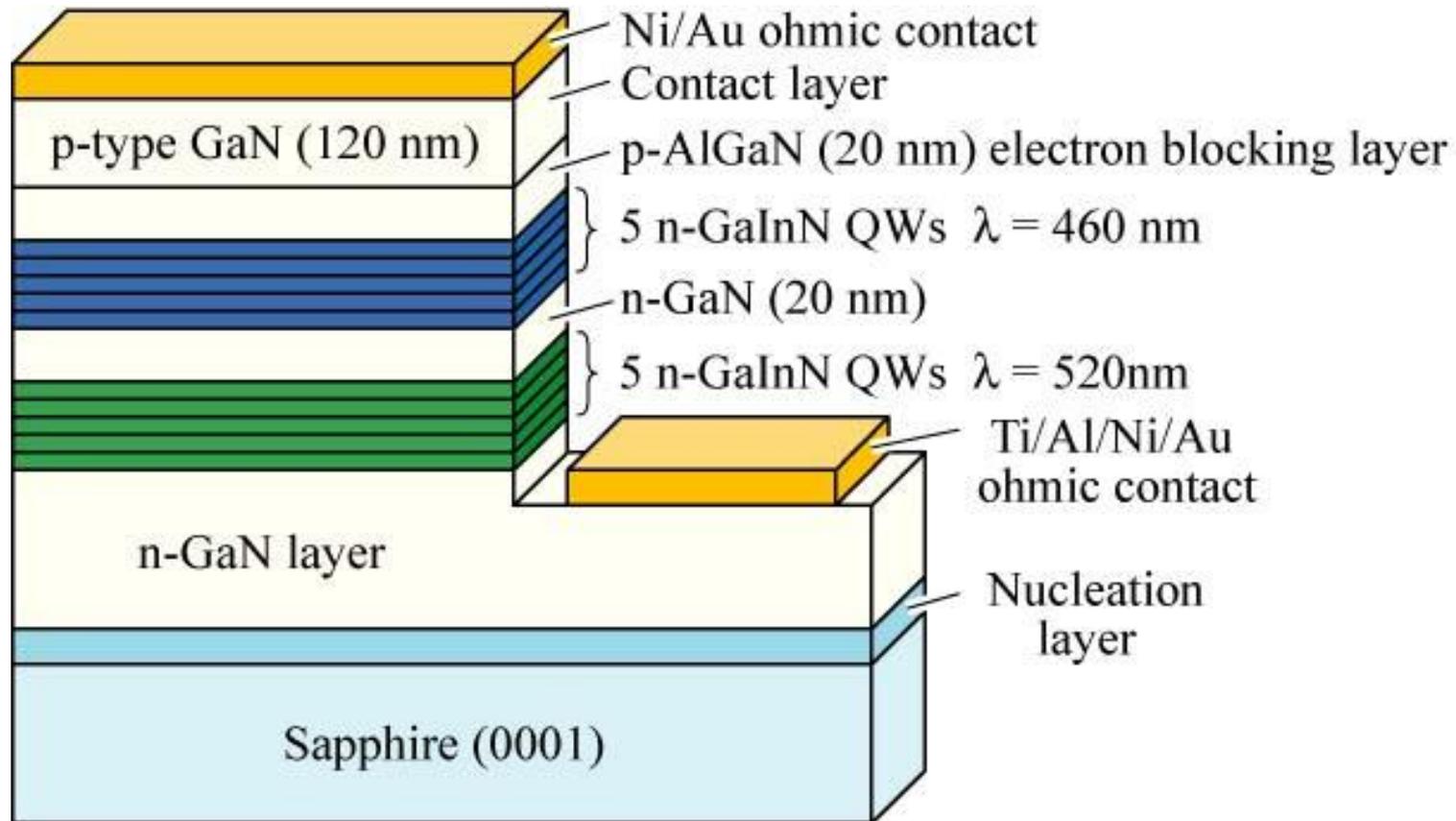
Monochromatic complementary wavelengths resulting in the perception of white light at a certain power ratio (after Wyszecki and Stiles, 1982).

# „Weiße“ LED: Lichtausbeute



Calculated luminous efficacy of dichromatic white light source (with chromaticity point at D<sub>65</sub> standard illuminant) for different linewidths  $\Delta E$  as a function of the primary wavelength. Also shown is the complementary secondary wavelength (after Li *et al.*, 2003).

# Dichromatische monolithische GaN LED



Structure of a monolithic dichromatic LED with two active regions (after Li *et al.*, 2003).

