

6 Lumineszenzdioden

Überblick

- Halbleiterstrahlungsquellen
- Design von LEDs
 - Wirkungsgrade
- LED Strukturen
- Abstrahlcharakteristik
- Einkopplung in die Glasfaser
- LEDs für verschiedene Wellenlängen
- Weiße LEDs
- Bauformen
- Device Performance und Datenblätter
- Herstellung von optoelektronischen Bauelementen
- Anwendungen
- Zuverlässigkeit

Inkohärente* Halbleiterstrahlungsquellen

- Begriffe:
 - LED: Light Emitting Diode (sichtbares - blaues Licht)
 - IRED: Infrared Light Emitting Diode (IR-Licht)
 - Superradiant LEDs: Ausgangsleistung vergleichbar mit Halbleiter-Lasern
 - OLED: Organic Light Emitting Diode, LED basierend auf organischen Materialien
- Lumineszenzprinzip
 - Lichterzeugung durch (elektrisch) induzierte Ladungsträger

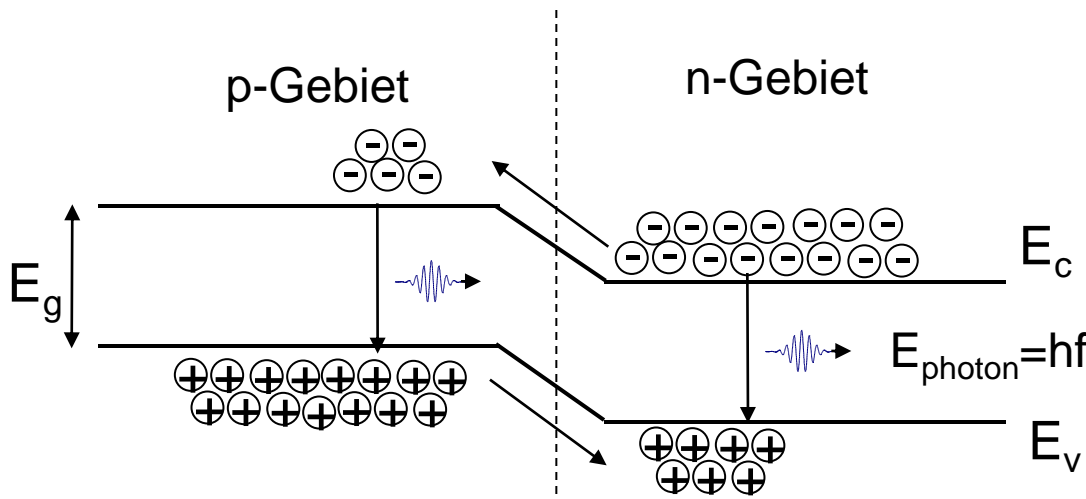
*für Halbleiterlaser → Kapitel 7

Light Emitting Diode

- Positive Eigenschaften
 - einfacher als Halbleiterlaser
 - geringe Herstellungskosten
 - einfache Treiberelektronik
 - Zuverlässiger (da geringerer Betriebsstrom)
 - Lineare Strom-/ Ausgangsleistungs-Charakteristik (wichtig für Modulation analoger Signale)
 - Weniger T-Abhängig als Laser
- Nachteile
 - niedrige Ausgangsleistungen
 - multimodale Strahlung (hohe Linienbreite)
 - geringere Modulationsbandbreite

Lumineszenz am pn-Übergang

Nichtgleichgewicht am pn-Übergang unter Vorspannung



Konzentration der Minoritäts-Ladungsträger p außerhalb der Sperrzone, n ähnlich:

$$p(x) - p_{N,0} = p_{N,0} \left(e^{\frac{qU}{k_B T}} - 1 \right) e^{-\frac{x}{L_h}}$$

$$L_h = \sqrt{D_h \tau_h}$$

$$\rightarrow pn \gg n_i^2$$

Rekombination der Ladungsträger

- strahlend
- nichtstrahlend
- > Rate der Rekombination proportional dem Diodenstrom

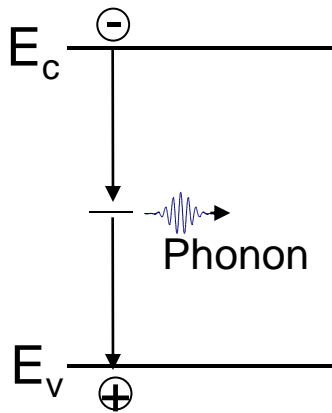
Interner Quantenwirkungsgrad η_{sr} :

$$\eta_{sr} = \frac{R_s}{G} < 1$$

G: Rate der Ladungsträgerinjektion
 R_s: Rate der strahlenden Rekombination

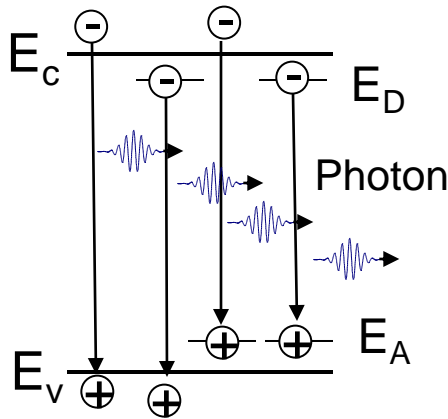
Rekombinationsmechanismen

Zwischenniveau



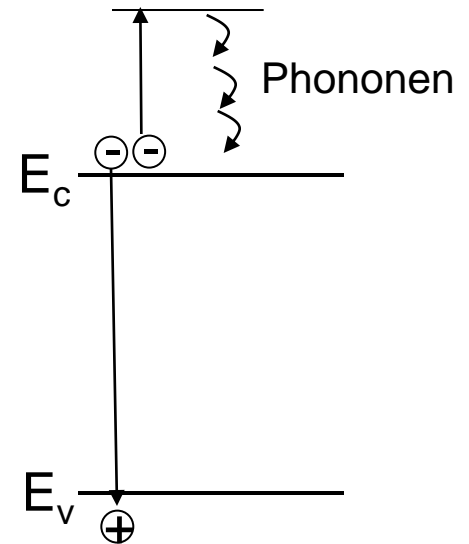
nichtstrahlend

Band-Band & Donator/Akzeptor



strahlend

Augerprozess



nichtstrahlend

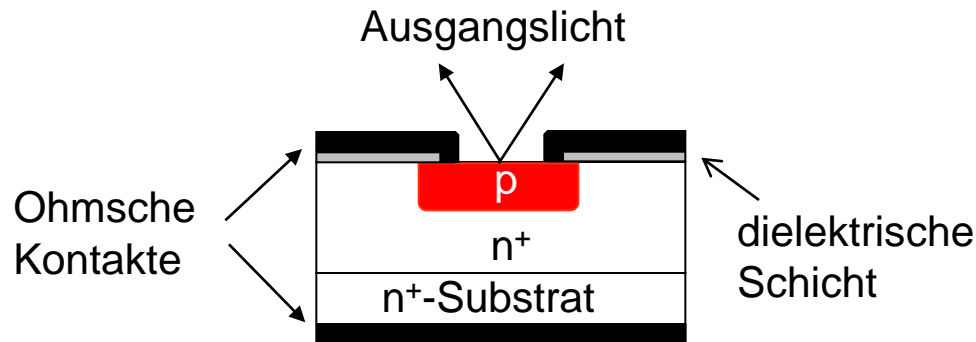
Halbleitermaterialien für LEDs

- Auswahlkriterien:
 - Spektrale Eigenschaften (Emissionswellenlänge definiert durch Bandlückenenergie)
 - Wirkungsgrad der Lichterzeugung
 - Technologische Beherrschbarkeit

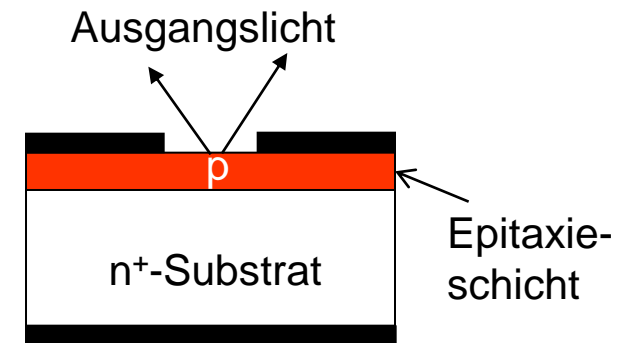
Design von Lumineszenzdioden: Wirkungsgrad

