

9. Anorganische LEDs

Inhalt

9.1 Klassifikation von LEDs

9.2 Evolution von LED-Lichtquellen

9.3 Lichterzeugung in Halbleiter LEDs

9.4 Chipstruktur von (Al,In,Ga)N/Al₂O₃ LEDs

9.5 Spektren von LEDs

9.6 Konzepte zur Erzeugung von weißem Licht

9.7 Leuchtstoff-LEDs (pcLEDs)

9.8 Anforderung an LED-Leuchtstoffe

9.9 Ce³⁺-Leuchtstoffe

9.10 Weiße pcLEDs

9.11 Probleme von Ce³⁺-Leuchtstoffen

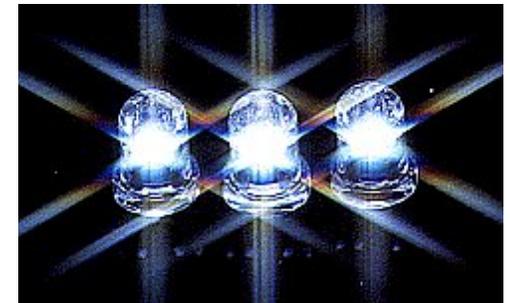
9.12 Eu²⁺-Leuchtstoffe

9.13 Warmweiße pcLEDs

9.14 Nitridische Leuchtstoffe und rote Schmalbandemitter

9.15 Anwendungen anorganischer LEDs

9.16 Die Zukunft der LEDs



9.1 Klassifikation von LEDs

Lichtemittierende Dioden

Organisch

Anorganisch

DC
low V

AC
high V

DC
low V

PLED

OLED

PEL

ACTFEL

PEL

ILED

PPV
PVK

Excimere
Komplexe

ZnS:Cu
ZnS:Mn

ZnS:Tb
ZnS:Mn

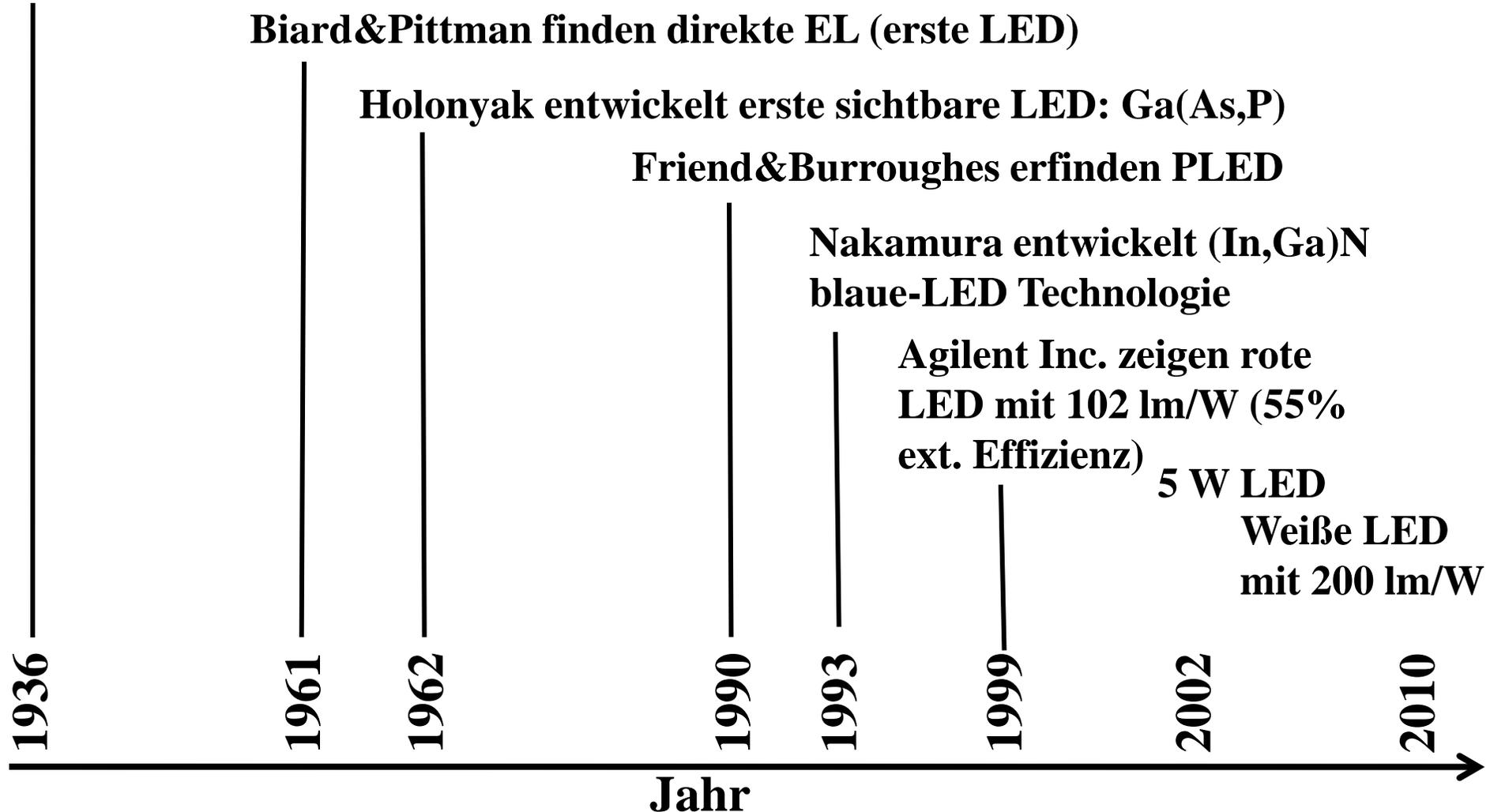
SrS:Ce
CaS:Mn

AlInGaP
AlInGaN

EL = Electroluminescence, I = Inorganic, P = Powder, TF = Thin Film

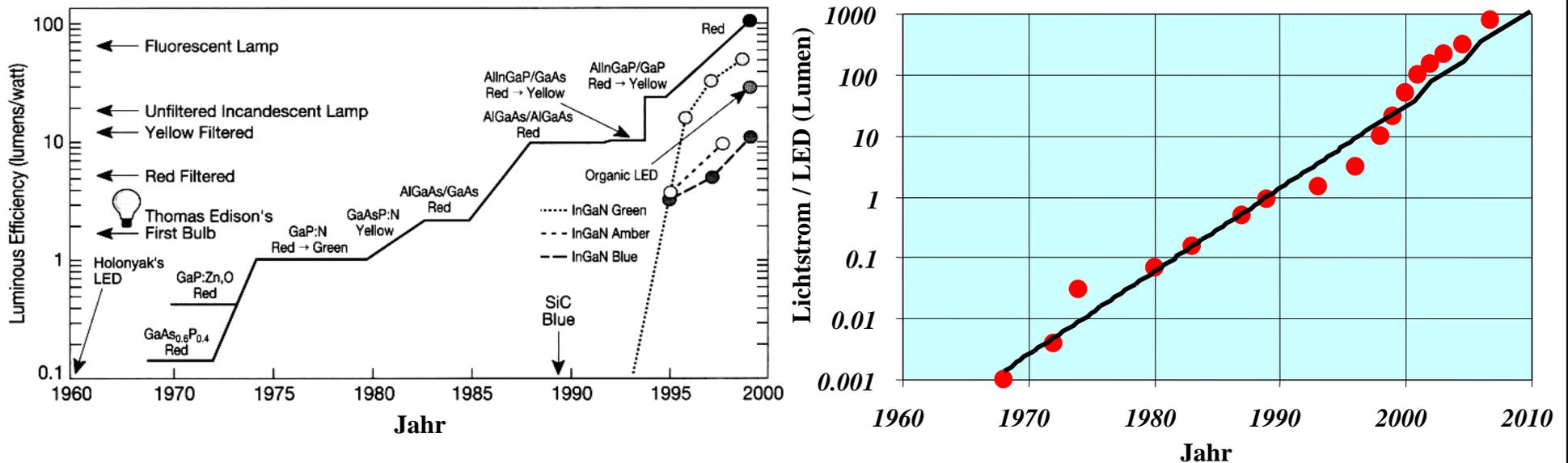
9.2 Evolution von LED-Lichtquellen

Destriau entdeckt indirekte EL



9.2 Evolution von LED-Lichtquellen

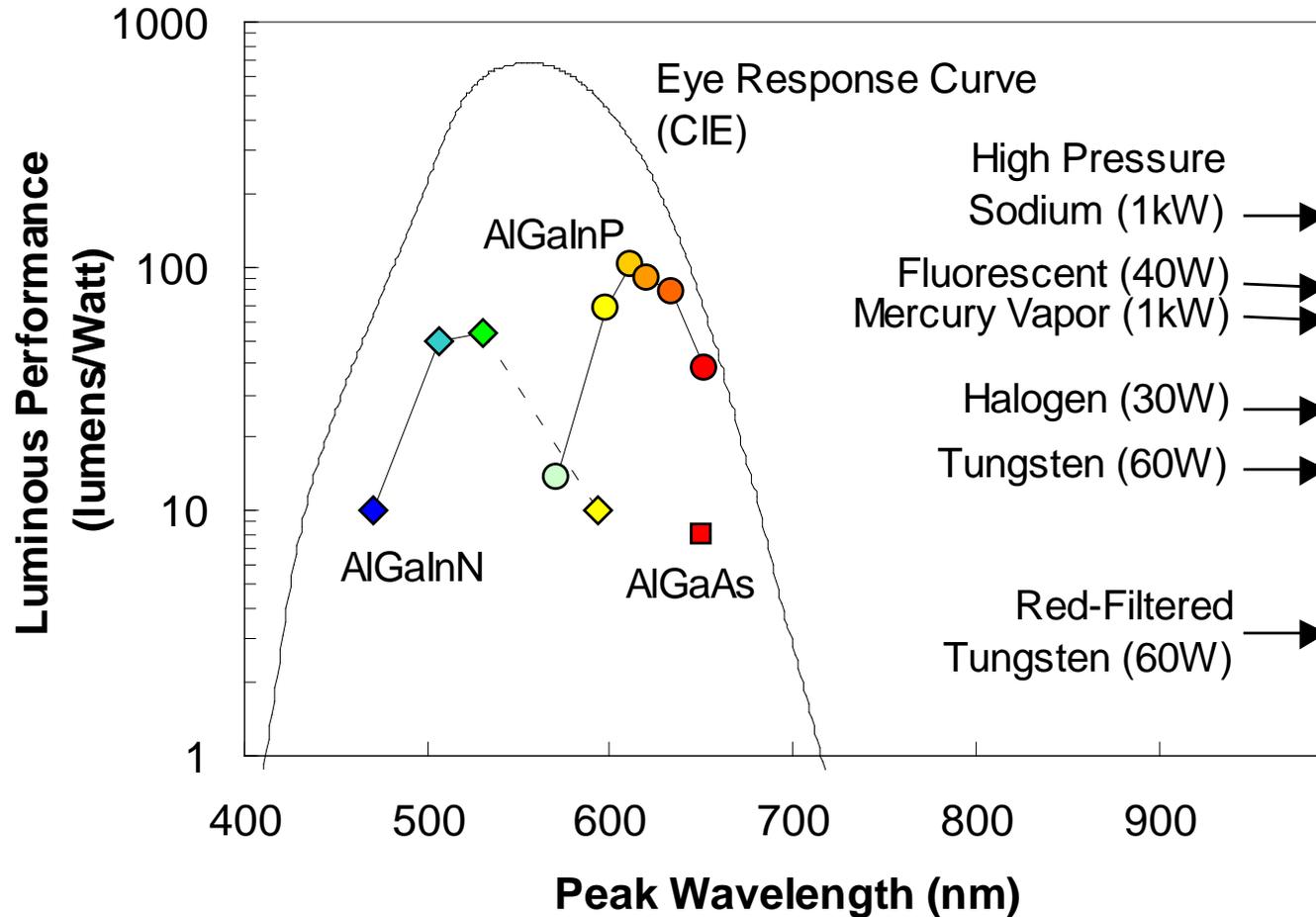
Entwicklung der Lichtausbeute und des Lumenstroms



**LEDs sind inzwischen effizienter als Glüh- und Fluoreszenzlampen
2012: LEDs > 1000 lm auf dem Markt**

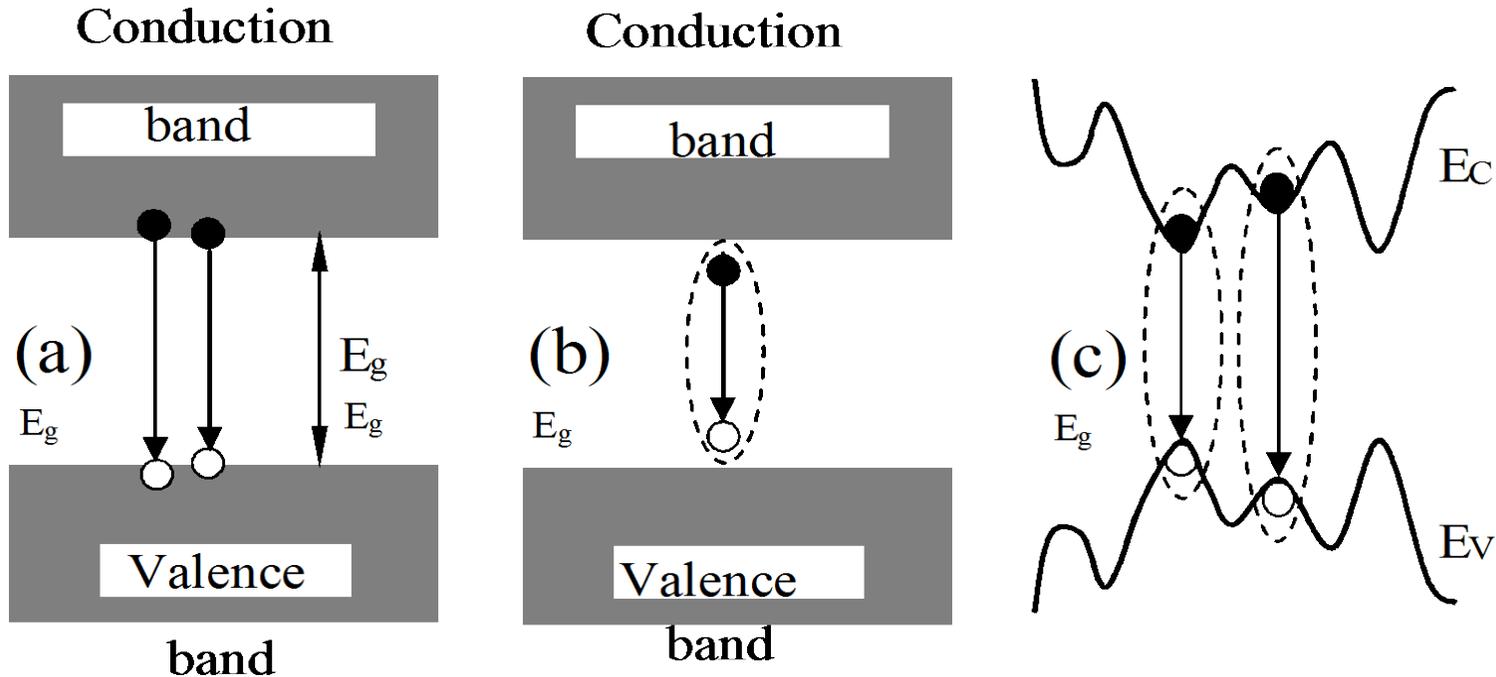
9.2 Evolution von LED-Lichtquellen

Lichtausbeute von (Al,In,Ga)N, (Al,In,Ga)P und (Al,Ga)As LEDs (Stand 2002, Quelle: Lumileds)