# Dichromatische monolithische GaN LED

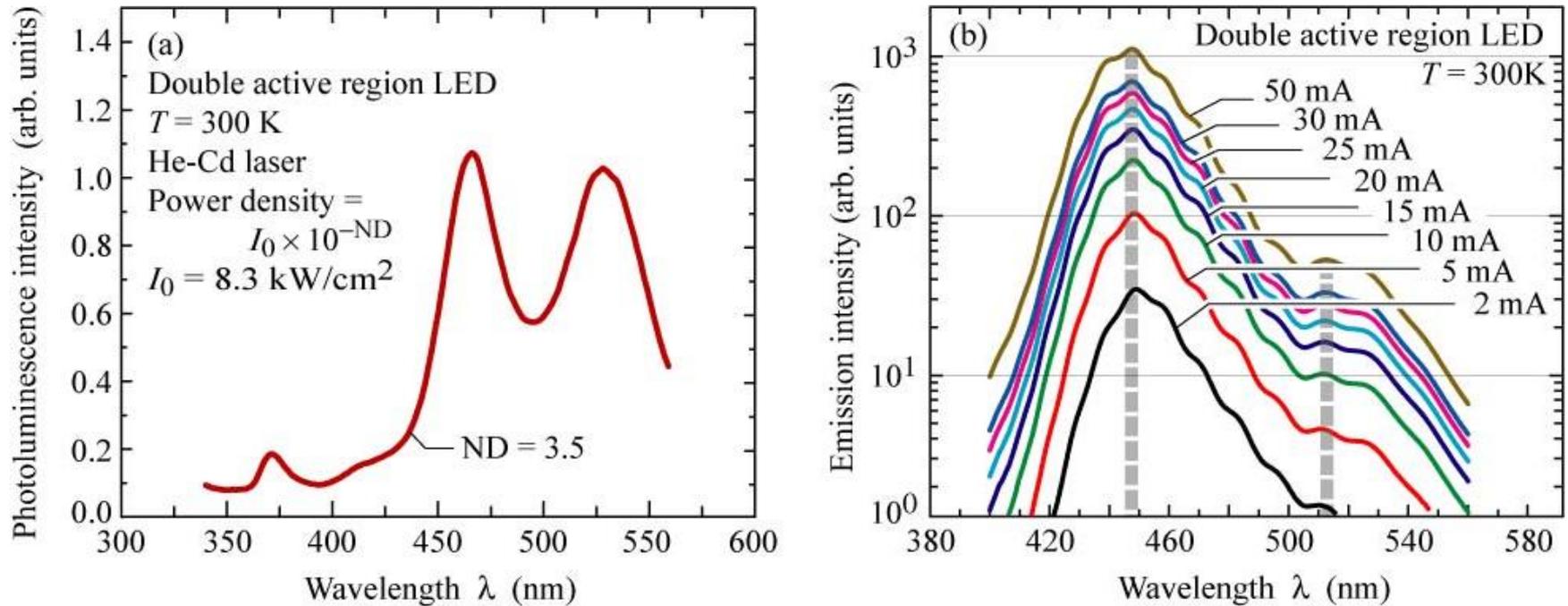


Fig. 20.5. Room temperature (a) photoluminescence and (b) electroluminescence spectra of monolithic dichromatic LED with two active regions (after Li *et al.*, 2003).

# 3-Farben weiße Multi-LED Quelle mit Farbtemperatur von 6500 K

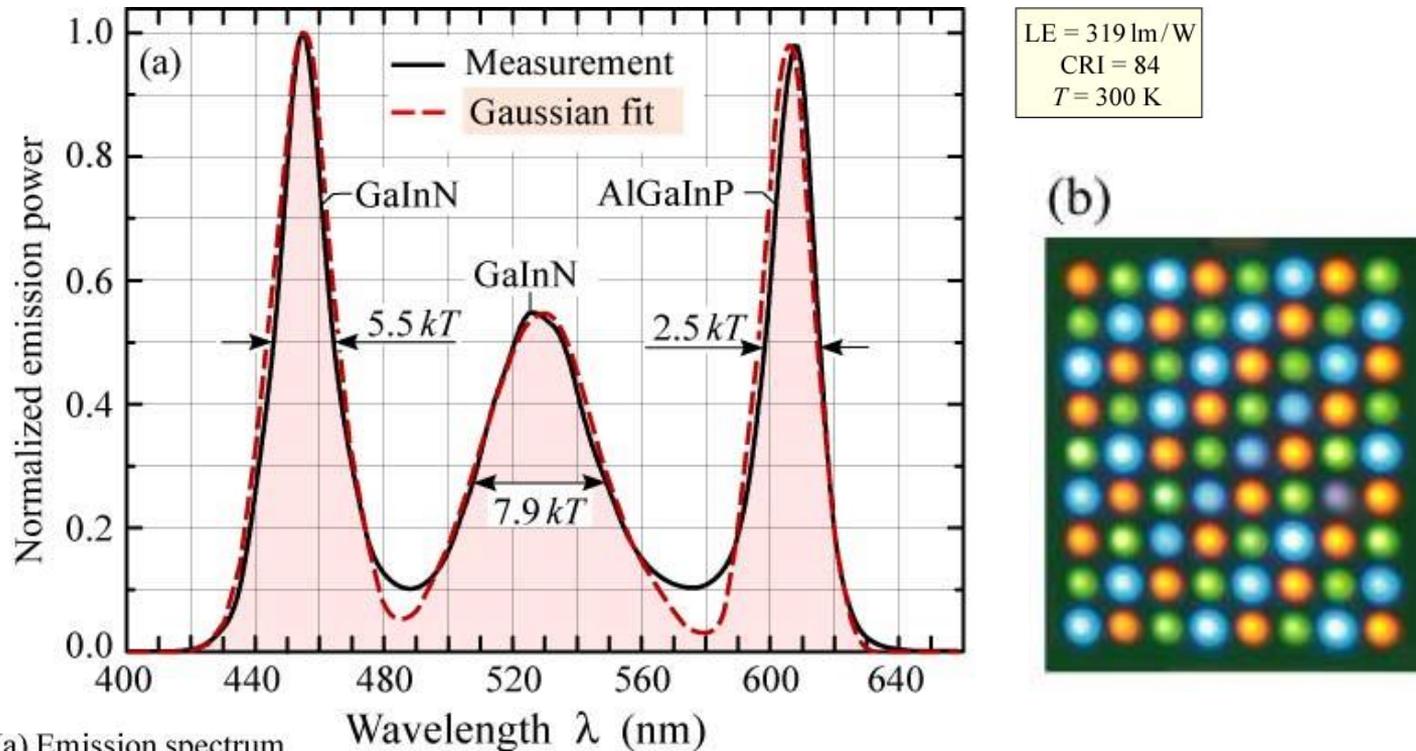
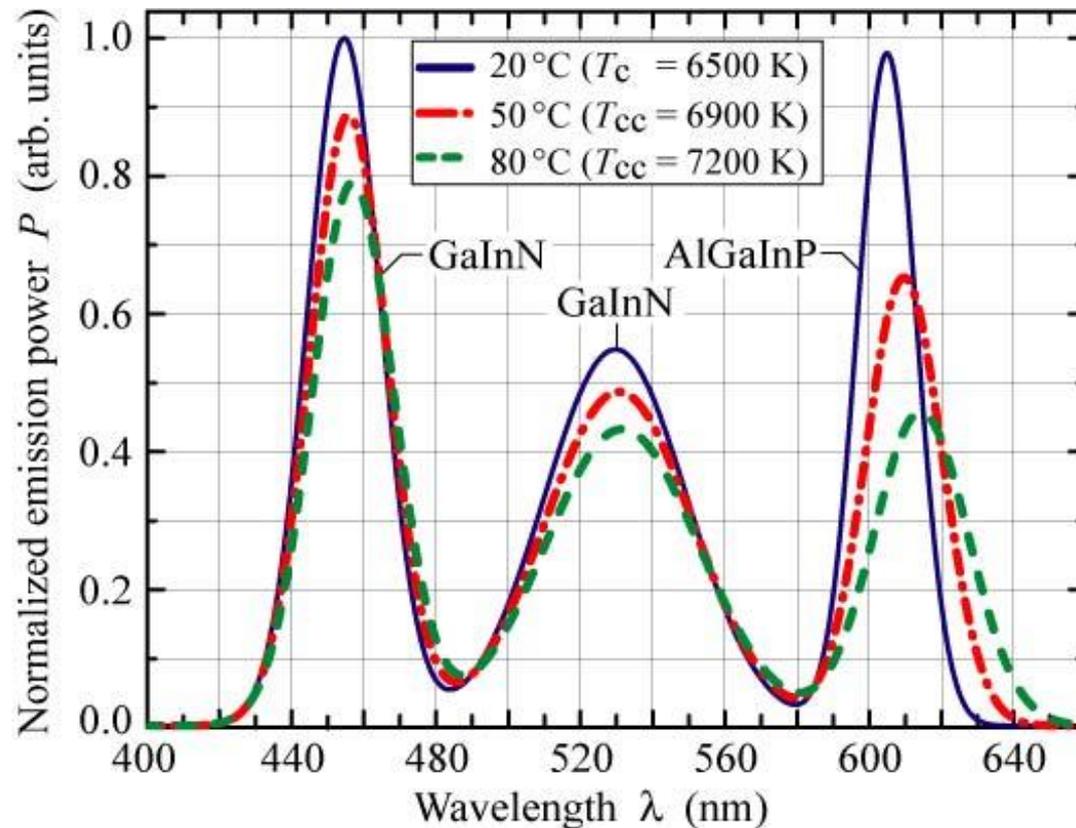