Typische Oberflächenemitter („planare“ LED)

Hergestellt durch Diffusion



Hergestellt durch Epitaxie



Prozesse der Strahlungserzeugung in der LED:

1. Anregung/Injektion von Ladungsträgern
2. strahlende Rekombination der Ladungsträger
3. Auskoppelung des Lichts

Definition des Wirkungsgrads

$$\eta_{\text{total}} = \eta_0 = \eta_{\text{in}} \eta_{\text{sr}} \eta_e$$

Wirkungsgrad der Injektion von Ladungsträgern

$$\eta_{in} = \frac{J_e}{J_e + J_h}$$

$$\eta_{in} = \left(1 + \frac{\mu_h N_A L_e}{\mu_e N_D L_h} \right)^{-1}$$

$$\mu_e \gg \mu_h$$

$$L_e \approx L_h$$

Strom durch Ladungsträger durch pn-Übergang

$$J_e = J_e^{n \rightarrow p} - J_e^{p \rightarrow n}$$

$$J_h = J_h^{p \rightarrow n} - J_h^{n \rightarrow p}$$

Beweglichkeiten der Elektronen und Löcher

$$\mu_e, \mu_h$$

Diffusionslängen: L_e, L_h
 Dotierungsdichten: N_D, N_A

asymmetrischer
 pn-Übergang:
 $N_D \gg N_A$

$$\Rightarrow \eta_{in} \approx 1$$

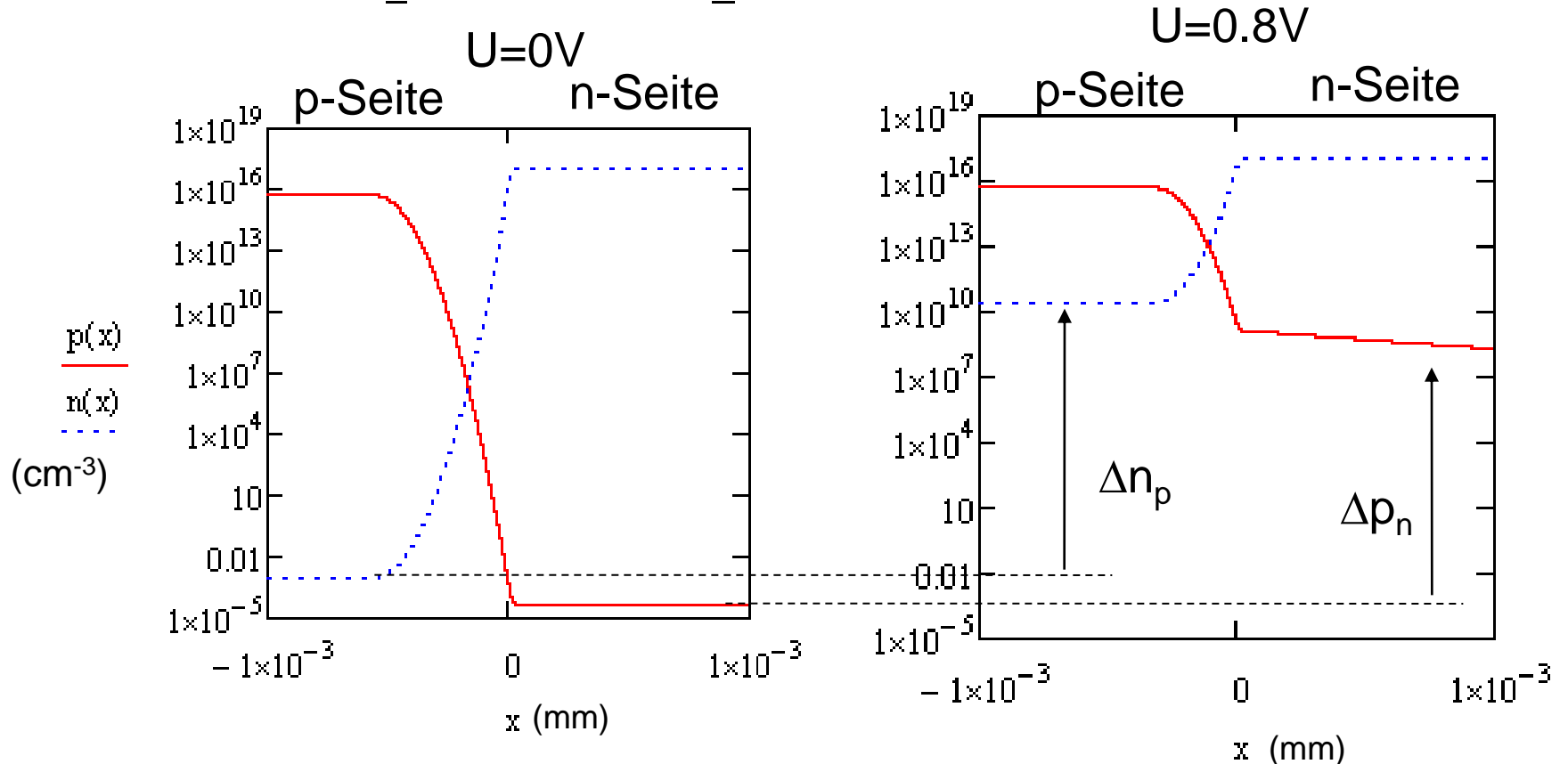
$$\text{GaAs: } \eta_{in} \approx 0,8$$

$$\text{GaP: } \eta_{in} \approx 0,6..0,8$$

$$\longrightarrow \eta_{total} \approx 1 \eta_{sr} \eta_e$$

Ladungsträgerverteilung im asymmetrischen pn-Übergang

GaAs ($N_A=5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ $N_D=1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$)



thermisches Gleichgewicht: $np=n_i^2$

Ladungsträgerinjektion: $np \gg n_i^2$
(„Minoritätsladungsträgerinjektion“)

Wirkungsgrad der strahlenden Rekombination

Definition „innerer Quantenwirkungsgrad“

$$\eta_i = \eta_{sr} = \frac{N_{\text{Photons}}}{N_{\text{carriers}}}$$

$$\eta_{sr} = \frac{R_s}{R_s + R_{ns}}$$

Nichtstrahlende Rekombinationen:

- über tiefe Störstellen
- Augerprozesse
- über Oberflächenzustände

Es gilt:

$\eta_{sr} \rightarrow 1$, wenn $R_{ns} \downarrow$

Direkte Halbleiter

Homoübergang: $\eta_{sr} \approx 0,5$

Heteroübergänge: $\eta_{sr} \approx 0,6..0,8$

Indirekte Halbleiter $\eta_{sr} \lll 1$

Rekombination

gebundener Exzitonen:

GaP: Zn, O $\eta_{sr} \approx 0,3$

GaP: N $\eta_{sr} \approx 0,03$

Wirkungsgrad der Lichtauskopplung I

$$\eta_e = \frac{N_{\text{Photons/extracted}}}{N_{\text{Photons/generated}}}$$

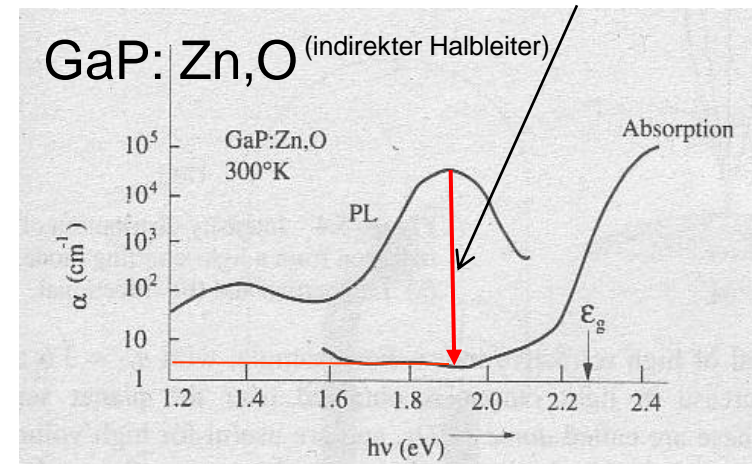
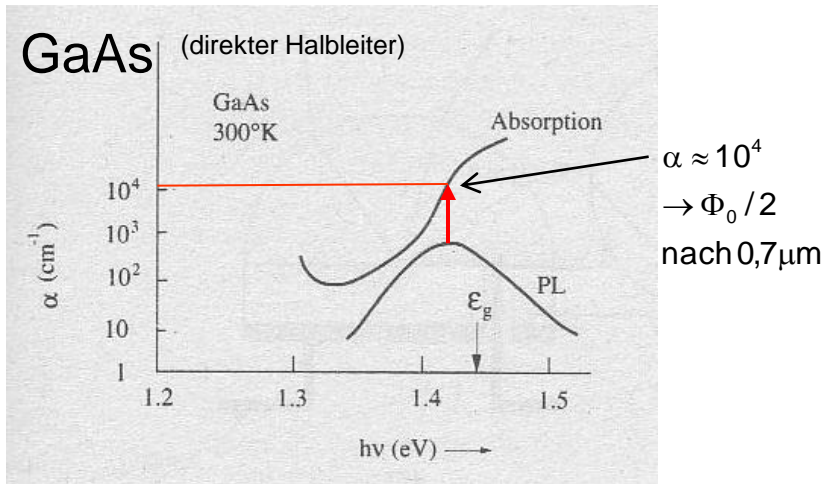
Probleme:

- Absorption der Photonen im Halbleiter
- Abstrahlgeometrie der LED

1. Absorption der Photonen im Halbleiter

Absorption: $\Phi(x) = \Phi_0 e^{-\alpha x}$

$\alpha \approx 3 / \text{cm}$
 $\rightarrow \Phi_0 / 2$
 nach 2mm



→ direkter HL: möglichst dünne Schichten und oberflächennah;
 aber nichtstrahlende Oberflächenrekombination beachten

Wirkungsgrad der Lichtauskopplung II

2. Abstrahlgeometrie und hoher Brechungsindex des Halbleitermaterials

typischer Brechungsindex: $n^* = 3,5$

Kritischer Winkel der Totalreflektion an der Grenzfläche Halbleiter/Luft

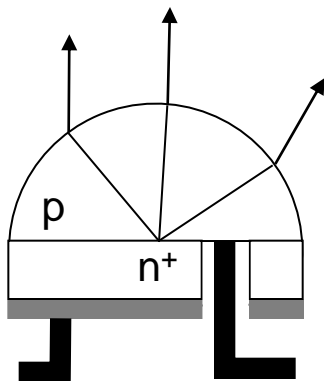
$$\alpha_g = \arcsin\left(\frac{n^*_2}{n^*_1}\right)$$

$$n^*_2 (\text{Luft}) = 1$$

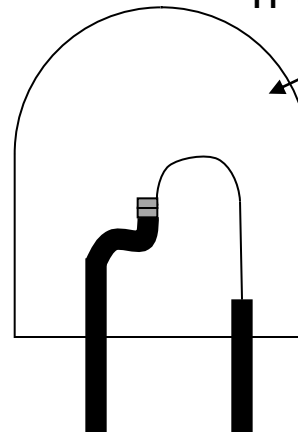
$$\alpha_g \approx 16^\circ$$

Besondere Geometrie der Komponenten

sphärische p-Schicht



Kapsel (transparent, $n^* = 1,5$)



5-fache Auskoppel-Effizienz

„Dome“-LEDs

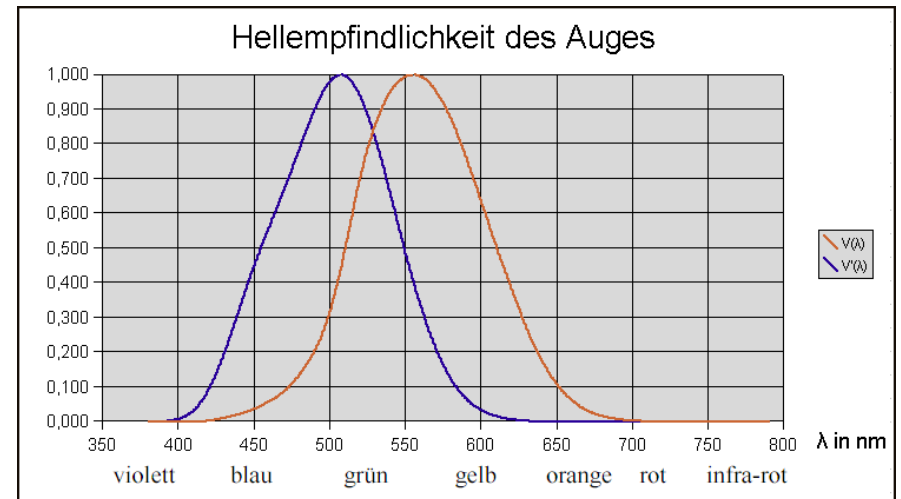


„Physiologischer“ Wirkungsgrad Leuchtwirkungsgrad

Wirkungsgrad in photometrischen Einheiten (lm/W)
Empfindlichkeit des Auges

$$\Phi_V = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} V(\lambda) \Phi_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda$$

$$\eta_L = \frac{\Phi_V}{\int \Phi_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda} = \frac{\Phi_V}{\Phi_e}$$



→ Grüne, gelbe LEDs erscheinen dem menschlichen Auge heller als rote oder blaue bei gleicher Strahlungsleistung Φ_e

Zusammenfassung Wirkungsgrad Responsivität, Lichtausbeute

für sichtbares Licht:

Totaler externer Wirkungsgrad:

$$\eta_0 = \eta_{in} \eta_{sr} \eta_e$$

$$\eta_0 = \eta_{in} \eta_{sr} \eta_e \eta_L$$

Externer Leistungswirkungsgrad

$$\eta_P = \frac{\Phi_e}{P_e}$$

P_e : elektrische Leistung

Externer Wirkungsgrad

vs.

Leistungswirkungsgrad

$$\eta_{ex,Q} = \frac{N_{\text{Photonen}}}{i} = \eta_0$$

i : Anzahl der e- pro s

$$\eta_P = \frac{\Phi_e}{P_e} = 1,24 \eta_0 \frac{1}{\lambda [\mu\text{m}]} \frac{1}{U [\text{V}]}$$

Responsivität
(Ansprechvermögen):

$$\mathcal{R} = \frac{\Phi_e}{I} = \frac{N_{\text{Phot}} hf}{ie} = \eta_0 \frac{hf}{e} = \eta_0 \frac{1,24 \mu\text{m}}{\lambda} \left[\frac{\text{W}}{\text{A}} \right]$$

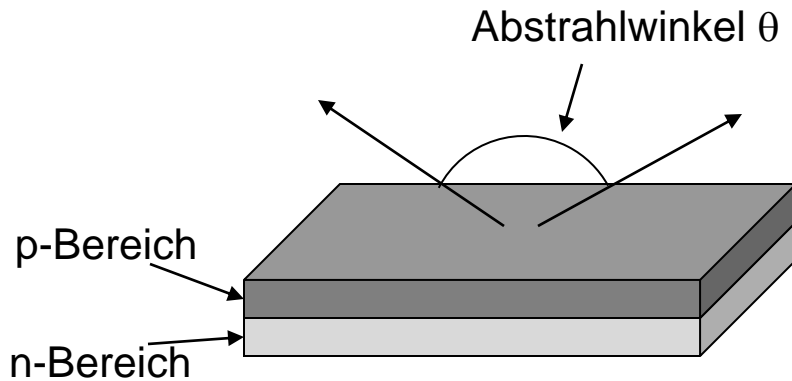
Lichtausbeute:

$$\eta_V = \frac{\Phi_V}{P_e} = \frac{\Phi_V}{\Phi_e} \frac{\Phi_e}{P_e} = \eta_L \eta_P \left[\frac{\text{lm}}{\text{W}} \right]$$