9.3 Lichterzeugung in Halbleiter LEDs

Rekombination von Elektronen und Löchern



Intrinsische strahlende Übergänge in Halbleitern:

(a) Band-zu-Band Übergänge

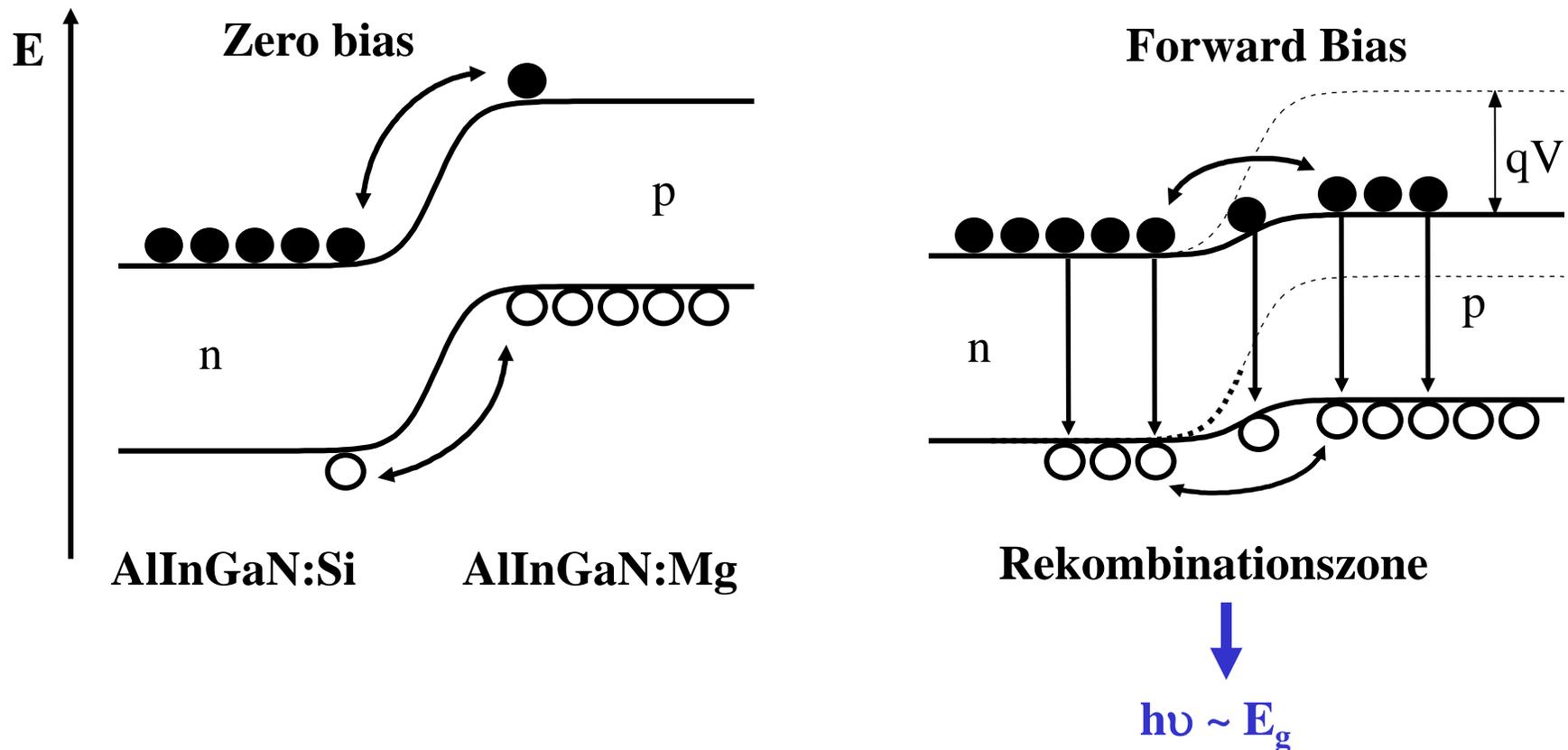
(b) Free-exciton Annihilation

(c) Rekombination von lokalisierten Excitonen durch Potentialfluktuationen der Bänder

9.3 Lichterzeugung in Halbleiter LEDs

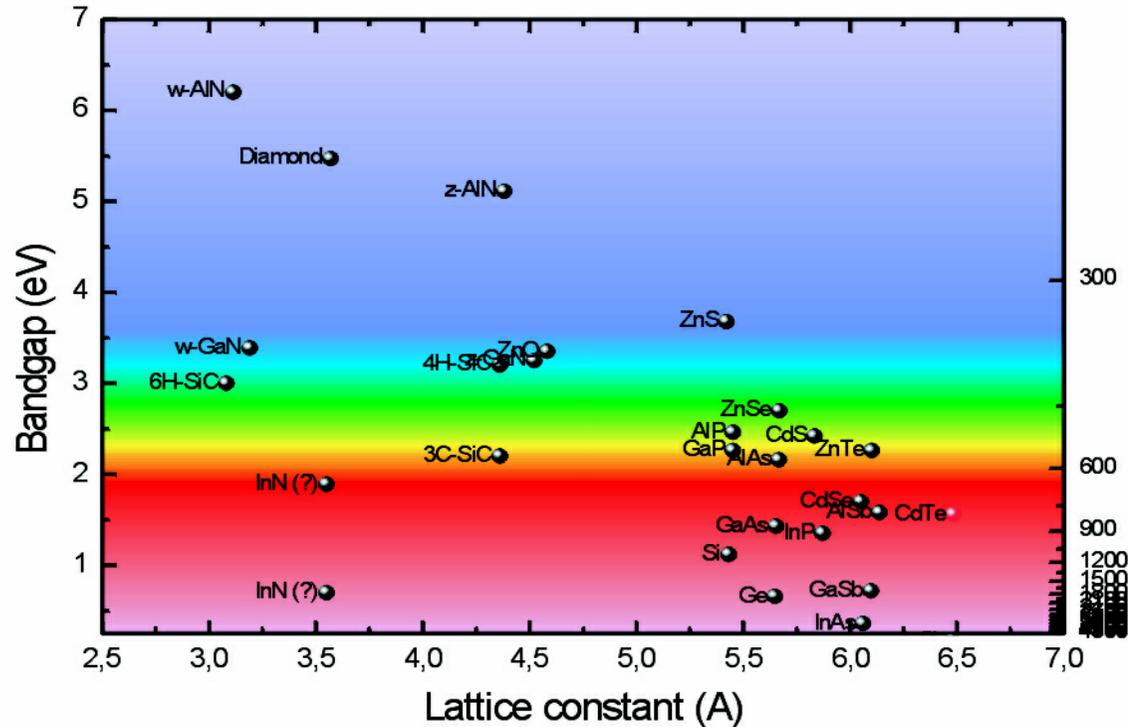
Prinzip der Halbleiter LED

Rekombination von Elektronen und Löchern am p/n-Übergang unter Energie- und Impulserhaltung \Rightarrow Energie des emittierten Photons entspricht der Bandlücke



9.3 Lichterzeugung in Halbleiter LEDs

Bandlücke geeigneter Halbleiter-Materialien

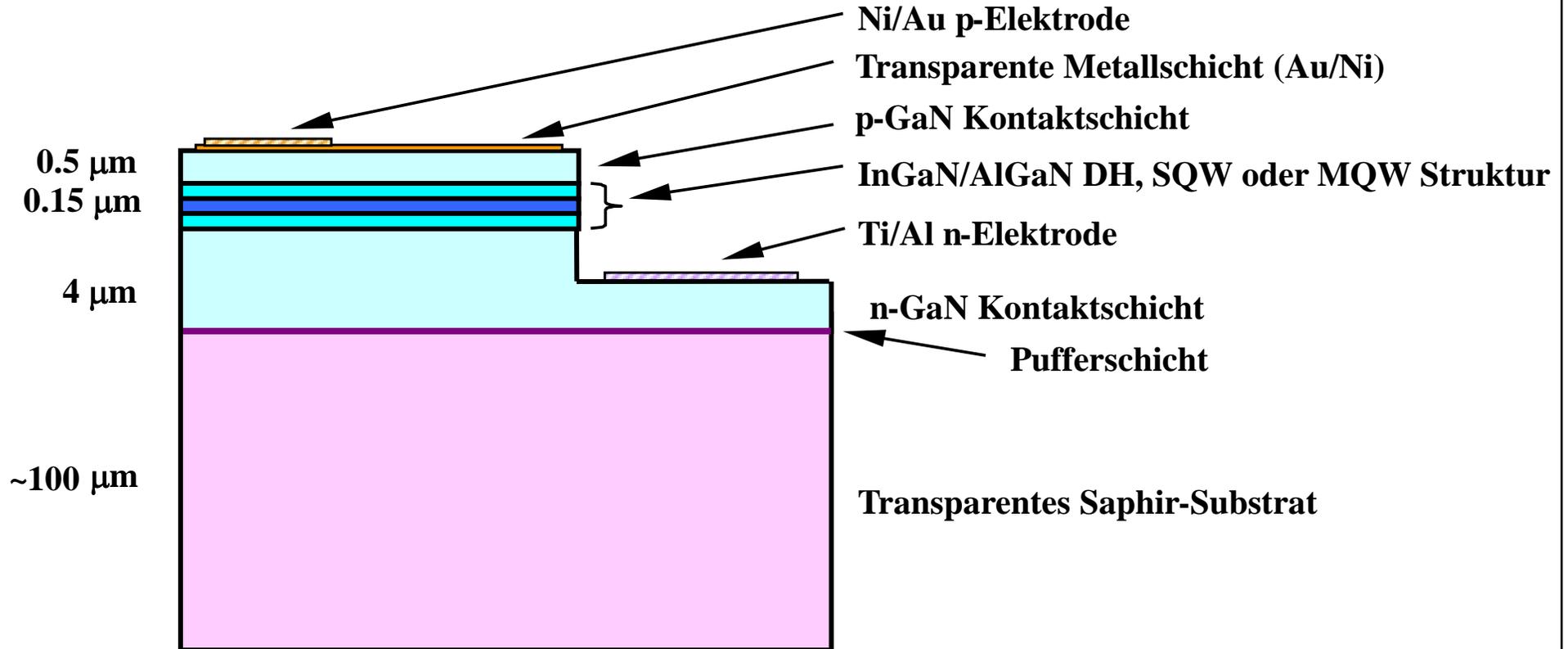


AlN **6.2 eV** **(200 nm)**
GaN **3.5 eV** **(370 nm)**
InN **1.9 eV** **(650 nm)**

AlP **2.5 eV** **(500 nm)**
GaP **2.3 eV** **(520 nm)**
InP **1.4 eV** **(900 nm)**

9.4 Chipstruktur von AlInGaN/Al₂O₃ LEDs

Struktur einer Halbleiter-LED

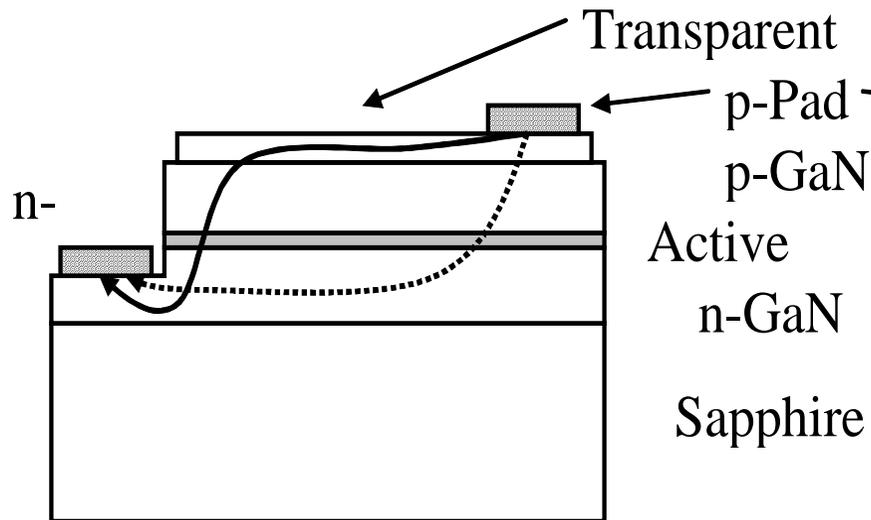


(S. Nakamura and G. Fasol, *The Blue Laser Diode: GaN Based Light Emitters and Lasers*, Springer, Berlin, 1997)

9.4 Chipstruktur von AlInGaN/Al₂O₃ LEDs

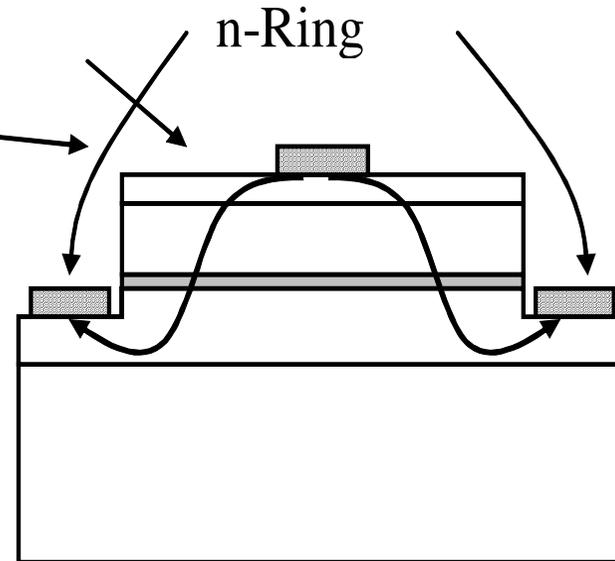
Strompfade in (Al,In,Ga)N LEDs auf Saphir

(a) Asymmetrisches Design



(a)