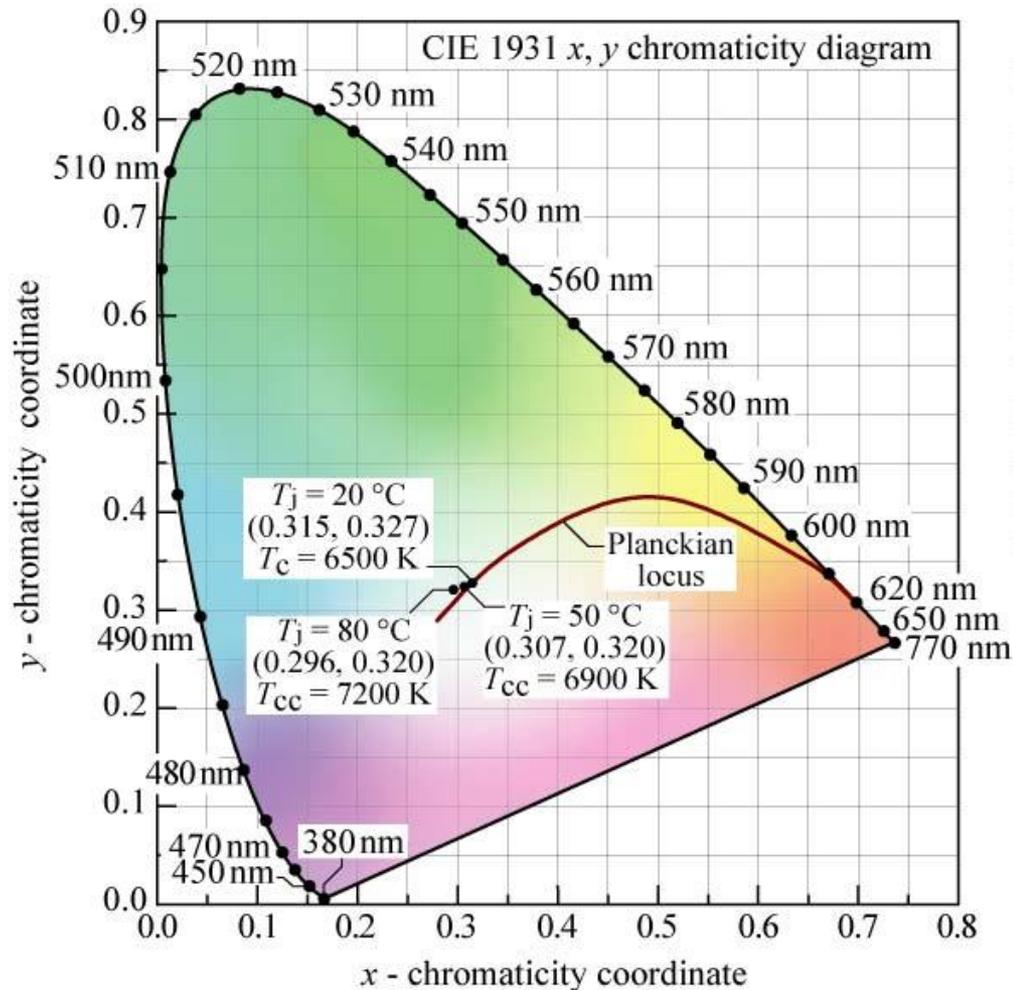
Fig. 20.6. (a) Emission spectrum of tri-chromatic white multi-LED source with color temperature of 6500 K (solid line) and gaussian fit (dashed line). The source has a luminous efficacy of radiation of 319 lm/W and a color rendering index of 84. (b) Photograph of source assembled of 5 mm LEDs (after Chhajed *et al.*, 2004).

# Einfluss der Temperatur



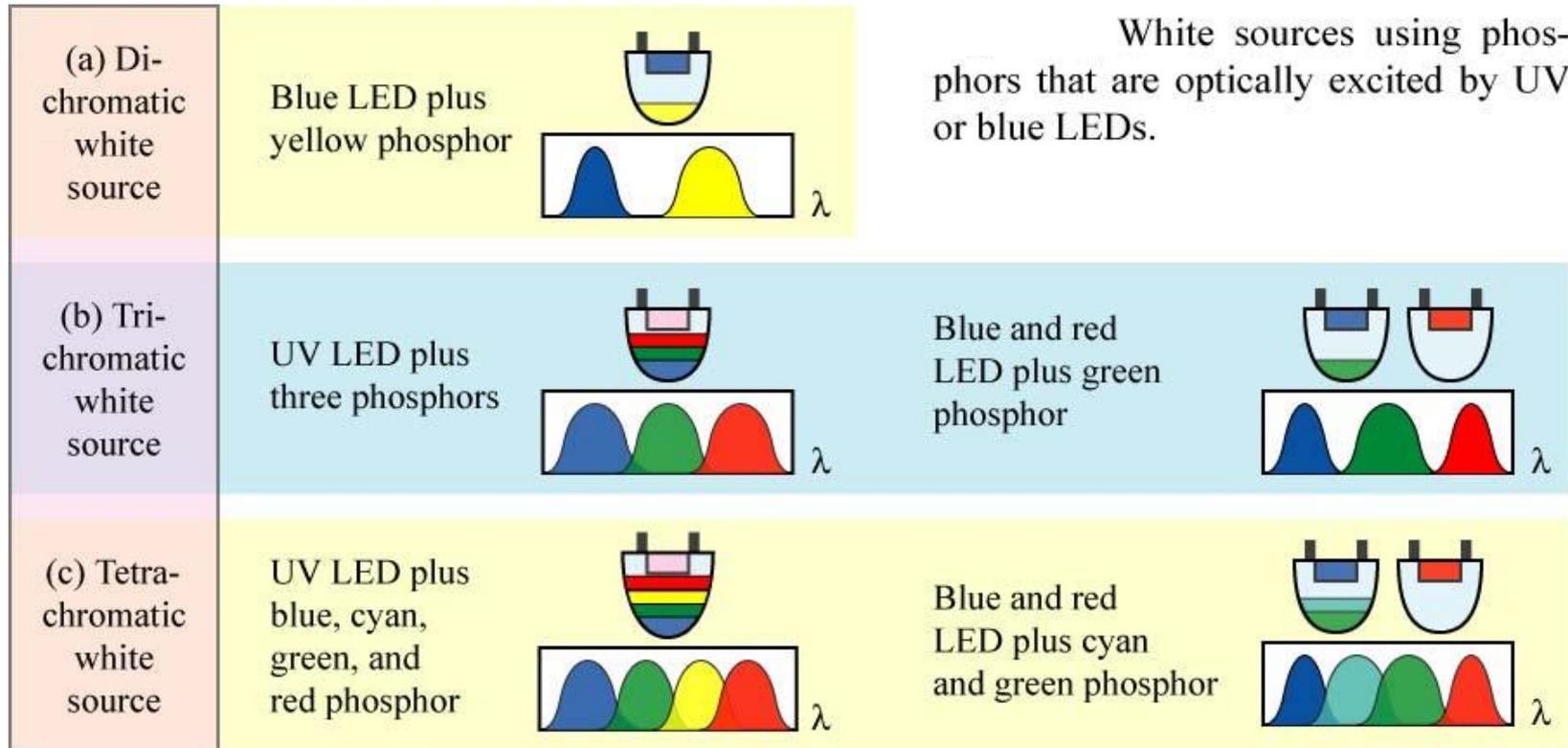
Emission spectrum of trichromatic white LED source for different ambient temperatures (junction heating neglected). Optical power, linewidth, and peak wavelength change with temperature. As a result of these changes, the color temperature of the source increases (after Chhajed *et al.*, 2004).