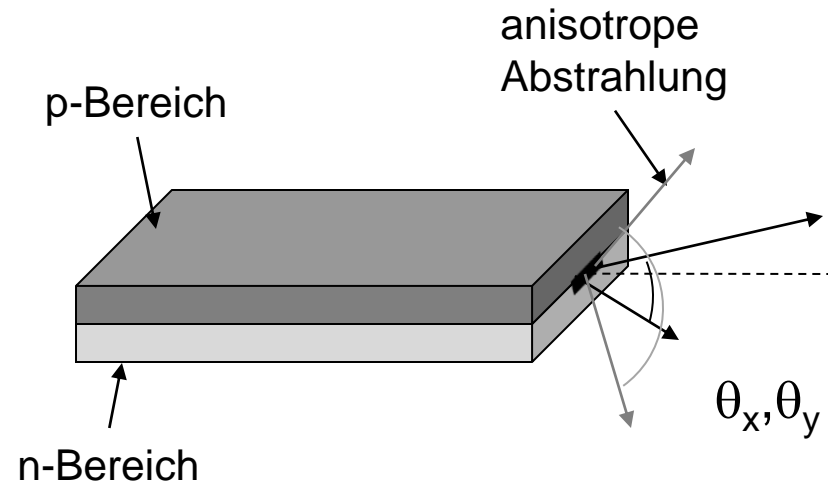
LED Strukturen

- Homoübergang
- Heteroübergang

Oberflächenemitter



Kantenemitter

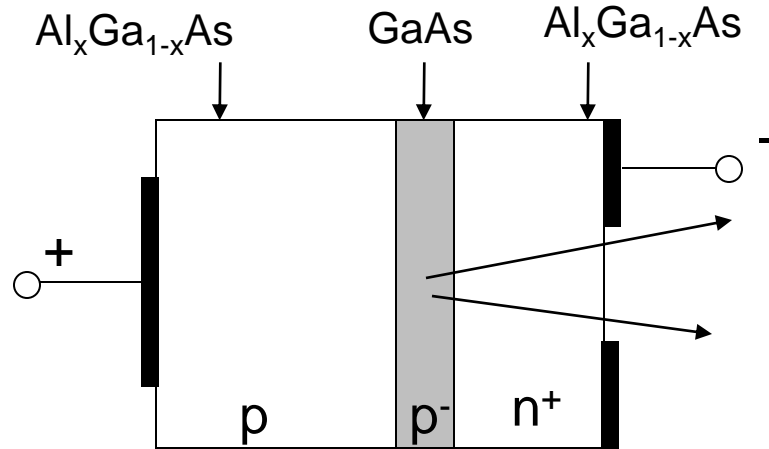


Heterostrukturen

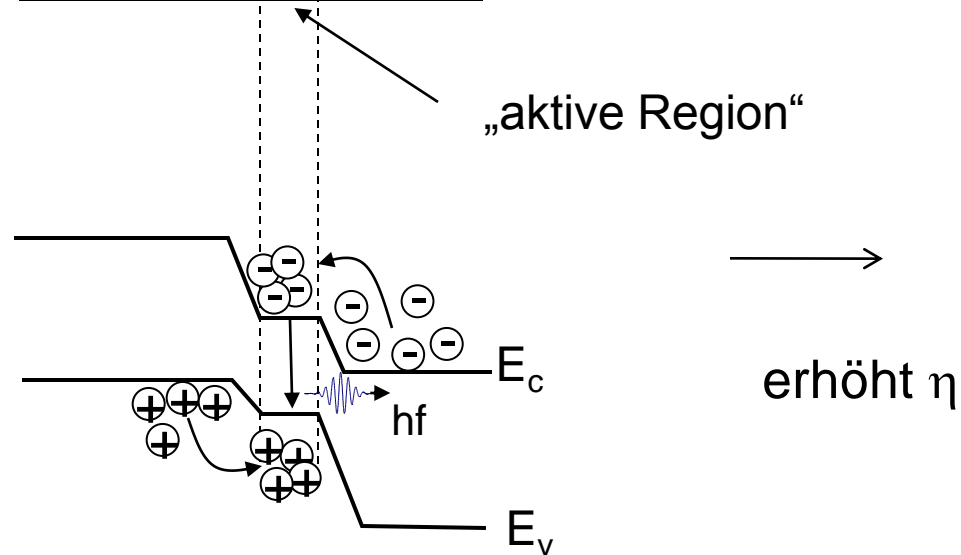
Typische
Doppel-Heterostruktur

(Oberflächenemitter)

Aufbau

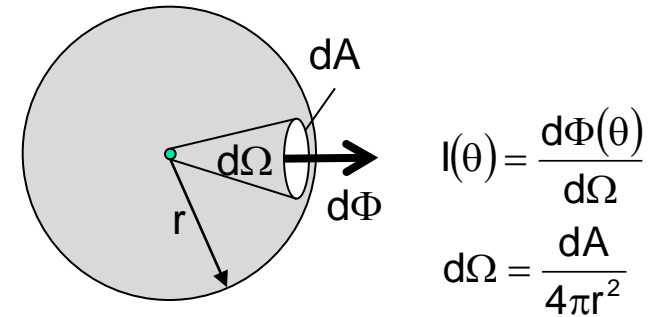
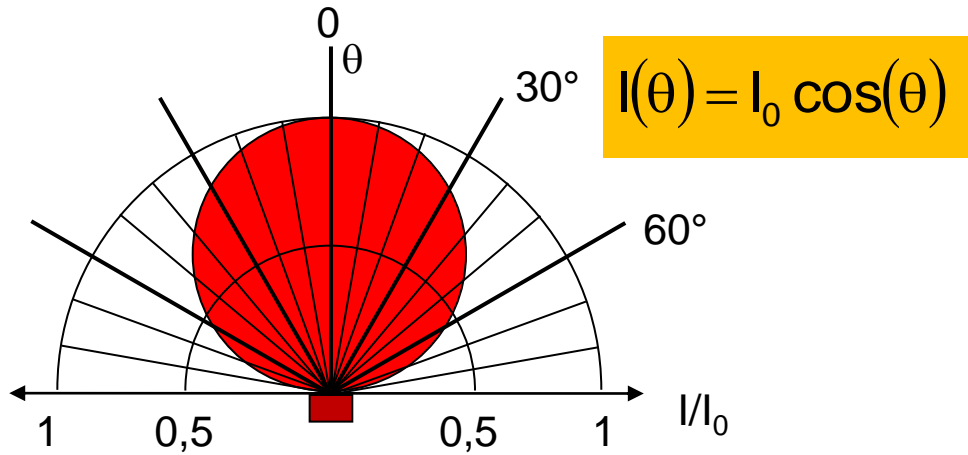


Bandmodell
(ppn-Übergang
Vorwärtsspannung)



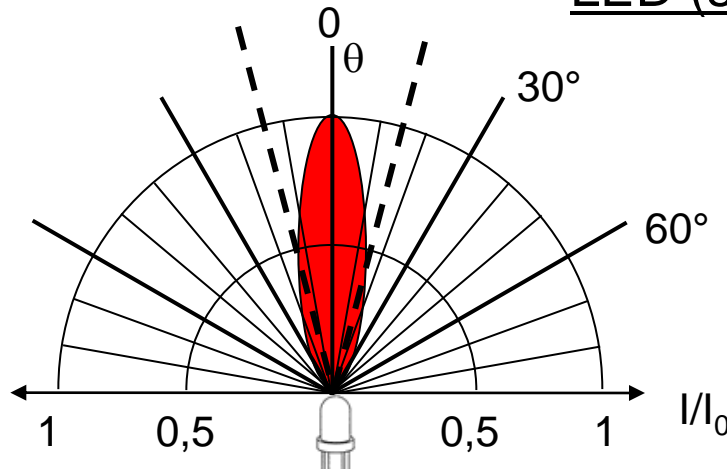
Abstrahlcharakteristik

Lambert'scher Flächenstrahler

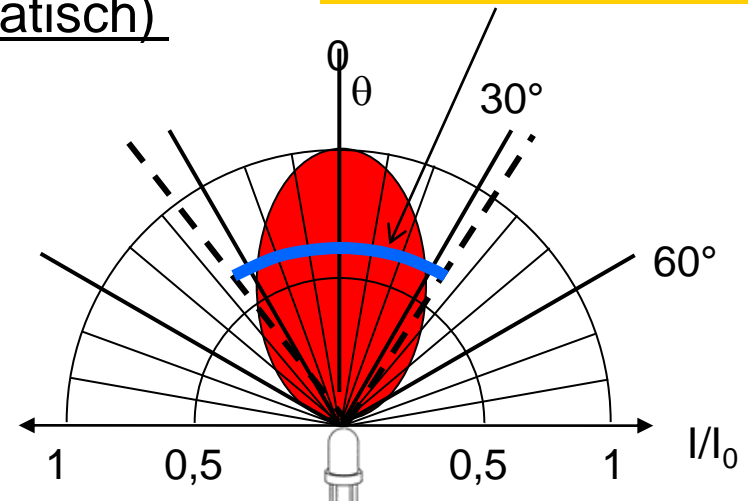


Abstrahlwinkel: $\sigma = 70^\circ$
(Öffnungswinkel)