(b) Symmetrisches Design

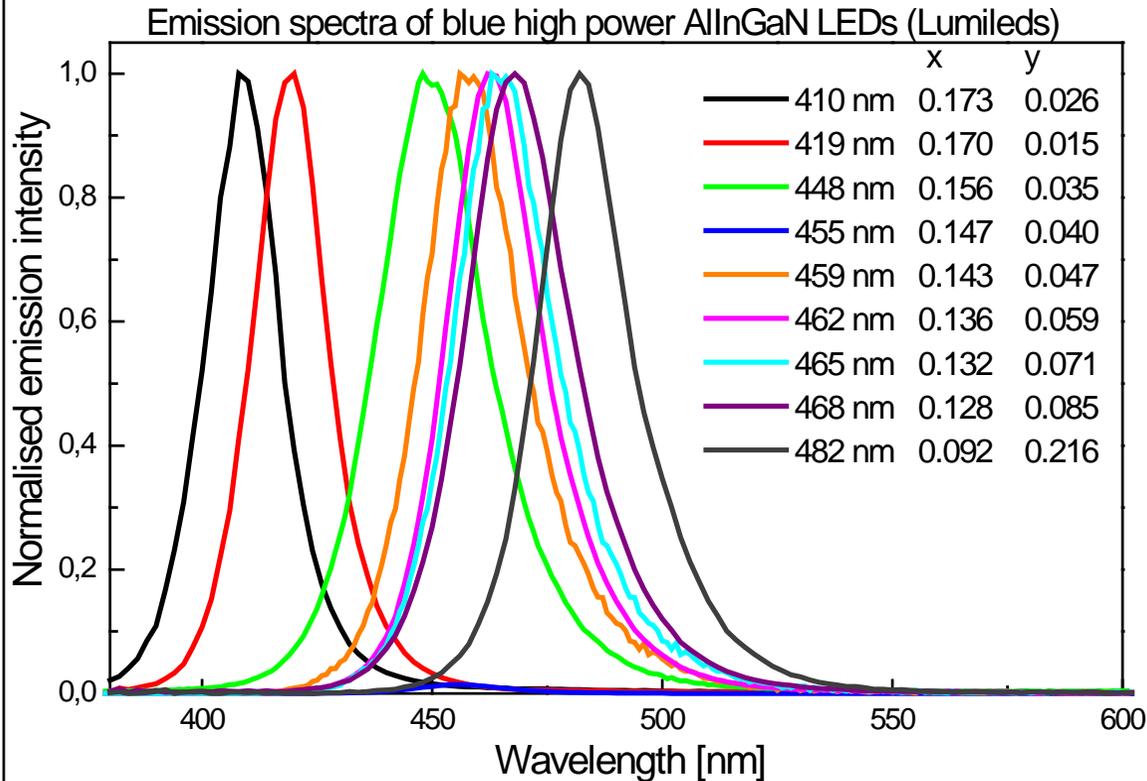


(b)

(M.R. Krames et al., Proc. SPIE 3938, 2, 2000)

9.5 Spektren von LEDs

(Al,In,Ga)N LEDs



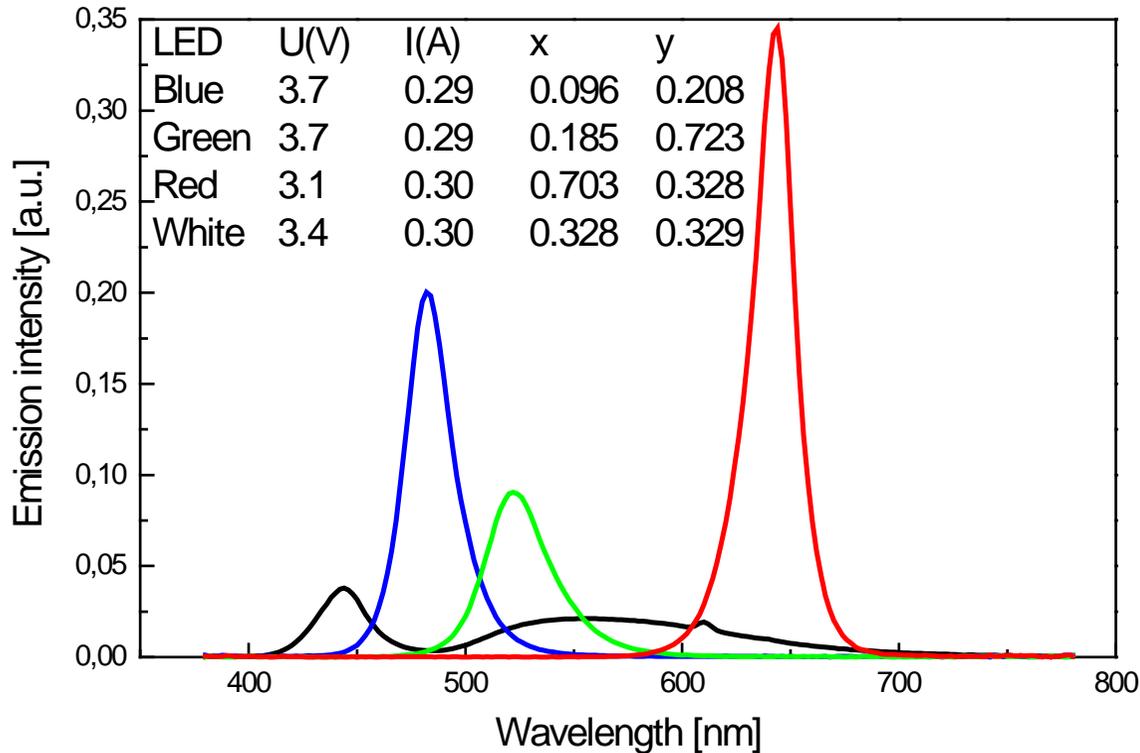
(Al,In,Ga)N bildet eine lückenlose Mischkristallreihe

Steigende In-Konzentration

- **Energie des (In,Ga)N quantum well Übergangs sinkt**
- **Emissionsbanden verbreitern sich**
- **Abnahme der Quantenausbeute durch Defekte**

9.5 Spektren von LEDs

High Brightness LEDs (HB LEDs)



(Al,In,Ga)P
500 – 900 nm
Löschung ~0.7%/K

(Al,In,Ga)N
210 – 550 nm
Löschung ~0.1%/K

Plattformkonzept !

Leistungsaufnahme	Spannung	Stromstärke	Chiptemperatur
1 W (2000)	4.5 V	0.2 A	~120 °C
5 W (2002)	4.5 V	1.1 A	>150 °C

9.6 Konzepte zur Erzeugung von weißem Licht

Durch additive Farbmischung

1. Schwarzkörperstrahler

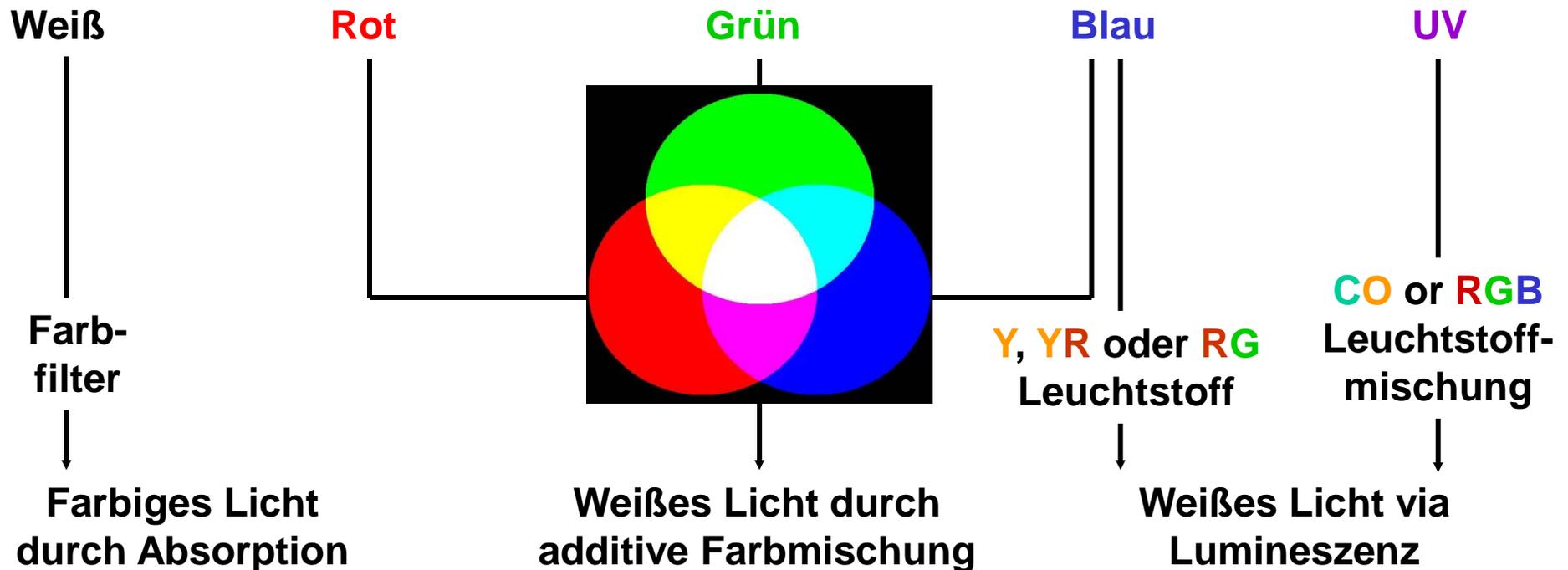
⇒ sichtbares Licht + IR

2. Gasentladungen

⇒ VUV + UV-C/B/A + sichtbares Licht

3. Halbleiter

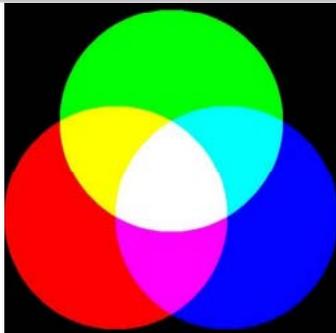
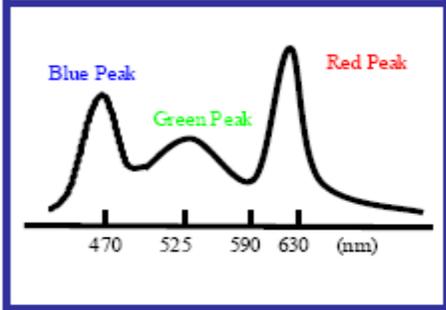
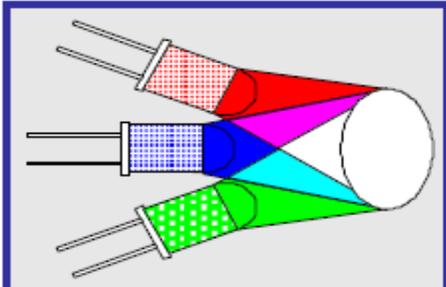
⇒ UV-A, sichtbare oder IR-A Strahlung



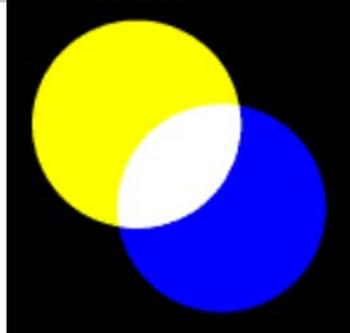
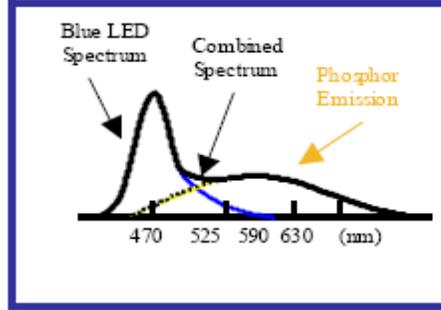
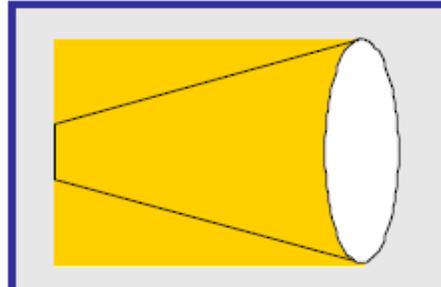
9.6 Konzepte zur Erzeugung von weißem Licht

Weißlichterzeugung mit LEDs

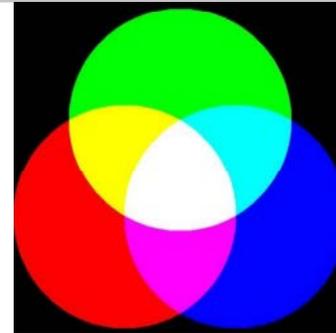
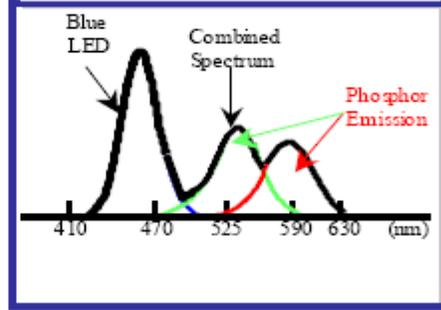
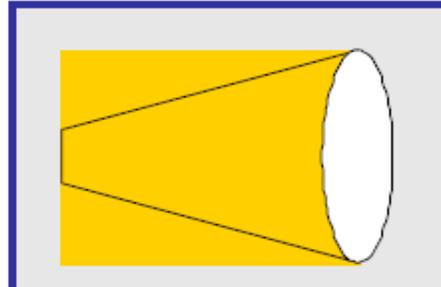
Rote + Grüne + Blaue LEDs



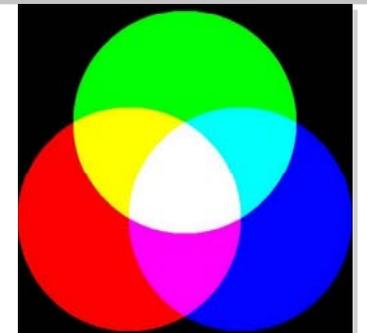
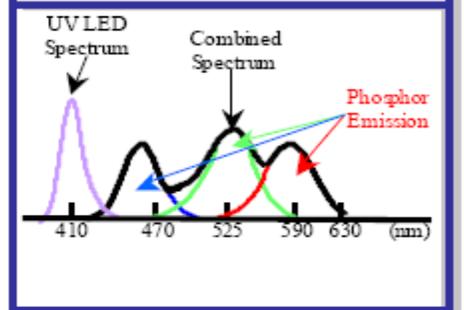
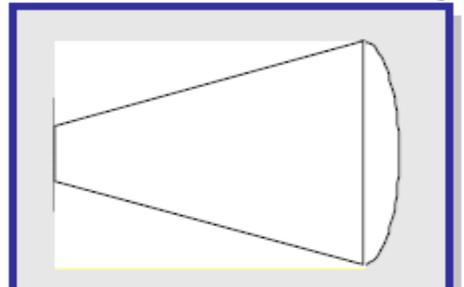
Blaue LED + gelber Leuchtstoff