# Einfluss der Temperatur

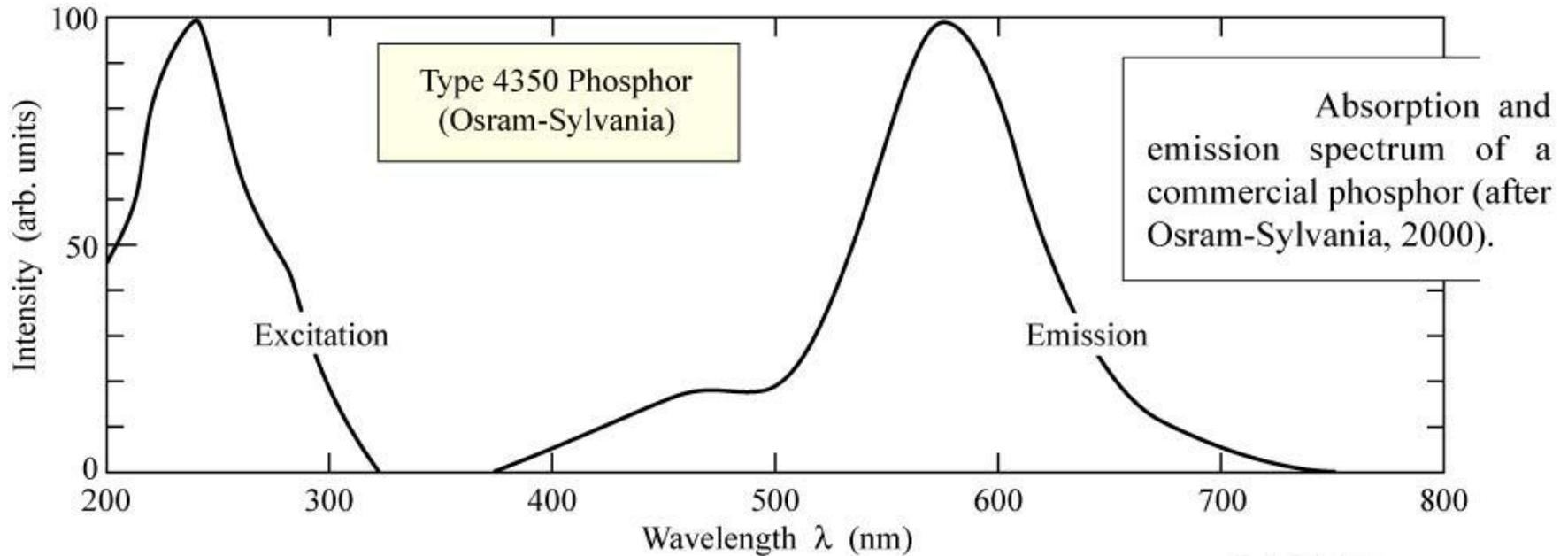


Change in chromaticity of trichromatic white LED-based source. The source color temperature is 6500 K when devices are at room temperature. Due to the dependence of emission power, peak wavelength, and linewidth on temperature, the chromaticity point migrates off the planckian locus as the device temperature increases (after Chhajed *et al.*, 2004).