LED (schematisch)

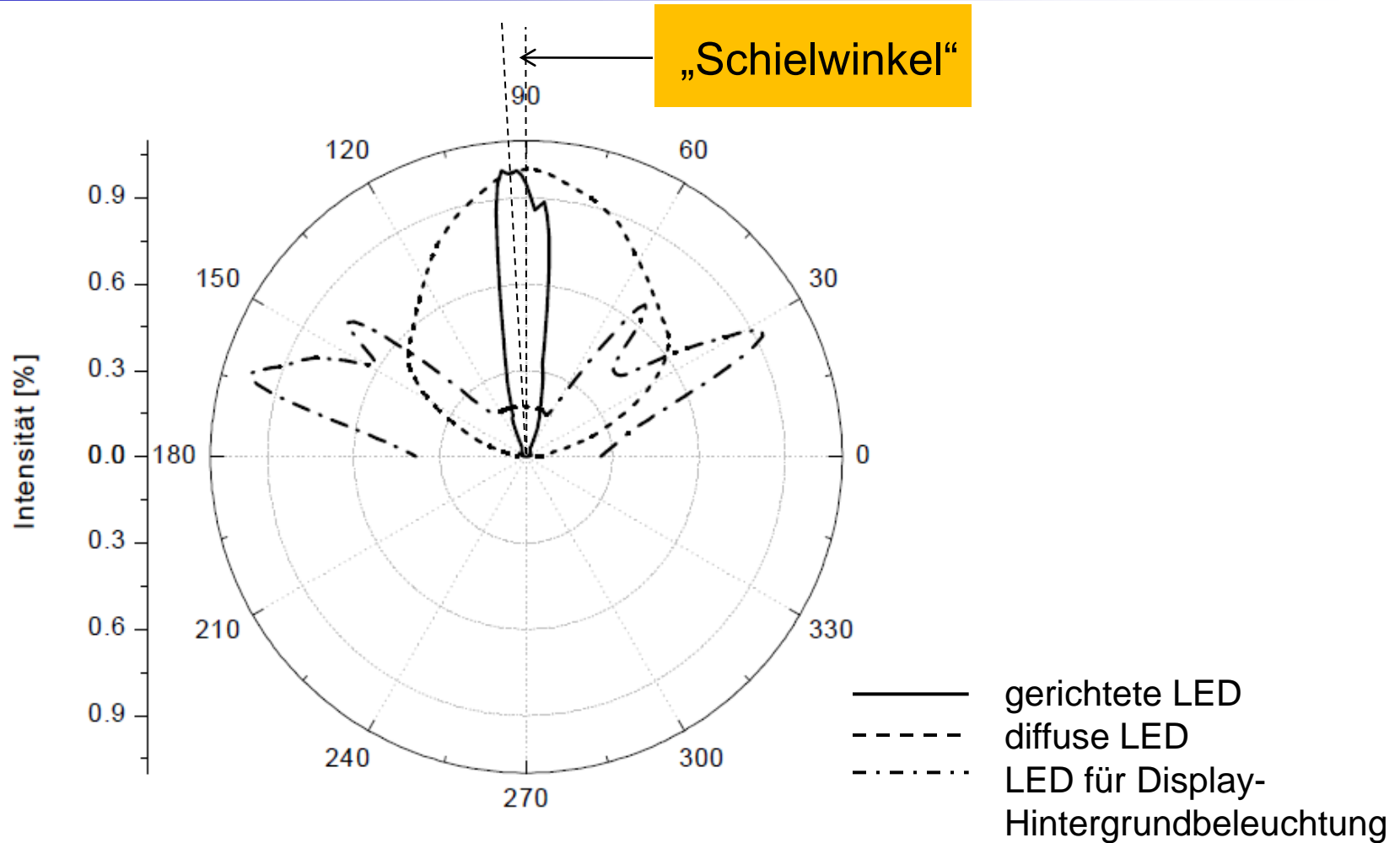


klare Linse



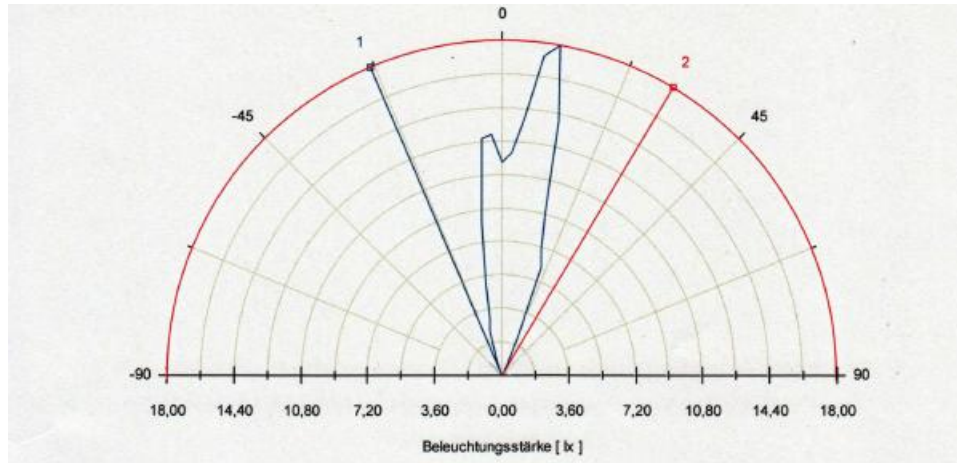
diffuse Linse Optoelektronik I

Abstrahlcharakteristik

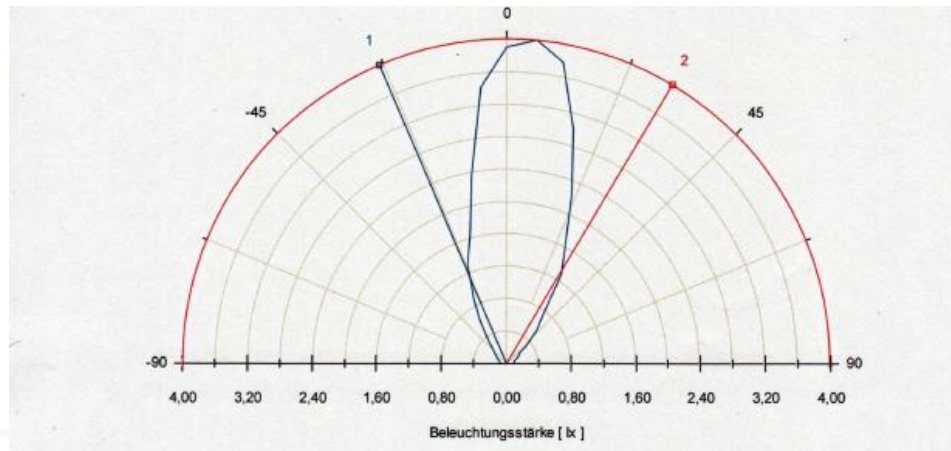


Abstrahlcharakteristik

Beispiel: blaue 3 mm LEDs für FH Jena LED cube

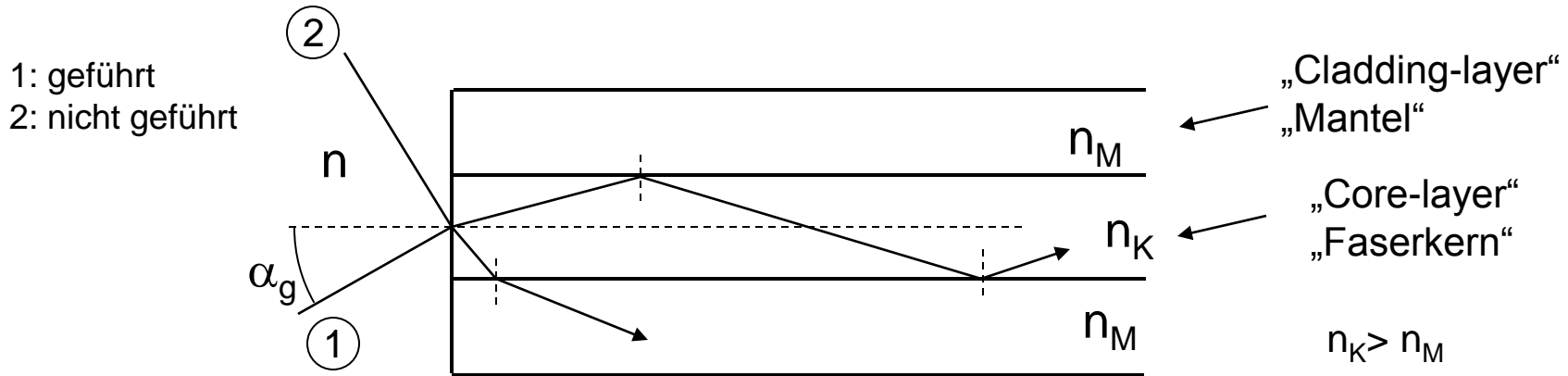


Oberfläche klar,
unbehandelt



Oberfläche matt,
aufgeraut

Einkopplung in Glasfasern



Kritischer Winkel: $\alpha_g = \sin^{-1}(n_K^2 - n_M^2)^{\frac{1}{2}} = \sin^{-1}(N_A)$