Blaue LED + RG Leuchtstoffmischung

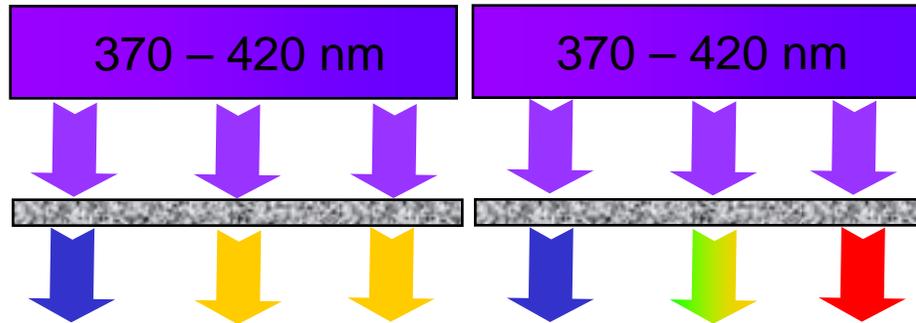


UV LED + RGB Leuchtstoffmischung



9.6 Konzepte zur Erzeugung von weißem Licht

Weißlicherzeugung mit Nah-UV oder blauen LEDs

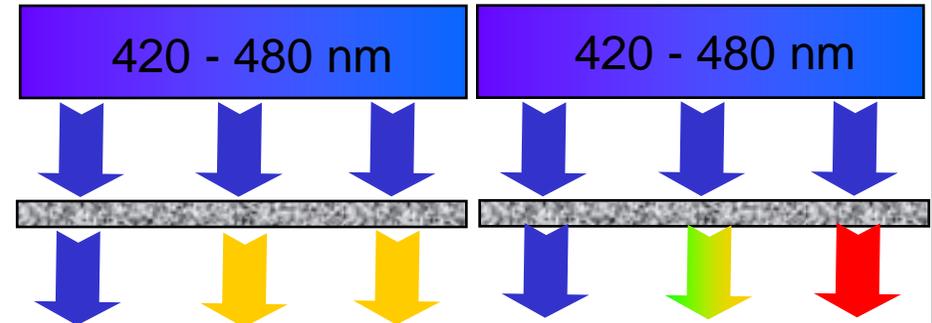


290 – 330 lm/W

320 – 360 lm/W

CRI = 70 – 85

CRI = 85 - 95



290 – 330 lm/W

320 – 360 lm/W

CRI = 70 – 85

CRI = 85 - 95

UV Licht verursacht Polymerdegradation
Und erfordert Sicherheitsmaßnahmen

Transmission von blauem hängt von
der optischen Weglänge durch die
Leuchtstoffschicht ab
Farbpunkt = $f(\text{Betrachtungswinkel})$

390 nm LED (3.2 eV) → 570 nm (2.2 eV)

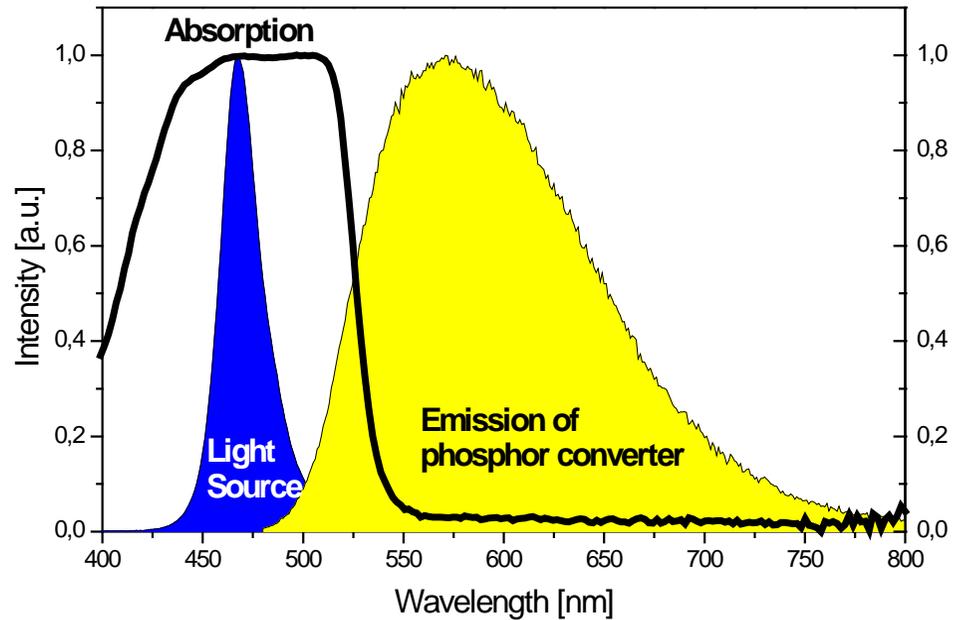
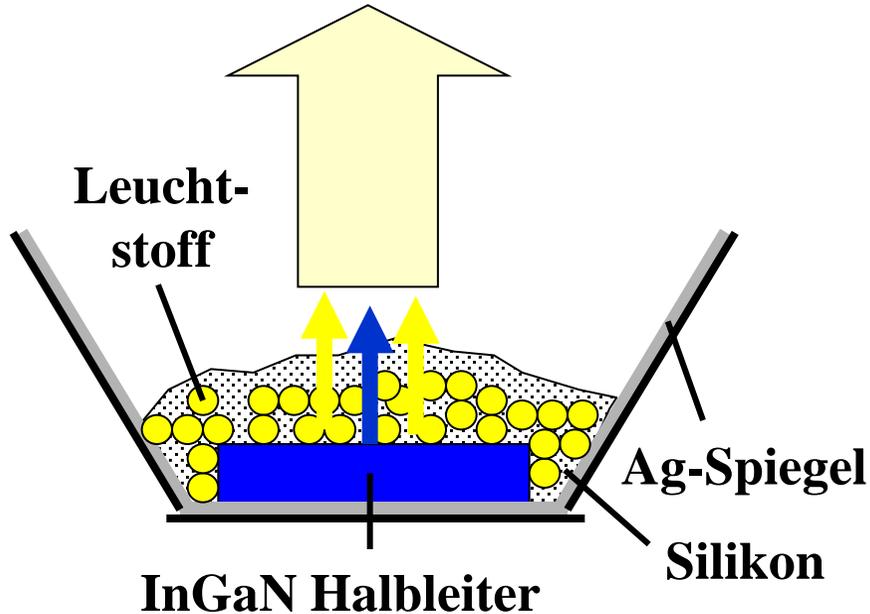
Quantum deficit = 0.69

460 nm LED (2.7 eV) → 570 nm (2.2 eV)

Quantum deficit = 0.78

9.7 Leuchtstoff-LEDs (pcLEDs)

Weißlichterzeugung mit blauen LEDs



Blauer LED-Chip:

Leuchtstoffschicht:

420 – 480 nm emittierende (In,Ga)N LED

- (1) Gelb $T_c > 4000 \text{ K}$ „Cool white“
- (2) Gelb + Rot $T_c < 4000 \text{ K}$ „Warm white“
- (3) Grün + Rot $2000 \text{ K} < T_c < 8000 \text{ K}$
- (4) Rot **Magentafarben**

9.8 Anforderung an LED Leuchtstoffe

Allgemein

- starke Absorption bei der Emissionswellenlänge des Halbleiter-LED
→ spin- and paritätserlaubter Übergang, z.B. $4f^n - 4f^{n-1}5d^1$
- Quantenausbeute > 90%
- Stabilität gegenüber O_2 , CO_2 und H_2O
- Stabilität unter hoher Anregungsdichte (100 - 200 W/cm^2)
- Kompatibilität mit dem LED-Herstellungsprozess

Blau + Gelb Konzept

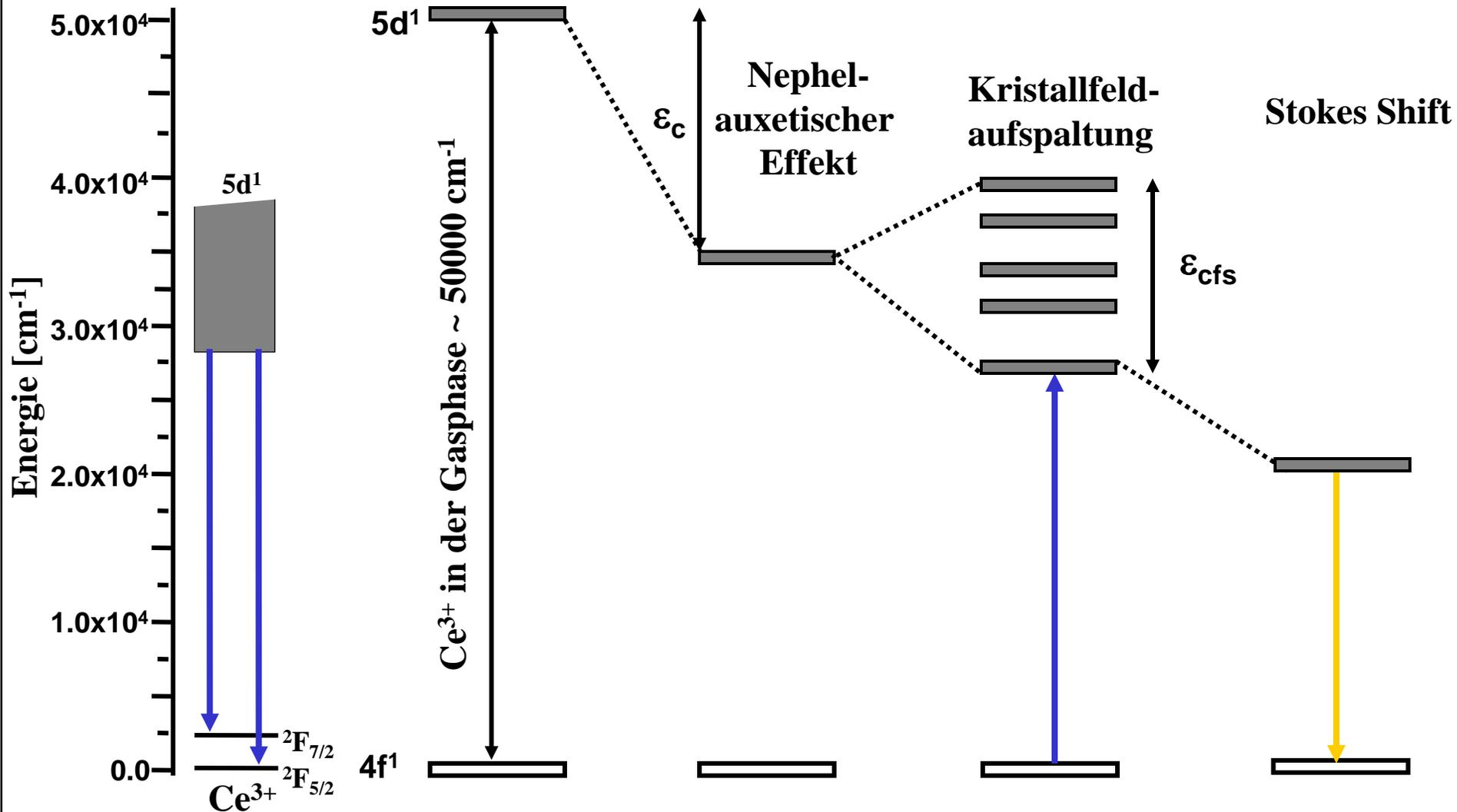
- breite Emissionsbande zwischen 560 - 580 nm
→ **Ce³⁺-Leuchtstoffe** (Aufspaltung des Grundzustandes $^2F_{5/2} + ^2F_{7/2}$)

Blau + Grün/Gelb + Rot Konzept

- grüner/gelber Leuchtstoff → Eu^{2+} oder Ce^{3+} 530 - 560 nm
- roter Leuchtstoff → Eu^{2+} 590 - 620 nm

9.9 Ce³⁺ Leuchtstoffe

Vereinfachtes Termschema von Ce³⁺ ([Xe]4f¹)



9.9 Ce³⁺ Leuchtstoffe

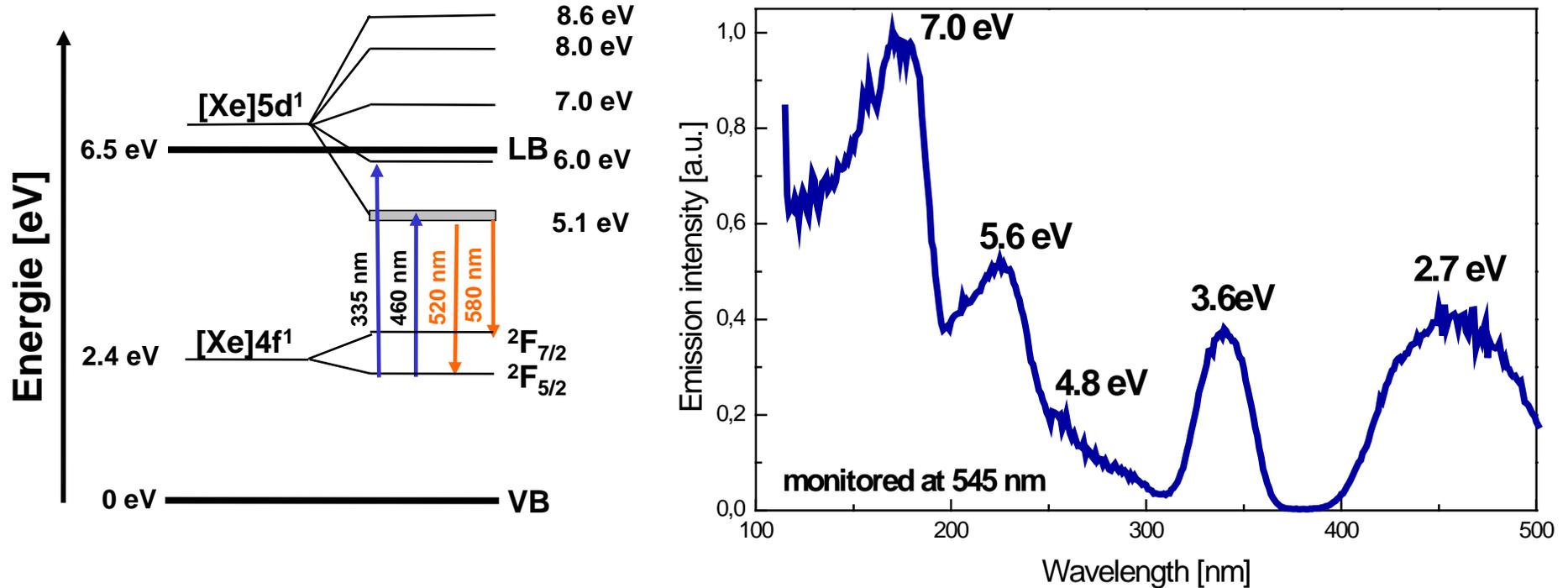
Typische Materialien

Wirtsgitter	λ_{abs} [nm]	λ_{em} [nm]	ϵ_{cfs} [cm ⁻¹]	ϵ_{c} [cm ⁻¹]
SrAl ₁₂ O ₁₉	224, 235, 244, 252, 261	290, 315	6300	10000
LaPO ₄	203, 225, 238, 250, 323	320, 335	11900	8700
LaMgAl ₁₁ O ₁₉	220, 232, 243, 255, 270	345	8400	10000
YPO ₄	203, 225, 238, 250, 323	335, 355	18000	9600
LaBO ₃				11500
YAlO ₃	219, 237, 275, 291, 303	370	12700	12900
LuAlO ₃	216, 230, 275, 292, 308	370	12650	13800
LaMgB ₅ O ₁₀	202, 225, 239, 257, 272	385, 410	9000	12700
YBO ₃	219, 245, 338, 357	390, 415	17600	13300
Lu ₂ SiO ₅	205, 215, 267, 296, 356	405, 420	20700	12300
Lu ₃ Al ₅ O ₁₂	205, 225, 265, 350, 445	525, 540		
Y ₃ Al ₅ O ₁₂	205, 225, 261, 340, 458	545, 555	27000	14700