# Weißlichtquelle mit Phosphor



# Phosphor: Emission und Absorption



# Phosphor: Emission und Absorption

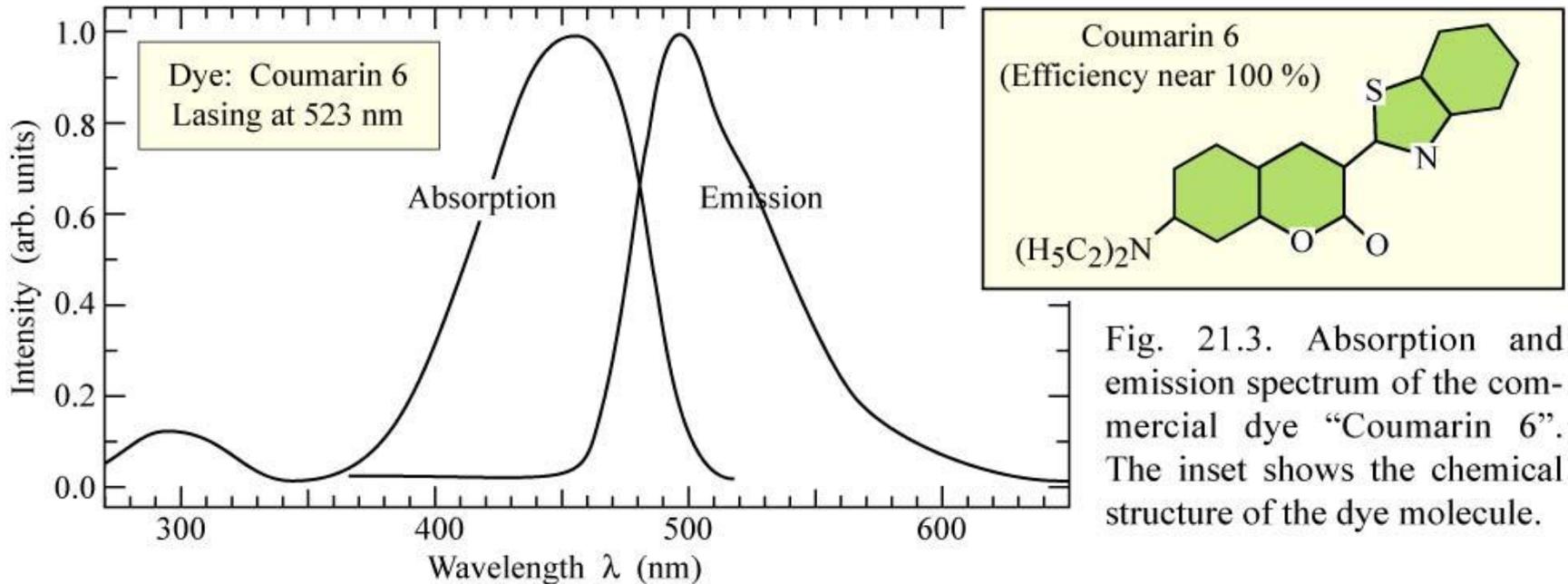
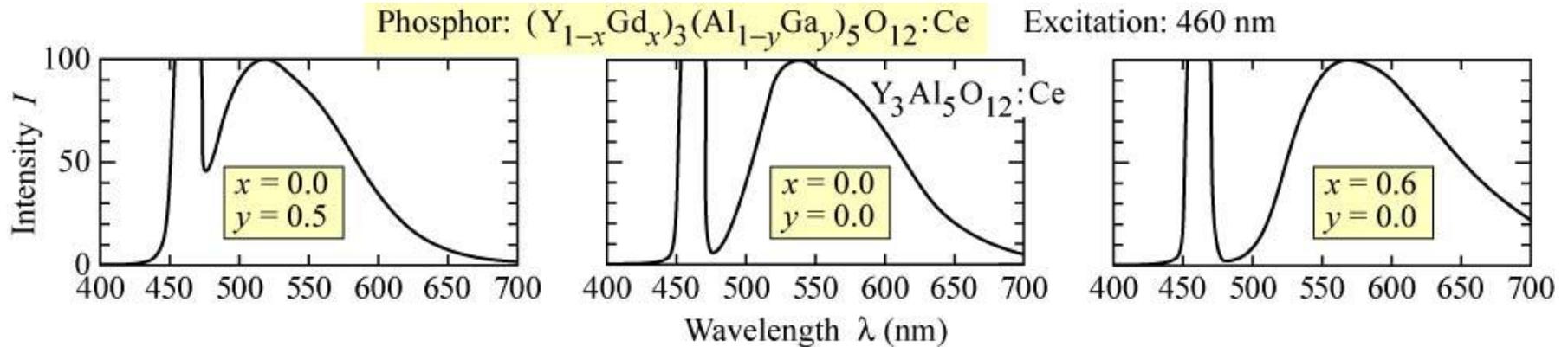


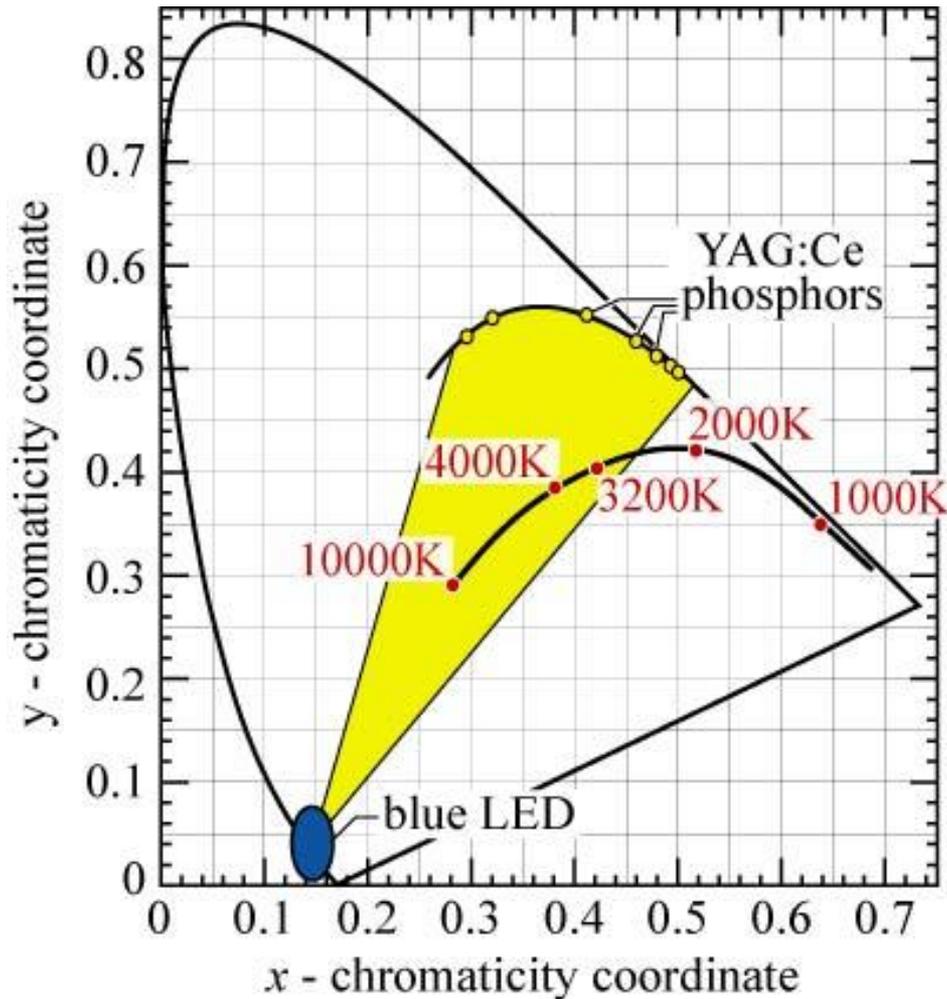
Fig. 21.3. Absorption and emission spectrum of the commercial dye "Coumarin 6". The inset shows the chemical structure of the dye molecule.