Lambertscher Strahler: $I(\theta) = I_0 \cos(\theta)$

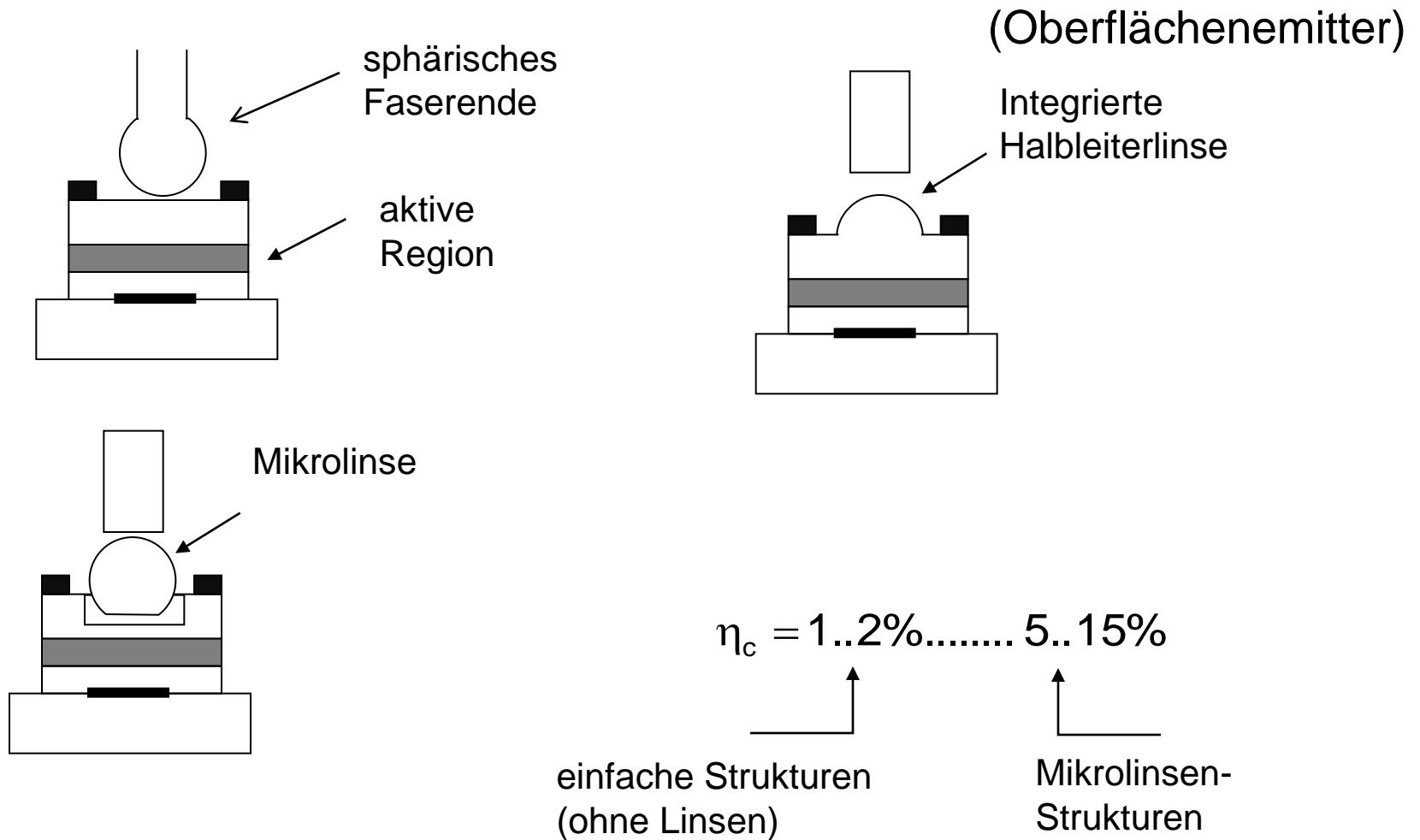
N_A : Numerische Apertur

$$N_A = n \cdot \sin \alpha_g$$

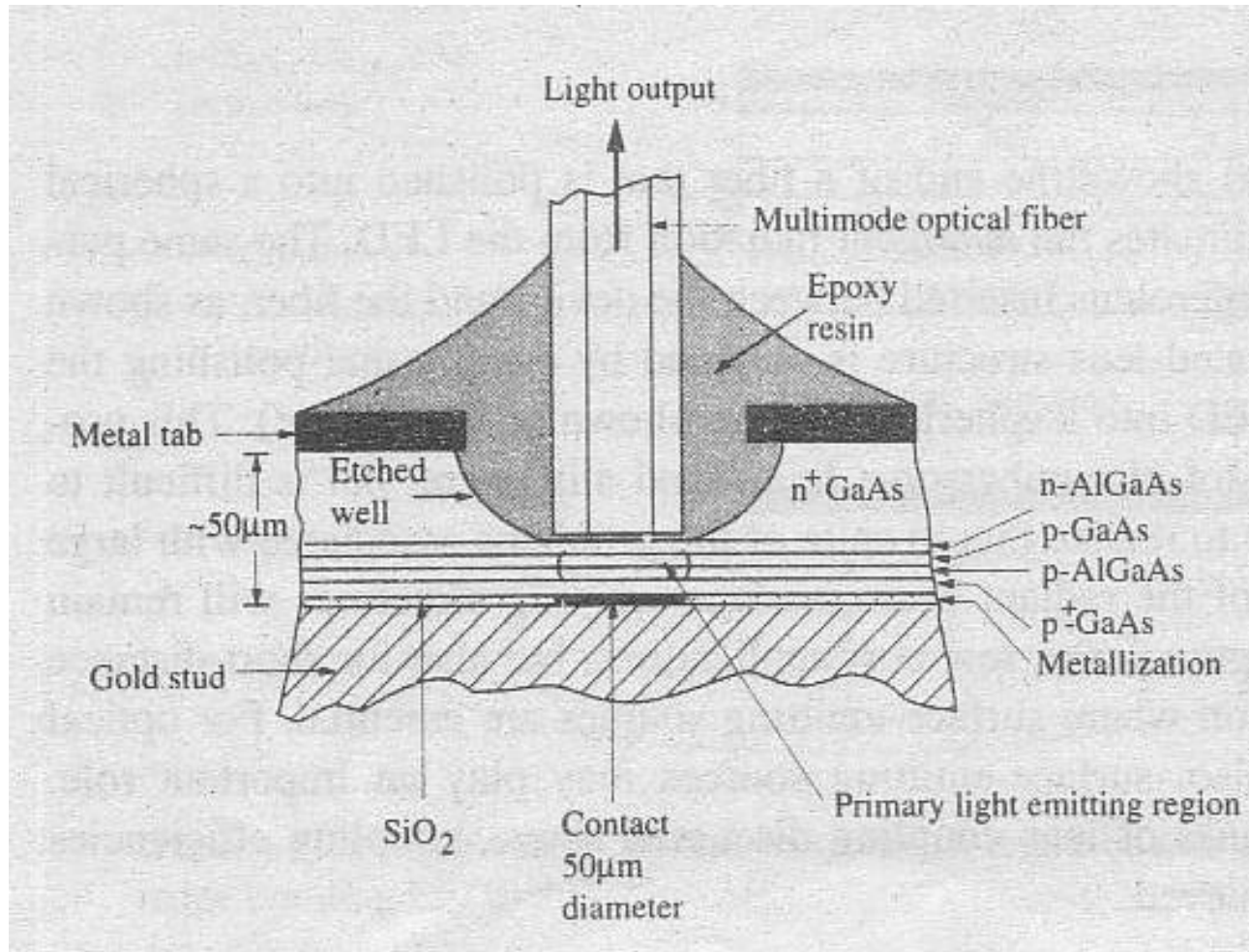
$$\eta_c = \frac{\int_0^{\alpha_g} I(\theta) \sin(\theta) d\theta}{\int_0^{\pi/2} I(\theta) \sin(\theta) d\theta} = \frac{\int_0^{\alpha_g} I_0 \sin(2\theta) d\theta}{\int_0^{\pi/2} I_0 \sin(2\theta) d\theta} = \sin^2(\alpha_g)$$