(P. Dorenbos, *J. Luminescence* 99 (2002) 283)

9.9 Ce³⁺ Leuchtstoffe

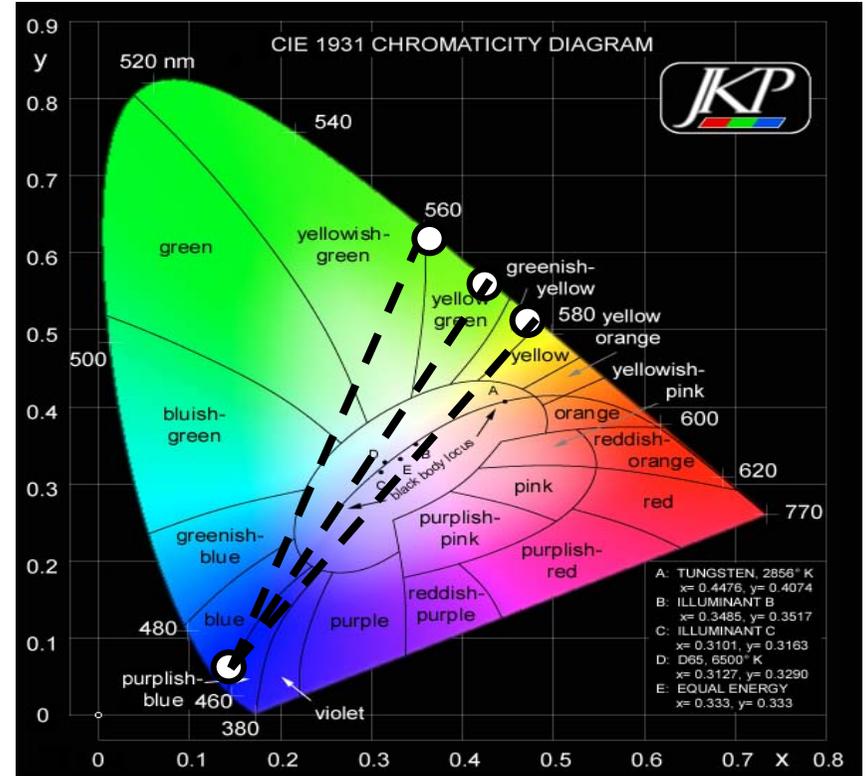
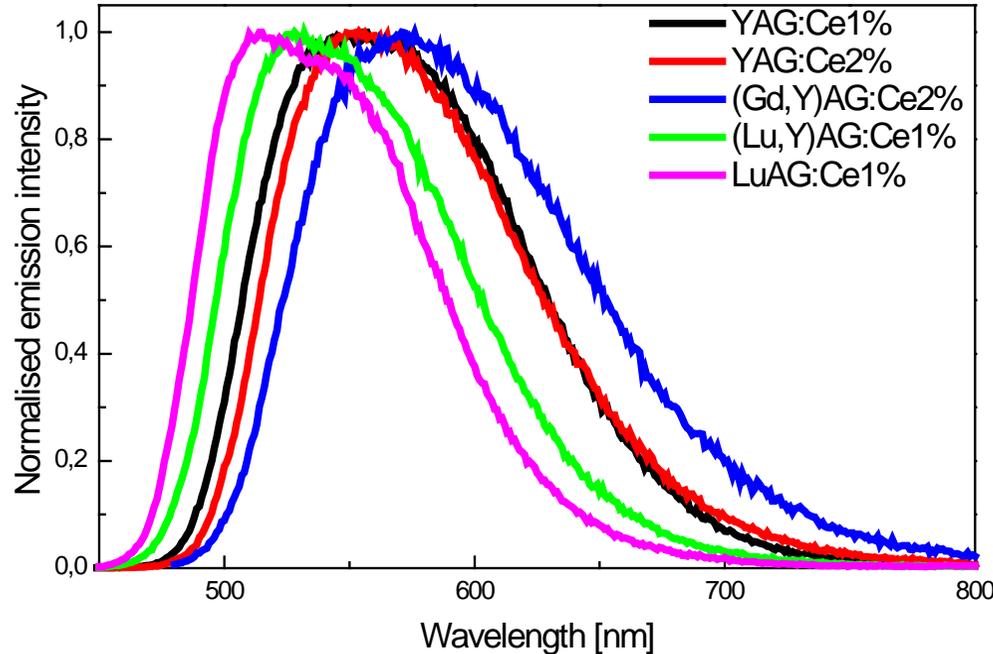
Energieniveaus und Anregungsspektrum von Ce³⁺ in Y₃Al₅O₁₂



(M. Batentschuk et al., MRS Symp. Proc. 560 (1999) 215)

9.9 Ce³⁺ Leuchtstoffe

Ln₃Me₅O₁₂:Ce - Emissionsspektren und Farbpunkte

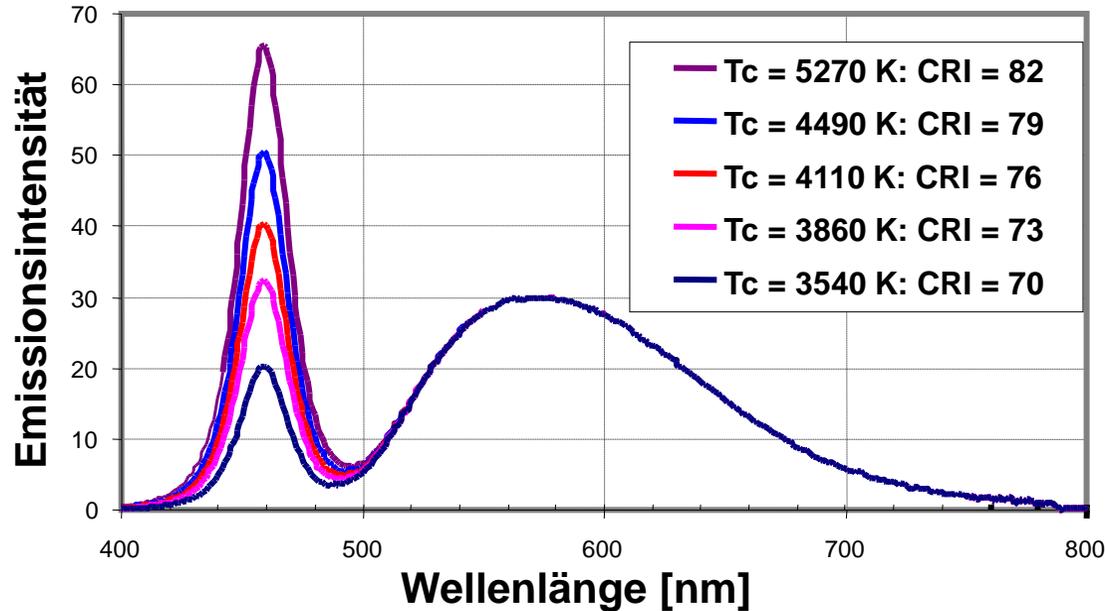


Granatstruktur Ln₃Me₅O₁₂

- Ln = Y, Ce, Gd, Lu dodekaedrisch
- Me = Al, Ga tetraedrisch (3), Al, Ga, Sc oktaedrisch (2)
- Substitution von Y durch Gd, Tb, Dy oder Erhöhung der Ce³⁺-Konzentration
⇒ Rotverschiebung
- Substitution von Y durch Lu ⇒ Blauverschiebung

9.10 Weiße pcLEDs

Blauer (In,Ga)N Chip + (Y,Gd)₃Al₅O₁₂:Ce



Die ersten kommerziell erhältlichen LEDs folgten diesem Konzept (1)

- Farbwiedergabe CRI = 70 – 85
- Kaltes weißes Licht (nachts sind alle Katzen grau.....)
- Lichtausbeute bis zu 300 lm/W
- Problem: Niedrige Farbwiedergabe für rote Farben und niedrige Farbtemperaturen

9.10 Weiße pcLEDs

Weiße pcLEDs mit hoher Farbwiedergabe

(1) Blaue LED + $(\text{Y,Gd})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$

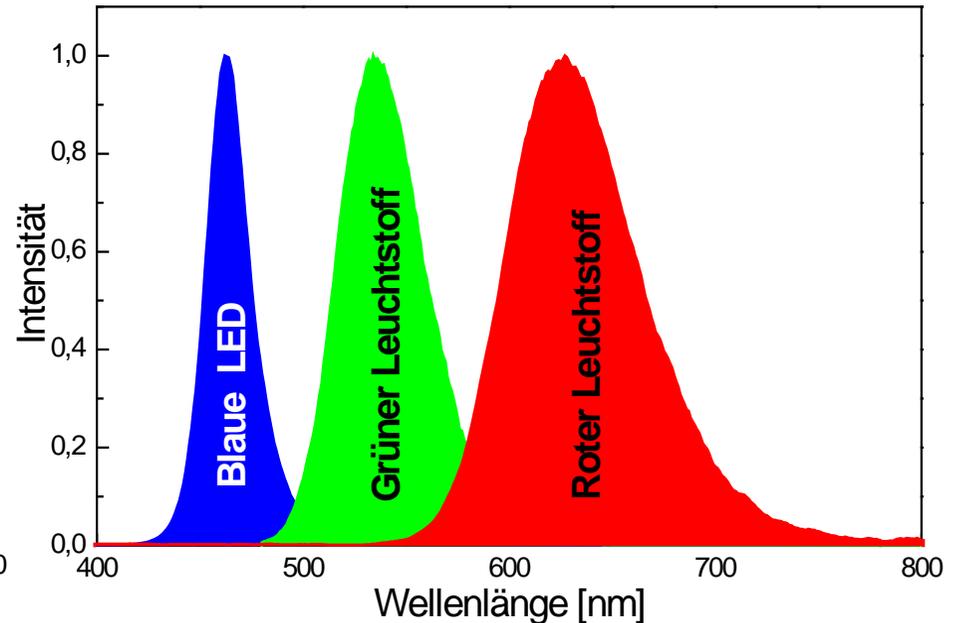
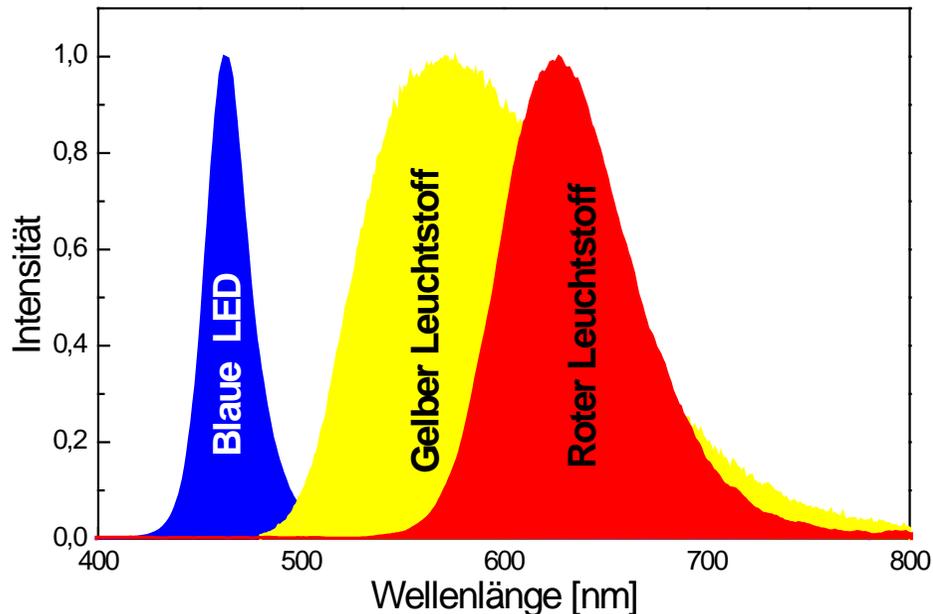
$\Rightarrow \text{CRI} > 75$ nur für $T_c > 4000 \text{ K}$

(2) Blaue LED + $(\text{Y,Gd})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ + Rot

$\Rightarrow \text{CRI} > 85$ für $T_c < 4000 \text{ K}$

(3) Blaue LED + Grün + Rot

$\Rightarrow \text{CRI} > 85$ für $2700 < T_c < 8000 \text{ K}$



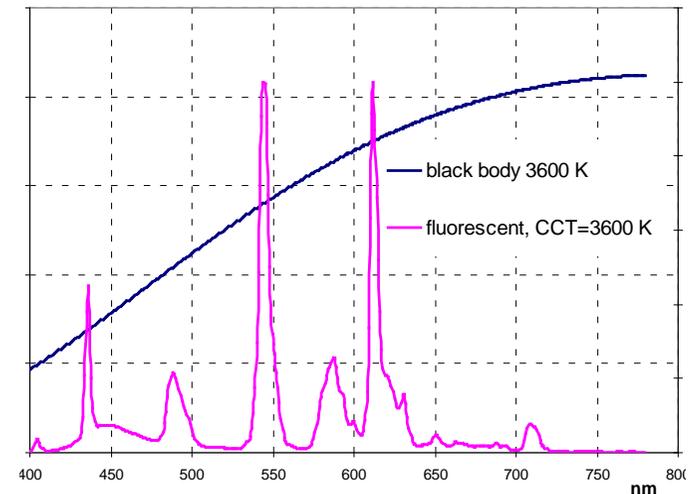
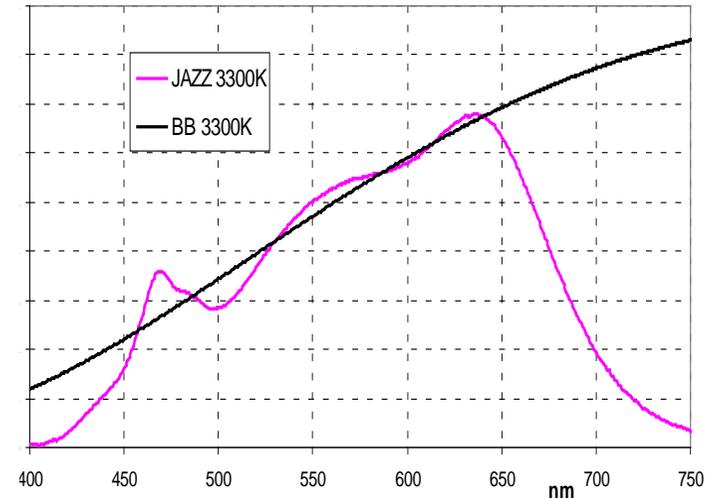
9.10 Weiße pcLEDs

Weiße pcLEDs mit hoher Farbwiedergabe

Lichtquellen für die Allgemeinbeleuchtung erfordern hohe Farbwiedergaben auch bei niedrigen Farbtemperaturen