# Phosphor: Emissionsspektrum



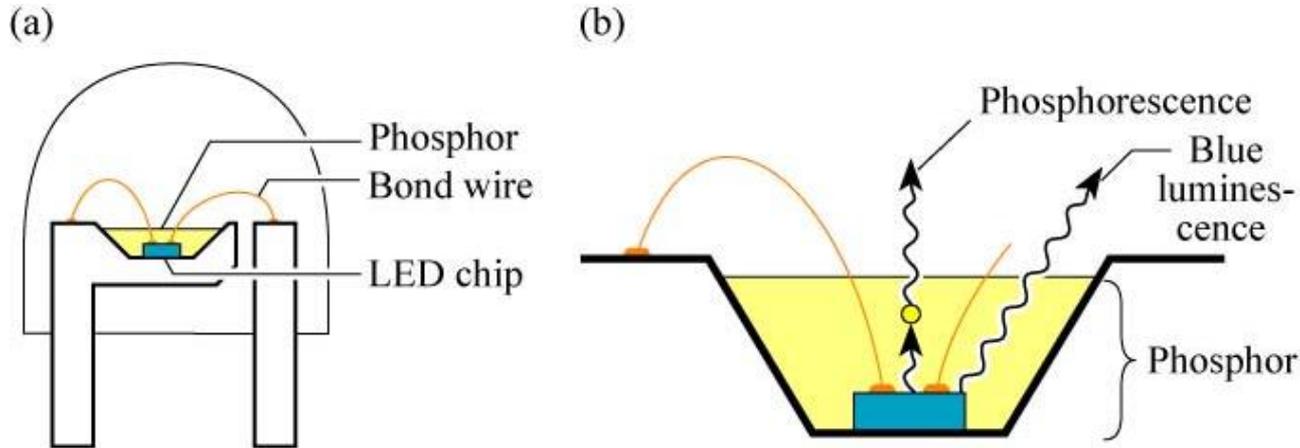
Emission spectrum of Ce-doped yttrium aluminum garnet (YAG:Ce) phosphor for different chemical compositions. The excitation wavelength is 460 nm (after Nakamura and Fasol, 1997).

# Farbpunkte des YAG:Ce Phosphors

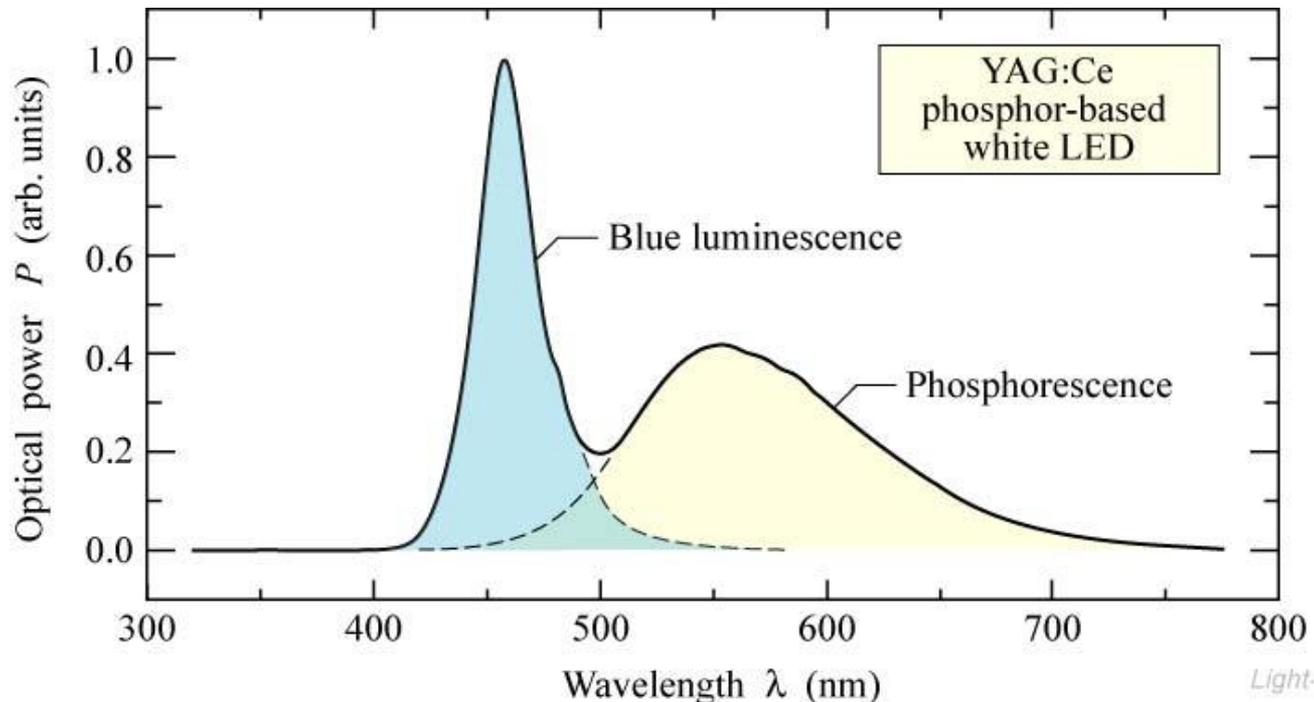


Chromaticity points of YAG:Ce phosphor, and the general area (shaded) accessible to white emitters consisting of a blue LED and YAG:Ce phosphor (adopted from Nakamura and Fasol, 1997). Also shown in the planckian locus with color temperatures.

# Weißer LED: Emissionsspektrum

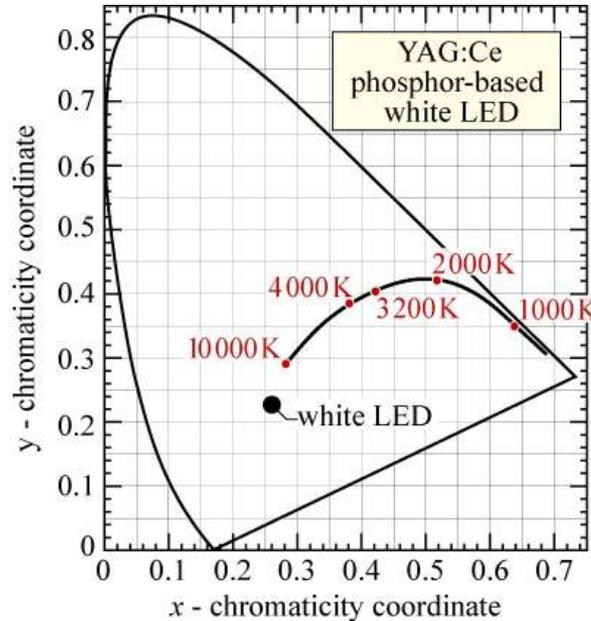


(a) Structure of white LED consisting of a GaInN blue LED chip and a phosphor encapsulating the die. (b) Wavelength-converting phosphorescence and blue luminescence (after Nakamura and Fasol, 1997).