$\eta_c \ll 10\%$

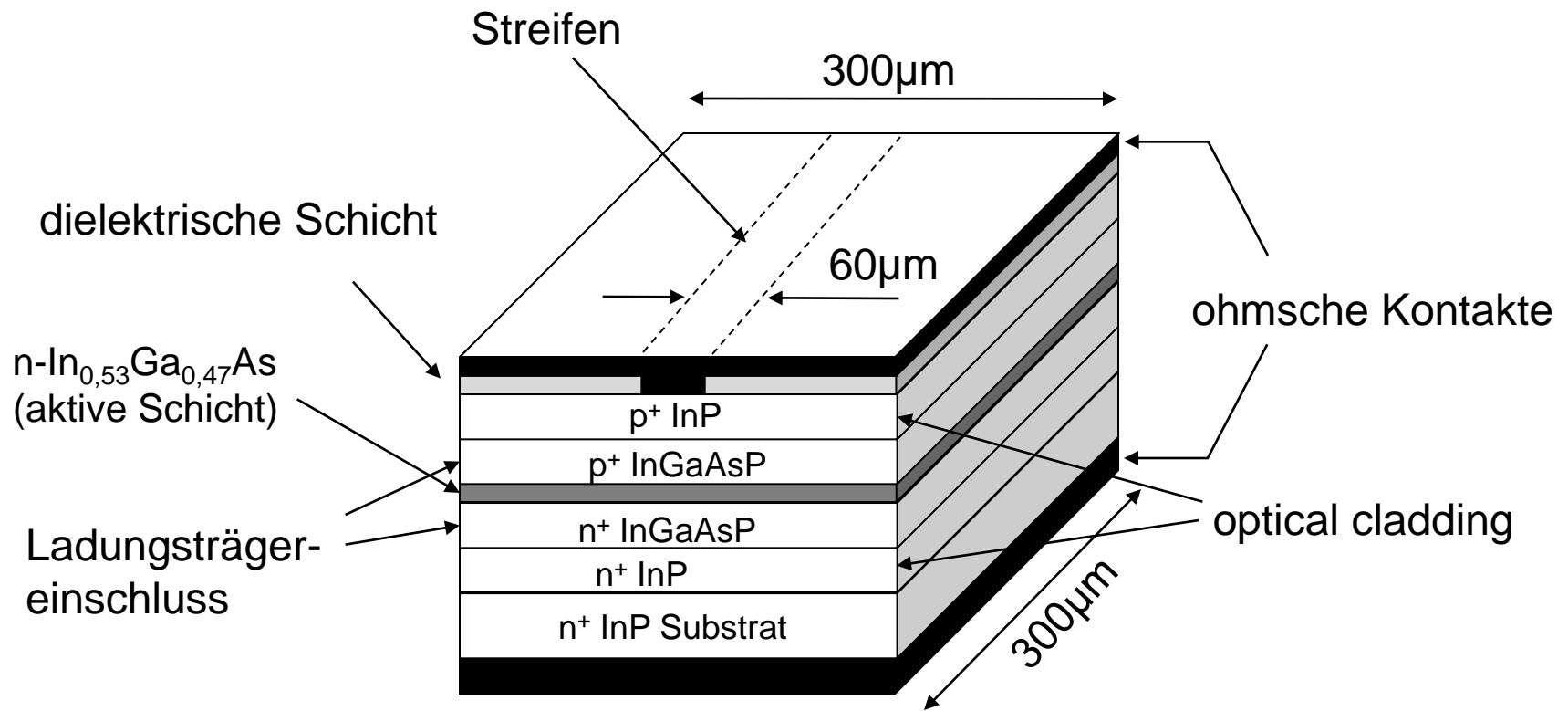
Einkopplung in Glasfasern II



Beispiel: Oberflächenemitter vom Burres-Typ

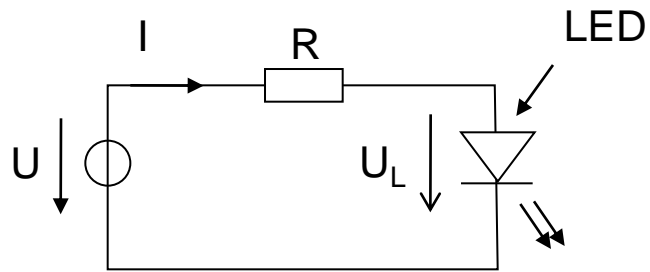


Kantenemitter



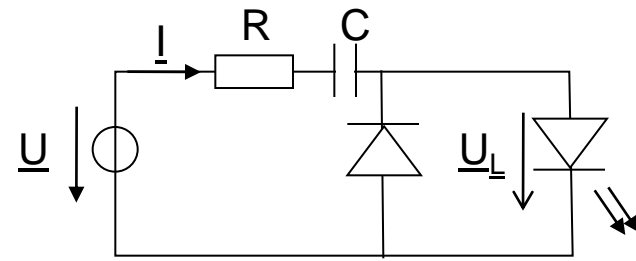
Einfache Treiberschaltungen

A) DC Anwendung



$$U - U_L = IR$$

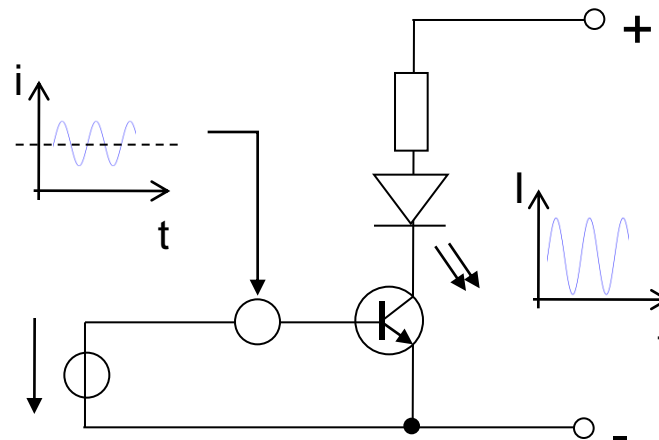
B) AC Anwendung



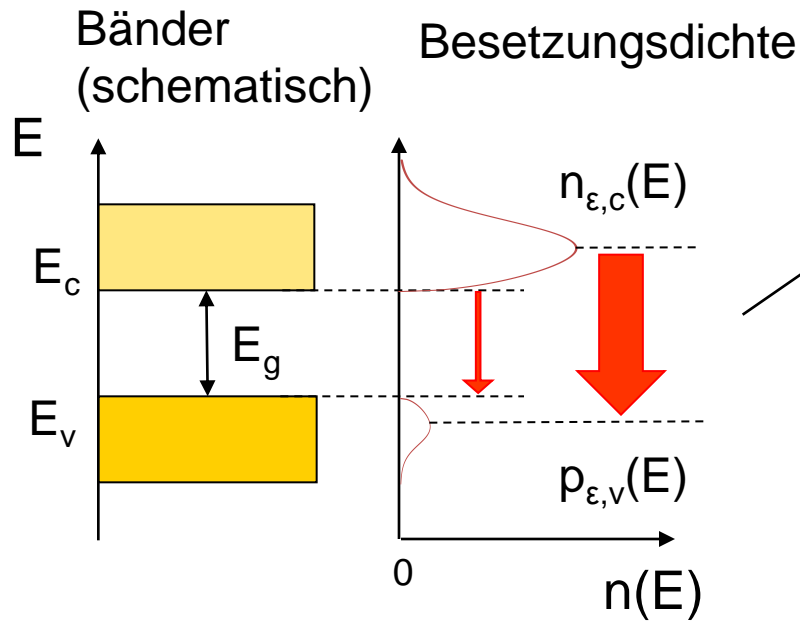
$$\underline{U} - \underline{U}_L = I(R + jX_c)$$