Konzept (2)

- $(Y,Gd)_3Al_5O_{12}$ + Roter Leuchtstoff
- CRI = 85 - 95
- $T_c = 2800$ to 4000 K
- 1 – 5 W LEDs
- 100 – 150 lm/W



9.11 Probleme von Ce³⁺-Leuchtstoffen

Allgemeine Eigenschaften

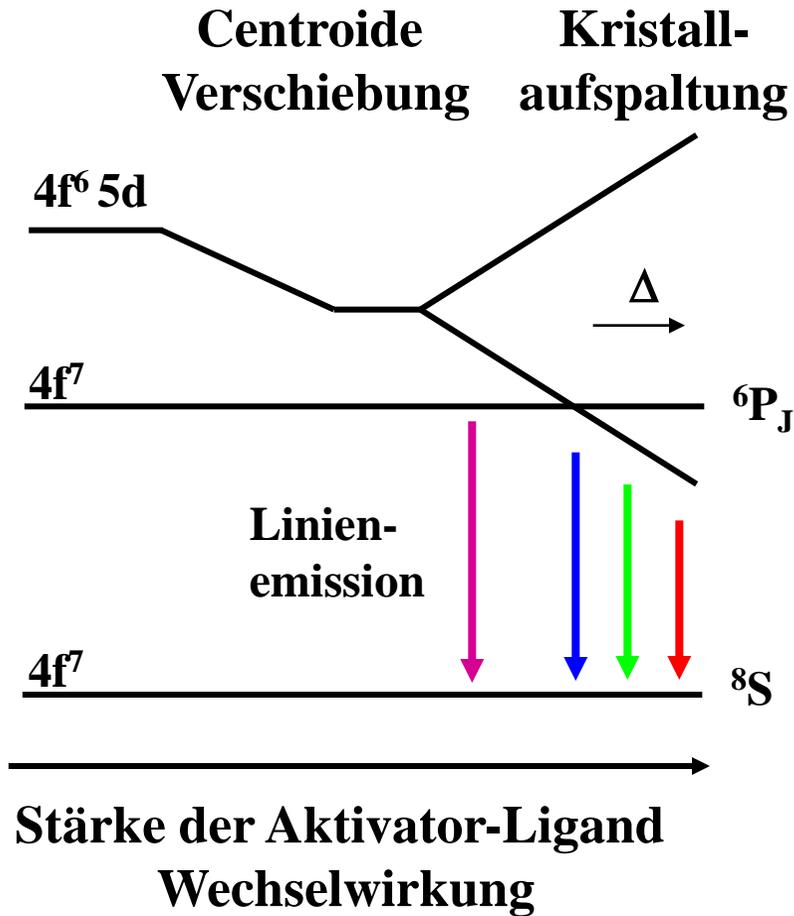
- Relativ schmale Absorptionsbanden
- Relativ breite Emissionsbande
- Keine bekannten Ce³⁺ Leuchtstoffe mit roter Emission und einer hohen thermischen Löschttemperatur!

Alternative Aktivatoren für rot emittierende Leuchtstoffe

Aktivator	Spektralbereich [nm]	Lumenäquivalent [lm/W _{opt}]	Abklingzeit τ	Effizienz	Absorption bei 450 nm
Eu²⁺	360 - 700	50 – 550	~ 1 μs	hoch	stark
Eu ³⁺	590 - 710	200 – 360	~ 1 ms	hoch	schwach
Sm ²⁺	670 - 770	< 100	~ 1 μ s	hoch	moderat
Sm ³⁺	560 - 710	240 – 260	0.5 ms	moderat	schwach
Pr ³⁺	590 - 680	100 – 220	0.1 ms	moderat - hoch	schwach
Mn ²⁺	500 - 650	100 - 550	5-15 ms	hoch	schwach
Mn ⁴⁺	620 - 680	80 – 230	1-10 ms	hoch	moderat
Cr ³⁺	680 - 750	< 100	1-10 ms	hoch	moderat
Fe ³⁺	> 700	< 50	5-15 ms	Medium	schwach

9.12 Eu^{2+} -Leuchtstoffe

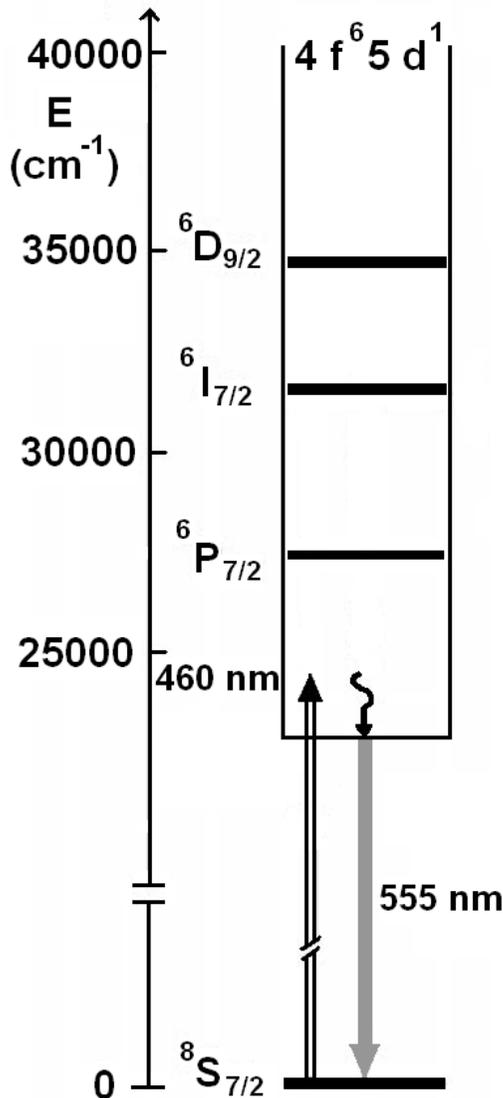
Vereinfachtes Termschema



Spektrale Position der dipol-erlaubten $5d^1 4f^6 \rightarrow 4f^7$ Emissions-bande wird bestimmt durch

- *Kristallfeldaufspaltung* der 5d-Niveaus
- *Centroide Verschiebung* reduziert den Energieabstand zwischen der $4f^7$ - und der $4f^6 5d^1$ -Konfiguration (nephelauxetischer Effekt)
- *Stokes Shift*

9.12 Eu²⁺-Leuchtstoffe



Eu ²⁺ Aktivierter Leuchtstoff	Emission max. [nm]
SrB ₄ O ₇ :Eu	368
BaSO ₄ :Eu	374
Sr ₂ P ₂ O ₇ :Eu	420
CaAl ₂ O ₄ :Eu	440
BaMgAl ₁₀ O ₁₇ :Eu	450
Sr ₂ MgSi ₂ O ₇ :Eu	467
SrAl ₄ O ₇ :Eu	473
SrSiAl ₂ O ₃ N:Eu	480
Sr ₄ Al ₁₄ O ₂₅ :Eu	490
BaSi ₂ N ₂ O ₂ :Eu	490
Ba ₂ SiO ₄ :Eu	505
SrAl ₂ O ₄ :Eu	520
SrGa ₂ S ₄ :Eu	535
SrSi ₂ N ₂ O ₂ :Eu	540
CaSi ₂ N ₂ O ₂ :Eu	565
Sr ₂ SiO ₄ :Eu	575
Ba ₂ Si ₅ N ₈ :Eu	585
SrS:Eu	610
Sr ₂ Si ₅ N ₈ :Eu	615
CaAlSiN ₃ :Eu	650
CaS:Eu	655
SrSiN ₂ :Eu	700

Centroide Verschiebung + Kristallfeldaufspaltung

9.12 Eu^{2+} -Leuchtstoffe

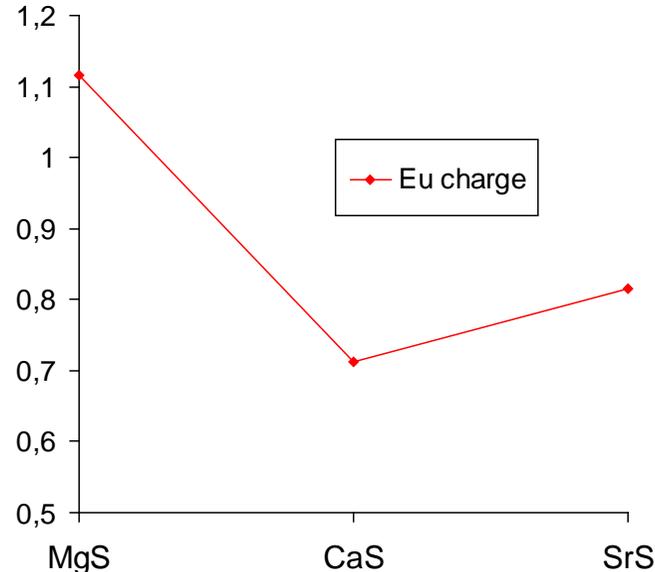
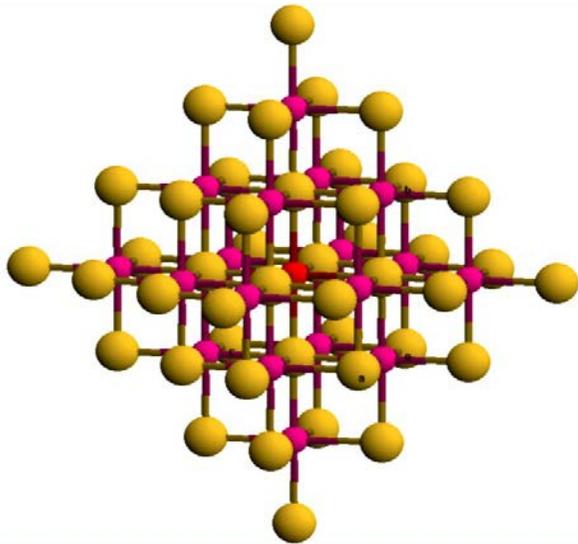
Bindende Wechselwirkung in MeS:Eu

- MgS:Eu $\lambda_{\text{em}} = 588 \text{ nm}$
- CaS:Eu $\lambda_{\text{em}} = 651 \text{ nm}$
- SrS:Eu $\lambda_{\text{em}} = 620 \text{ nm}$

↑
Stabilität,
Kristallfeld-
aufspaltung

↓
Kovalenz
zwischen
Eu und S

EHTB-MO Berechnungen an $\text{EuAE}_{18}\text{S}_{44}^{50-}$ Clustern (nach P.J. Schmidt)



**stärkste bindende Eu-S
Wechselwirkung bzw.
höchste Kovalenz in CaS**

9.13 Warmweiße pcLEDs

Leuchtstoffe für Konzept (2)

Gelb: 550 – 560 nm

Rot: 600 – 620 nm

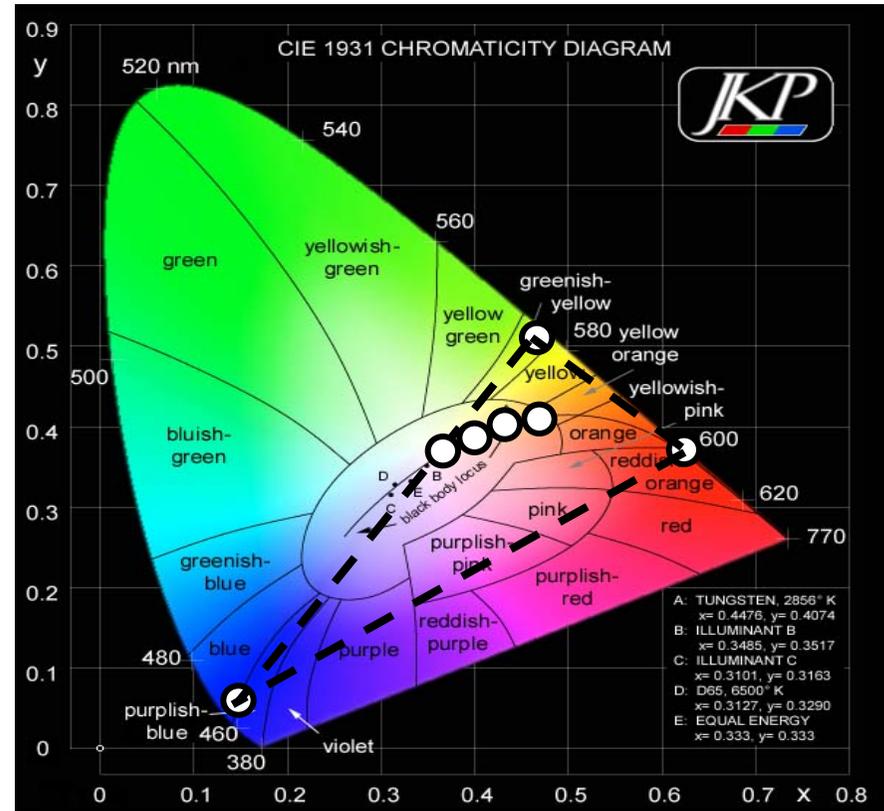
(Y,Gd)AG:Ce und (Ca,Sr)S:Eu

⇒ CRI > 85 für $T_c < 4000$ K

(Y,Gd)AG:Ce und (Ca,Sr,Ba)₂Si₅N₈:Eu
oder (Ca,Sr)AlSiN₃:Eu

⇒ CRI > 75 für $T_c = 2700 - 4000$ K

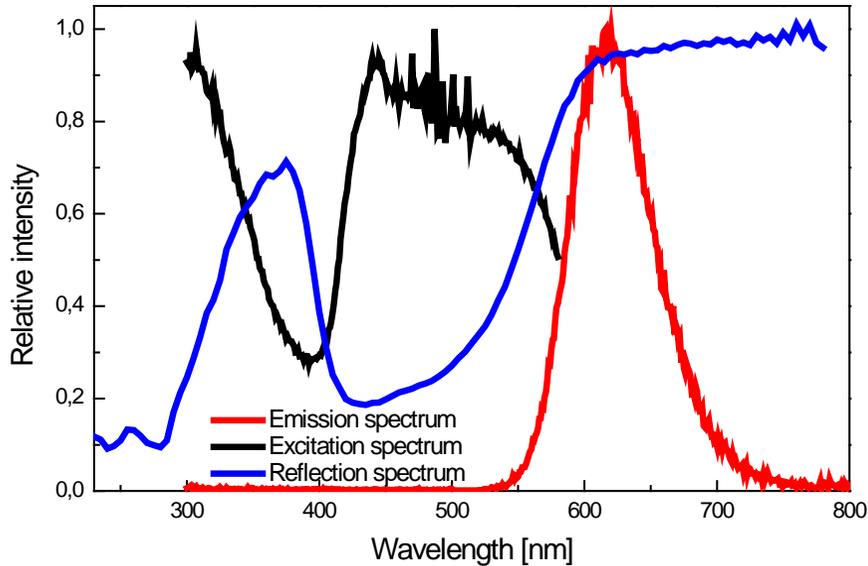
Produkte seit 2004 auf dem Markt



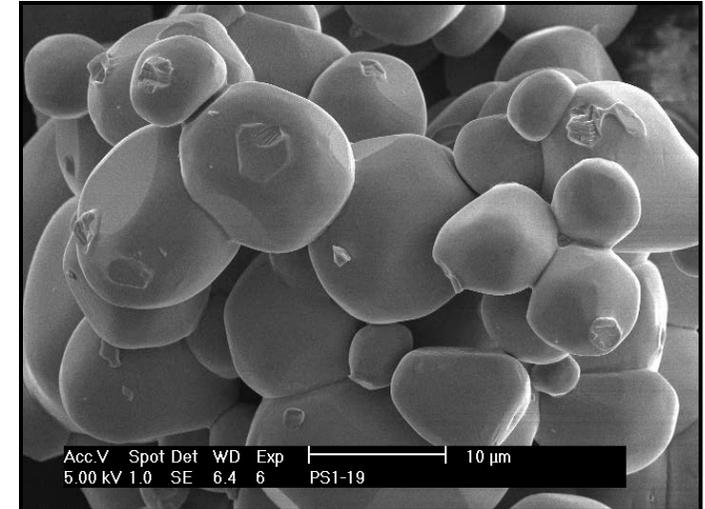
9.13 Warmweiße pcLEDs

Eigenschaften von (Sr,Ca)S:Eu

Lumineszenz- und Reflexionsspektren



Teilchenmorphologie



Quantenausbeute [%]