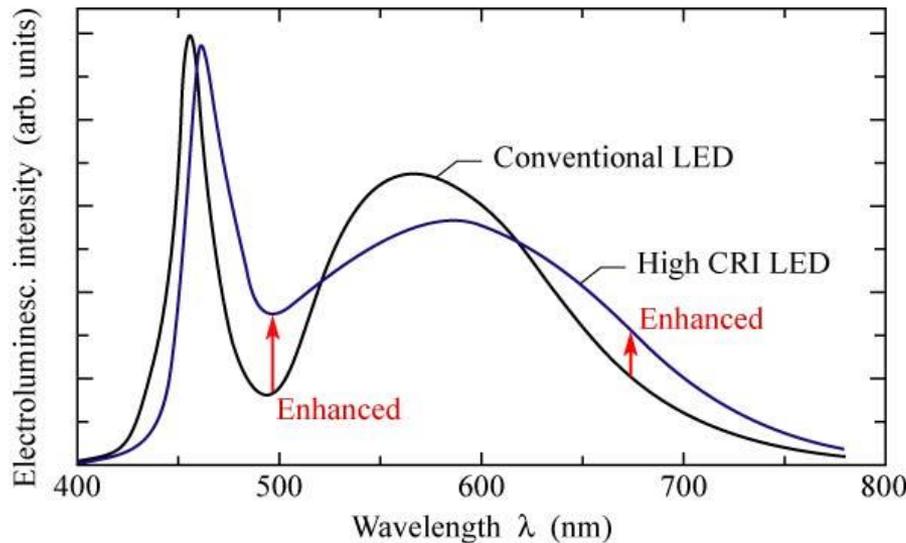


Emission spectrum of a phosphor-based white LED manufactured by Nichia Corporation (Anan, Tokushima, Japan).

# Weißer LED: Farbkoordinaten und EL

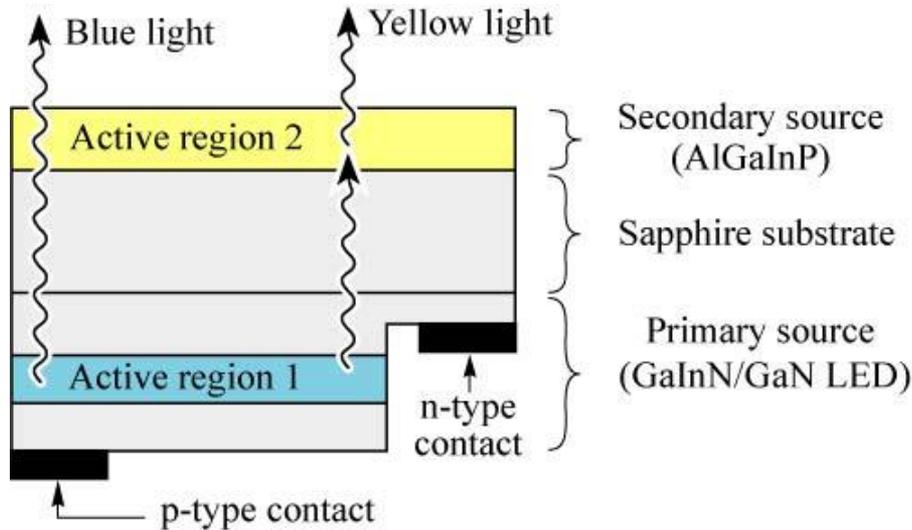


Chromaticity coordinates of a commercial phosphor-based white LED manufactured in 2001 by Nichia Corporation (Anan, Tokushima, Japan). Also shown is the Planckian locus and associated color temperatures.

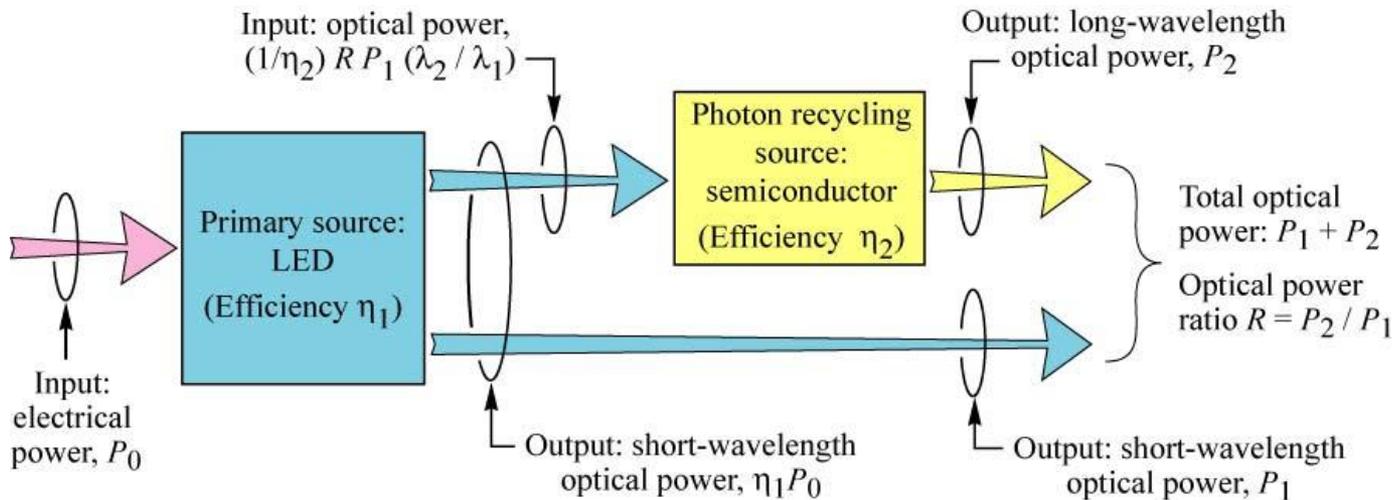


Electroluminescence spectrum of conventional white LED and of high-color-rendering white LED. The high CRI results from the broader emission spectrum and the reduction of the notch in the spectrum (after Narukawa, 2004).