> 90

Lumenäquivalent [lm/W]

260 - 265

CIE1931 Farbpunkt x,y

0.629 0.370

Hydrolyse von SrS:



Oxidation von SrS:



Lösung: Teilchenbeschichtungen (Particle coatings) oder Reduktion der Basizität

9.13 Warmweiße pcLEDs

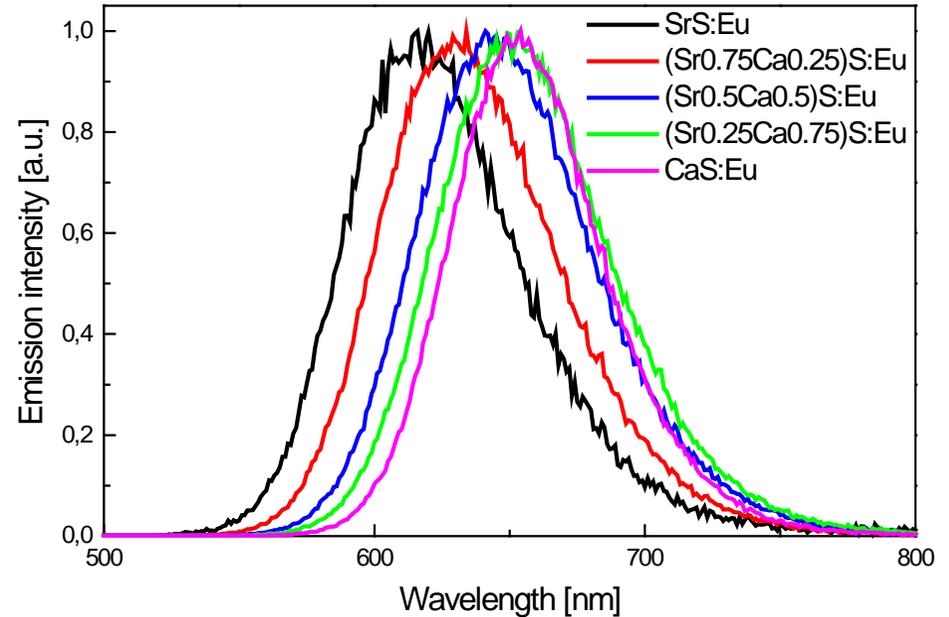
Verbesserung der Stabilität von SrS:Eu

1. Reduktion der Basizität des Wirtsgitters von (Ca,Sr)S (Elektronendichte auf den Anionen):

Ersatz von Sr durch Ca

⇒ **Rotverschiebung der Emissionsbande**

⇒ **Reduktion im Lumenäquivalent**



2. Reduktion der Hydrolyseempfindlichkeit:

Anwendung einer Teilchenbeschichtung, d.h. Verkapselung der Partikel mit einem diffusionsdichten Material (SiO₂, Al₂O₃, MgO, MgAl₂O₄, LnPO₄, ...)

9.13 Warmweiße pcLEDs

Verbesserung der Stabilität von SrS:Eu



SrS:Eu

Stabilität

CaS:Eu

Kristallfeldaufspaltung

Zentroide Verschiebung

9.14 Nitridische Leuchtstoffe

Vorteile gegenüber Oxiden und Sulfiden

- Hochkondensierte anionische Netzwerke
⇒ hohe Dichte, hohe chemische Stabilität, hohe Härte, hohe thermische Löschttemperatur
- Hohe Ladungsdichte zwischen dem Aktivator und den Anionen:
Oxides < Oxynitrides < Nitride < Nitridocarbide
⇒ starke Rotverschiebung der Emissionsbande

	Si	X = O ²⁻	X = N ³⁻	X = C ⁴⁻
r [pm]	26	138	146	160
Elektronegativität χ	1.92	3.61	3.07	2.54
Ionenbindungsanteil Si-X [%]	-	51	28	9

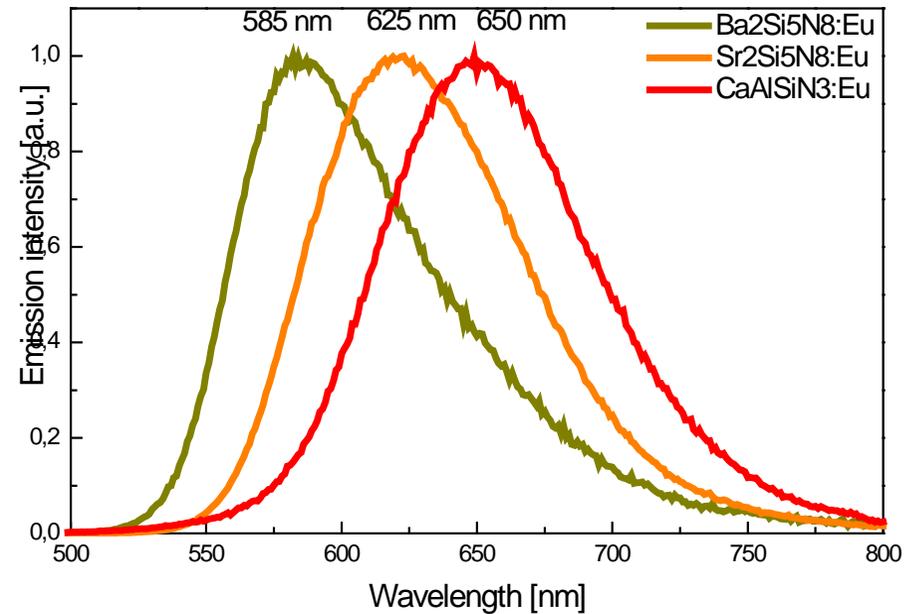
Beispiel: $\text{Eu}_2\text{Si}_5\text{N}_8$ (640 nm) (*W. Schnick et al., Acta Cryst. C 53 (1997) 1751*)

9.14 Nitridische Leuchtstoffe

Zusammensetzung und Emissionsspektren kommerzieller Materialien

$(\text{Ba,Sr,Ca})_2\text{Si}_5\text{N}_8:\text{Eu}$ 580 – 625 nm

$(\text{Ca,Sr})\text{AlSiN}_3:\text{Eu,O}$ 630 – 650 nm



9.14 Nitridische Leuchtstoffe

Synthese nitridischer Leuchtstoffe

CaSiN₂:Eu ($\lambda_{em} = 620 \text{ nm}$)

Lee et al., J. SID Supplement-1 (2000) 137

Ca₃N₂ + Si₃N₄ + EuF₃ at 1400 °C (H₂/N₂)

LaSi₃N₅:Eu,O ($\lambda_{em} = 549 \text{ nm}$) und **LaEuSi₂N₃O₂** ($\lambda_{em} = 650 \text{ nm}$)

Uheda et al., J. Lumin. 87 (2000) 967

LaN + Si₃N₄ + Eu₂O₃ at 1900 °C (10 atm N₂)

AE₂Si₅N₈:Eu (AE = Ca, Sr, Ba) ($\lambda_{em} = 615 \text{ nm}$)

Schnick et al., Z. Anorg. Allg. Chem. 621 (1995) 1380

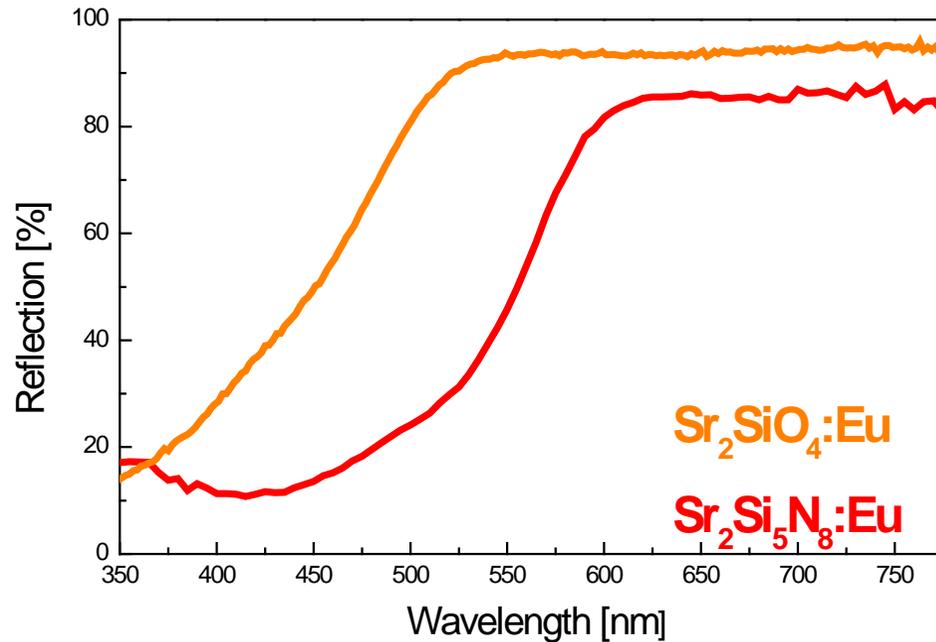
2 Sr/Eu + 5 Si(NH)₂ → Sr₂Si₅N₈:Eu + N₂ + 5 H₂

(1650 °C, rf furnace, N₂)

Probleme: Empfindliche Edukte, hoher Druck und hohe Synthesetemperaturen

9.14 Nitridische Leuchtstoffe

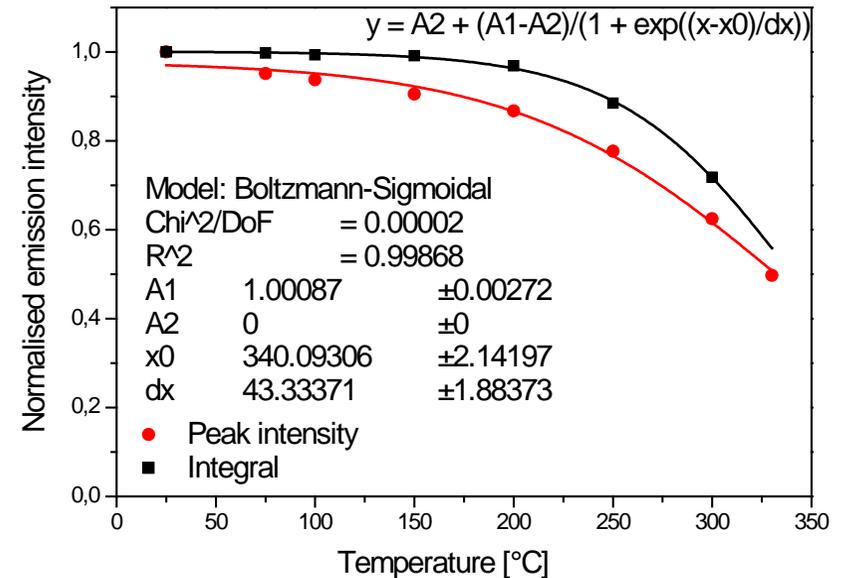
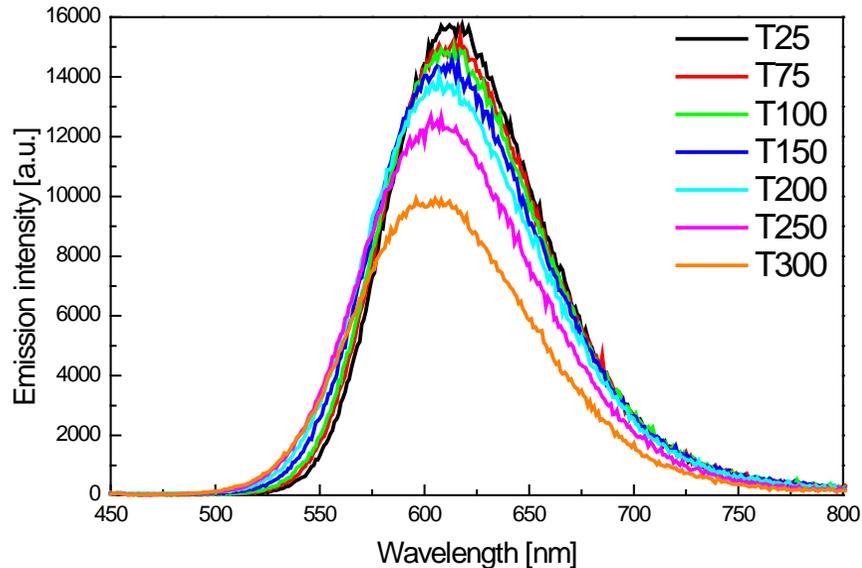
Optische Eigenschaften von $\text{Sr}_2\text{Si}_5\text{N}_8:\text{Eu}$



Komposition	Körperfarbe	Emissionsbande	Stabilität
$\text{Sr}_2\text{SiO}_4:\text{Eu}$	gelb	575 nm	Zersetzung in H_2O
$\text{Ba}_2\text{Si}_5\text{N}_8:\text{Eu}$	orange	580 nm	Zersetzung in konz. Säuren
$\text{Sr}_2\text{Si}_5\text{N}_8:\text{Eu}$	orange-rot	615 nm	Zersetzung in konz. Säuren

9.14 Nitridische Leuchtstoffe

Thermische Löschung am Beispiel von $\text{Sr}_2\text{Si}_5\text{N}_8:\text{Eu}$



- Hohe Absorptionsstärke zwischen 200 und 500 nm
- Quantenausbeute > 90% bei 450 nm Anregung
- Hohe thermische Löschtemperatur $TQ_{1/2}$ = Temperatur, bei der die Lichtausbeute um die Hälfte reduziert ist
- Blauverschiebung durch T-Erhöhung (thermische Ausdehnung des Gitters)

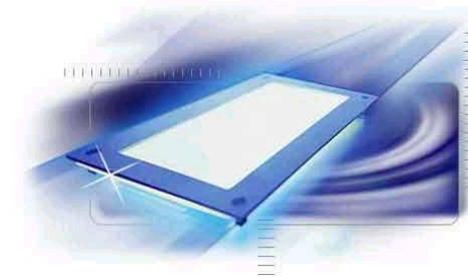
9.15 Anwendungen anorganischer LEDs

Stärken anorganischer LEDs

- Lebensdauer > 20000 h
- Dimmbarkeit
- geringer Bautiefe
- hohe T-Stabilität
- schnelle Schaltzyklen
- niedrige Spannung ~ 4 V
- beliebige Farbtemperatur
- Robustheit

Noch zu lösende Probleme

- Lumenstrom pro LED ↑
- Farbpunktstabilität ↑
- Preis pro Lumen ↓
- Thermisches Management ↑



Zeitliche Entwicklung

Taschenlampen

Signalbeleuchtung

Lichtkacheln

Spotbeleuchtung

Konturbeleuchtung

Hintergrundbeleuchtung

Automobilbeleuchtung

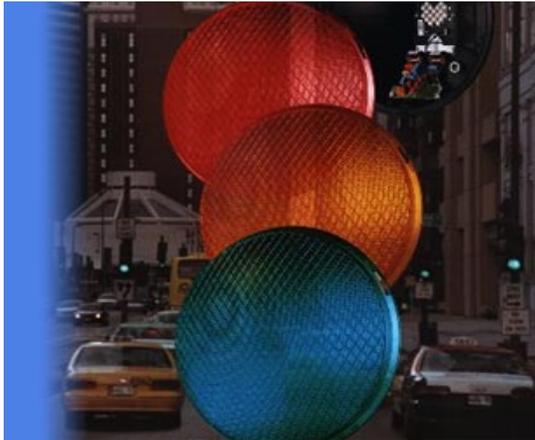
Innenraumbeleuchtung

Allgemeinbeleuchtung

Straßenbeleuchtung



9.15 Anwendungen anorganischer LEDs



- **Signalanlagen**
 - Ampeln
 - Flugfeldbeleuchtung

- **Automobilbeleuchtung**
 - Rückleuchten
 - Bremsleuchten
 - Armaturenbeleuchtung
 - Abblend-/Fernlicht
 - Standlicht



- **Hintergrundbeleuchtung**
 - LCD Bildschirme
 - Mobiltelefone

- **LED Bildschirme**
 - Anzeigetafeln
 - Reklametafeln
 - Videowände

01	13162-000	100.9	ABCD12345678
02	17119	71.3	ABCD12345678
04	13821-00	160.0	WAIT MTL 34.7
05	78546-1D	75.3	SETUP 1.4
06	FAMILY	240.0	NO OPER 6.8
	54650/GF-F		NO OPER 6.8
07	14176-W	60.0	NO OPER 0.7
08	54558A-W	72.0	NO OPER 6.7
09	15078	72.0	TOOLPROB 5.7
10	E52205	32.7	ABCD12345678
11	400948	152.6	ABCD12345678
12	4501T-W	42.1	ABCD12345678
14	19700	108.0	ABCD12345678
15	4501N	39.7	ABCD12345678
16	51819-59	60.0	IDLE 11.9



9.15 Anwendungen anorganischer LEDs

“Color on Demand”

Blaue (In,Ga)N LED (420 – 480 nm)

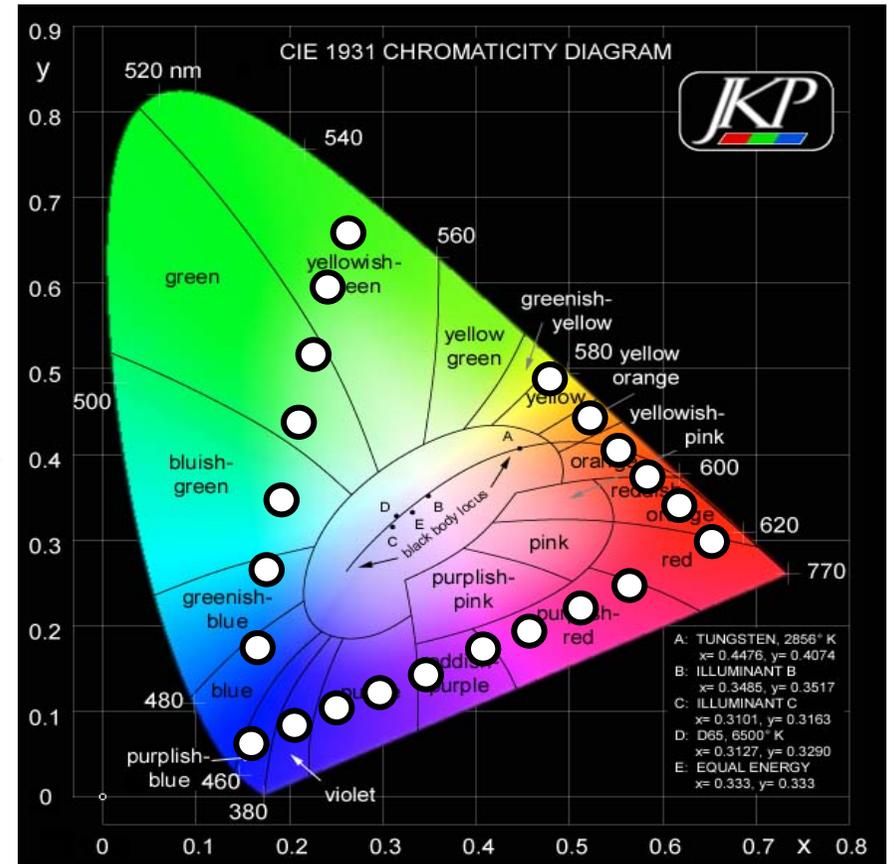
+ Leuchtstoffschicht

Beispiele

- **Magenta: Blaue LED + roter Leuchtstoff**
- **Cyan: Blaue LED + grüner Leuchtstoff**

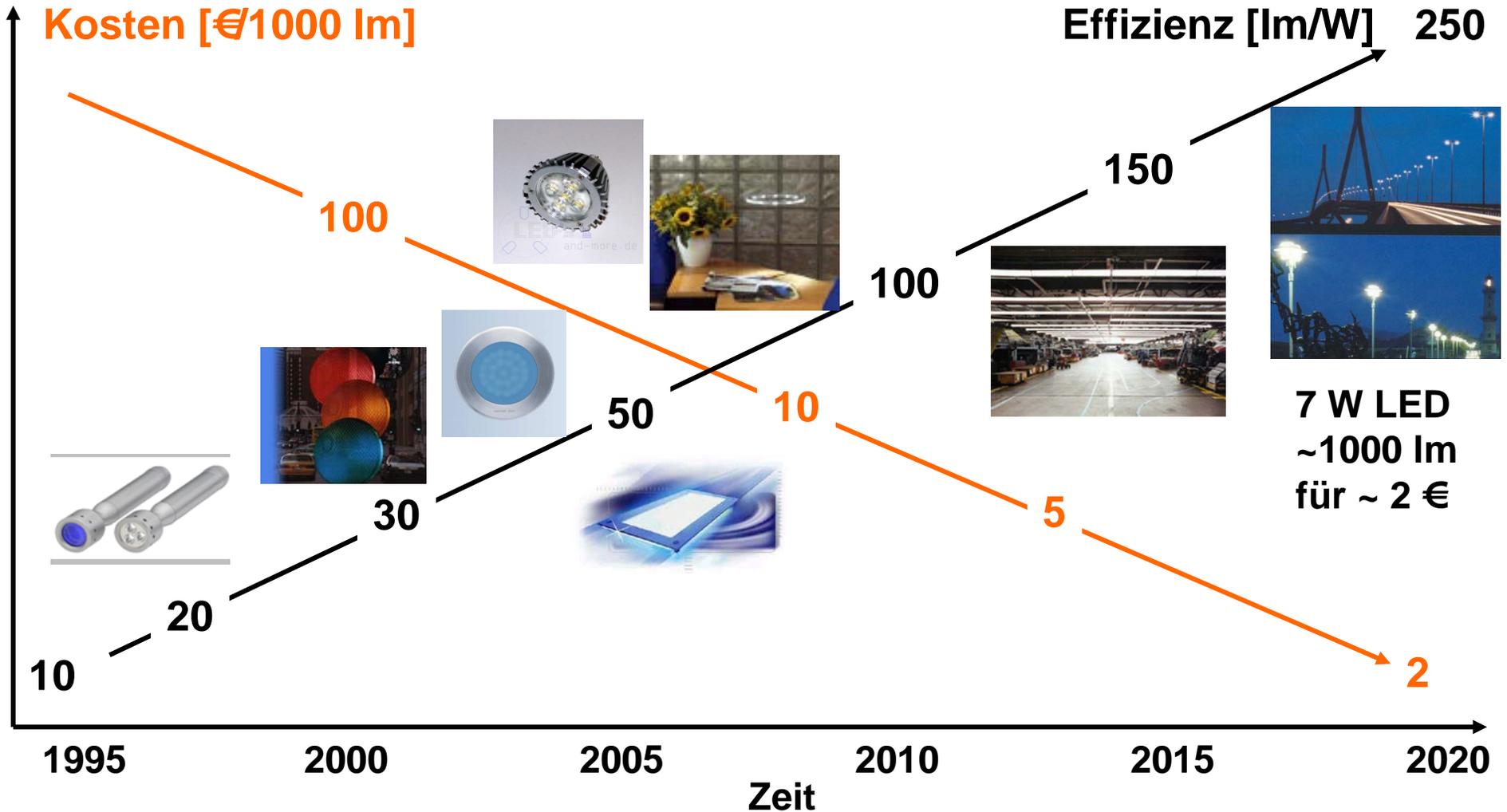
Anwendung in

- **Firmenlogos**
- **Signalanlagen**
- **Effektbeleuchtung**
- **Werbebeleuchtung**



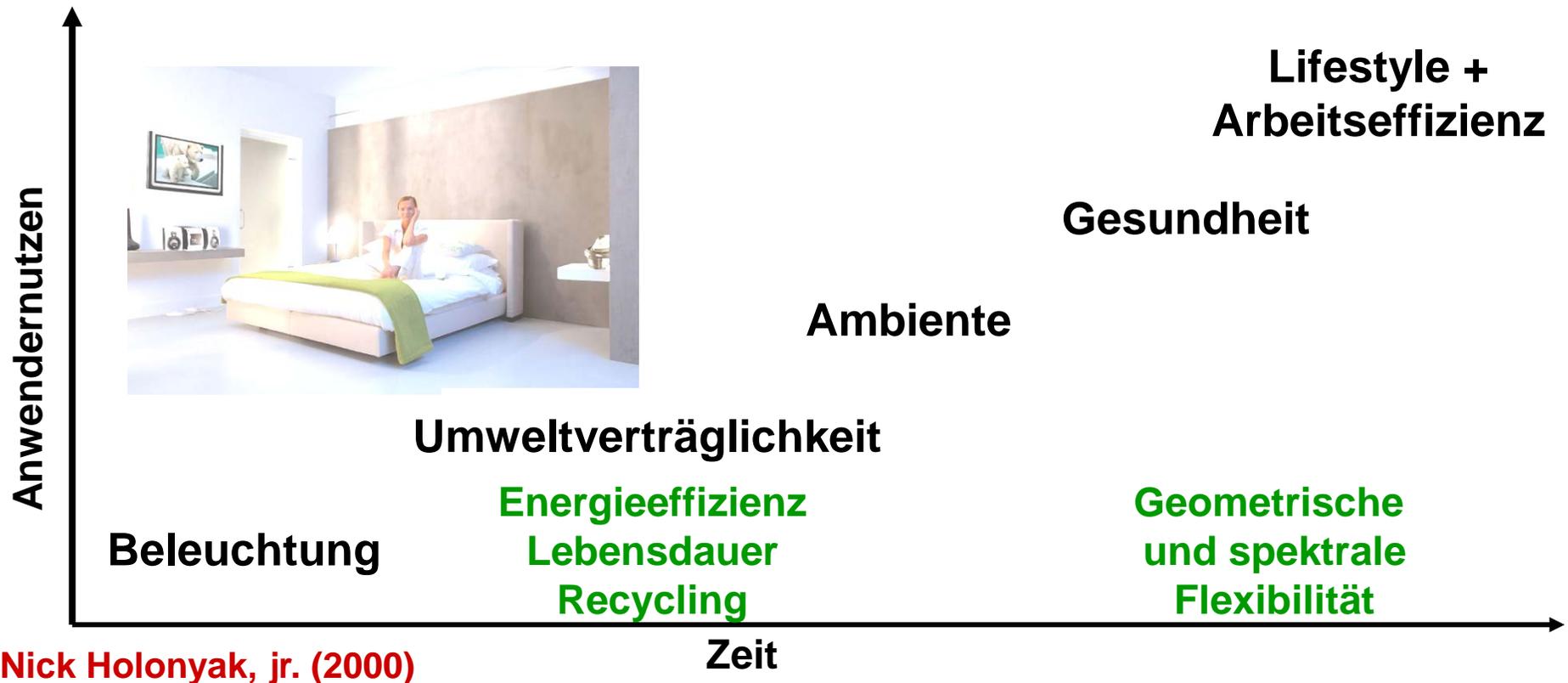
9.16. Die Zukunft der LED

Preisentwicklung



9.16. Die Zukunft der LED

Trends im Lichtquellenmarkt



Nick Holonyak, jr. (2000)

Es ist überlebenswichtig zu realisieren, dass die Leuchtstoff LED die ultimative Lichtquelle im Hinblick auf das Prinzip der Lichterzeugung und den Möglichkeiten der Anwendung ist und ihre Entwicklung solange fortschreiten wird bis ihre Effizienz und Lichtausbeute die aller anderen Lichtquellen übertreffen wird.

9.16. Die Zukunft der LED

(In,Ga)N LEDs und Laserdioden mit erweiterter Funktionalität

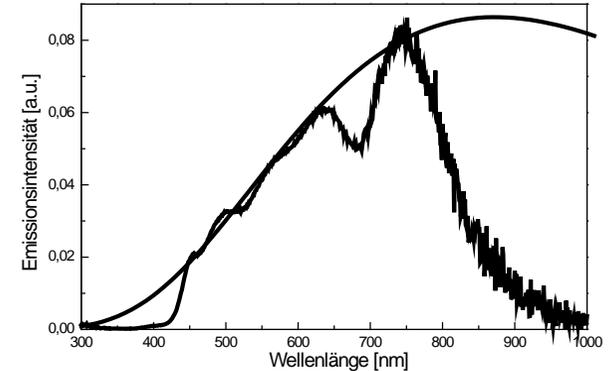
1. Physiologische Wirkungen

Vollspektrumlichtquellen: 300 – 1000 nm

Melatoninsuppression: 420 nm

Kollagenaufbau: 800 - 850 nm

Durchblutungstimulation: 700 - 1000 nm



2. Spektroskopische/Sensorische Funktionen

IR-Spektroskopie

NIR Emission + up-Konversion reflekt. Strahlung

3. Datenübertragung

Lokale NIR Netzwerke

ns-Leuchtstoffe

700 – 3000 nm