# Weißer LED: Halbleiter-Photonenrecycling

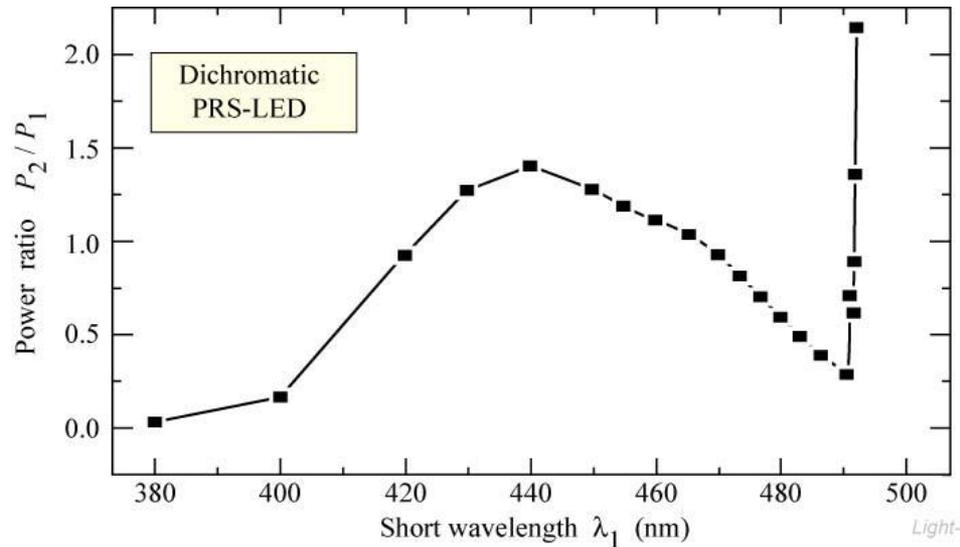


Schematic structure of a photon-recycling semiconductor LED with one current-injected active region (Active region 1) and one optically excited active region (Active region 2) (after Guo *et al.*, 1999).

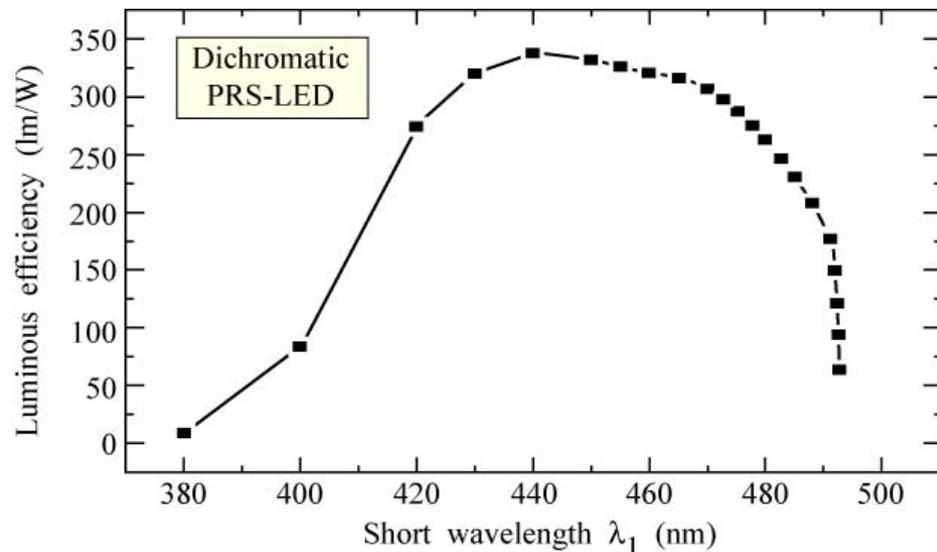


Photon-recycling semiconductor LED power budget with electrical input power  $P_0$  and optical output power  $P_1$  and  $P_2$ .

# Weißer LED: Halbleiter-Photonenrecycling

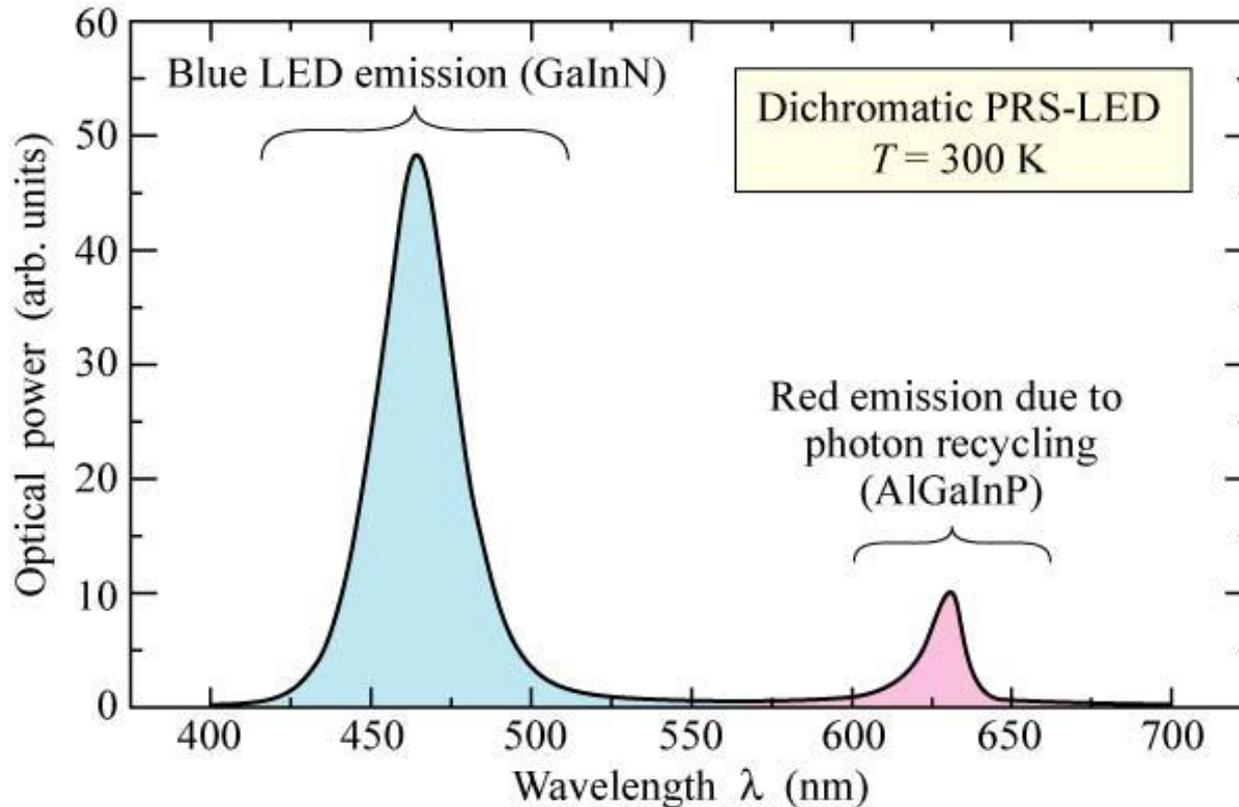


Calculated power ratio between the two optical output powers  $P_1$  and  $P_2$  required to obtain white light emission (after Guo *et al.*, 1999).



Calculated luminous efficiency of a dichromatic PRS-LED versus its primary emission wavelength (after Guo *et al.*, 1999).

# Weißer LED: Halbleiter-Photonenrecycling



Emission spectrum of dichromatic PRS-LED with current-injected GaInN blue LED primary source and AlGaInP photon recycling wafer (secondary source) emitting in the red (after Guo *et al.*, 2000).