C) Einfache Strom/ Intensitätsmodulation

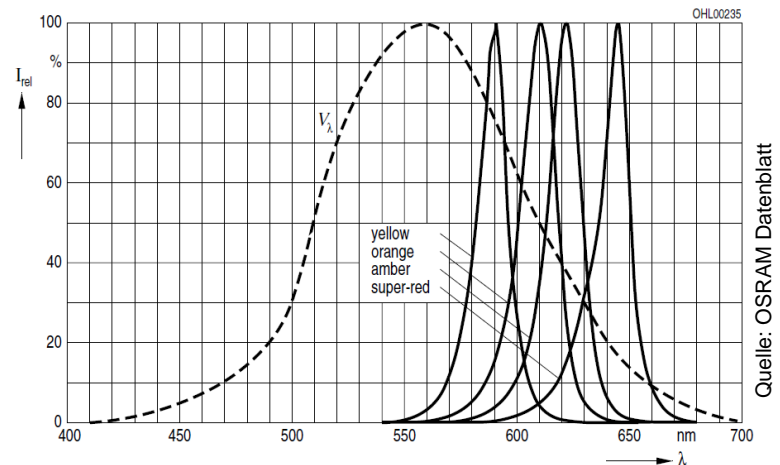
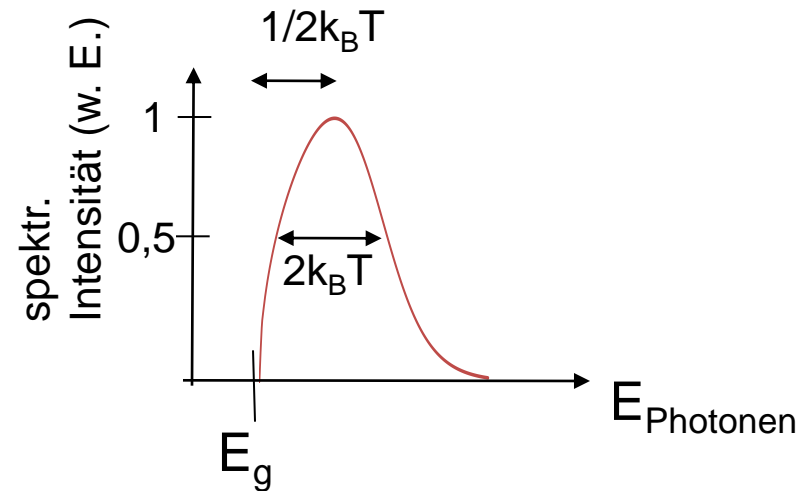
(lineares Regime: $I \sim i$)



Optisches Spektrum der LED



$$I(E) \propto \sqrt{E - E_g} e^{-\frac{E - E_g}{k_B T}}$$

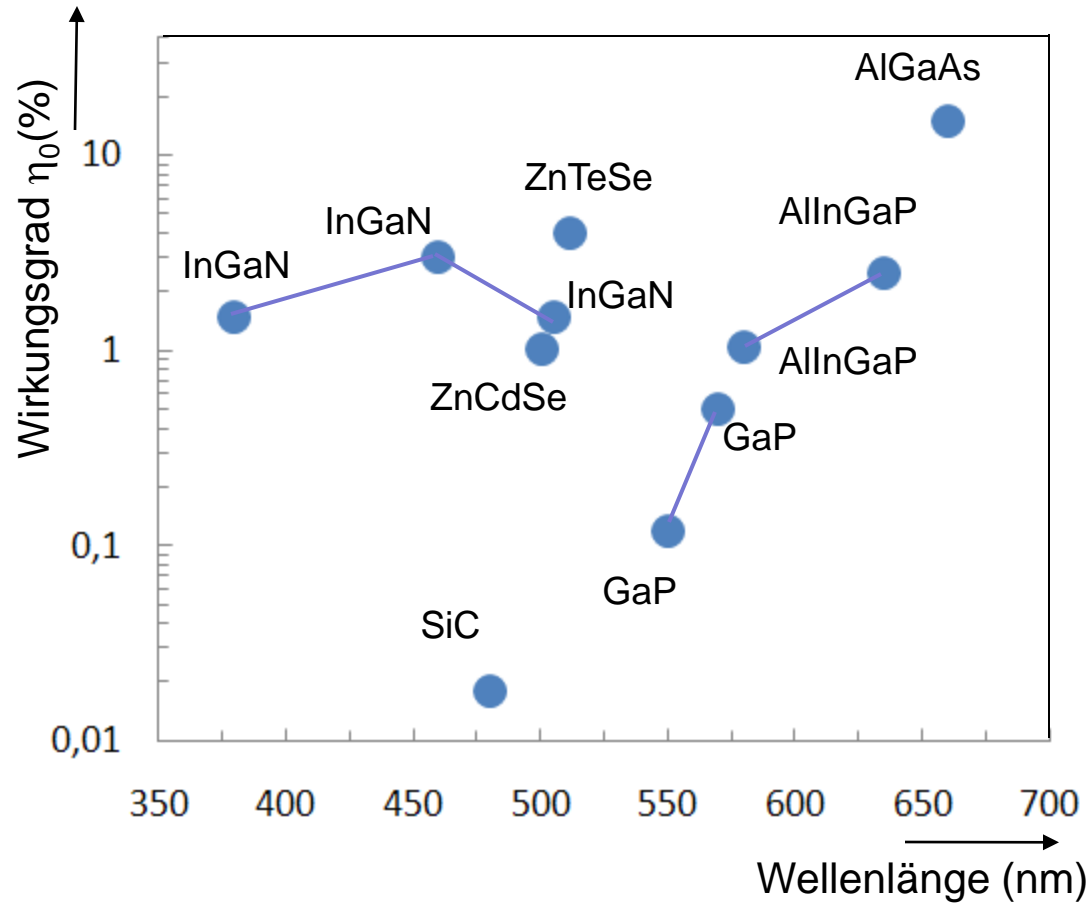


LEDs für verschiedene Wellenlängen

Materialsystem	Bandlücke	max. Wellenlänge nm (Farbe)
InGaAs		
InGaPAs	direkt	1100-1600 (IR)
GaAsP	direkt	650 (rot)
GaP: Zn, O	indirekt	700 (rot)
GaAsP: N	indirekt	630 (rot)
		585 (gelb)
GaP: N	indirekt	565 (gelb-grün)
GaP	indirekt	555 (grün)
SiC	indirekt	480 (blau)
AlGaAs	direkt	650 (rot)
AlGaAs	direkt	650 (rot)
AlGaP	direkt	620 (orange)
AlInGaP	direkt	595 (bernsteingelb)
AlInGaP	direkt	570 (gelb-grün)
GaN (InGaN)	direkt	450 (blau)
AlGaAs	direkt	650 (rot)
InGaN (+Phosphor)	direkt	380-780 (weiss)

Bandlücke indirekt: strahlende Rekombination über Exzitonen-, Akzeptor/Donator-Bandübergänge

Externer Quantenwirkungsgrad



Multi-LED RGB-LED

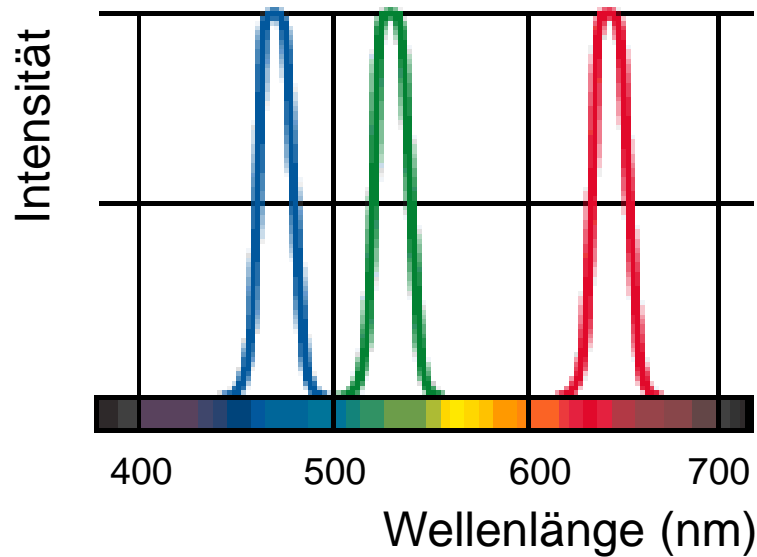
Weißes Licht durch additive Farbmischung



„drei LED in einer“



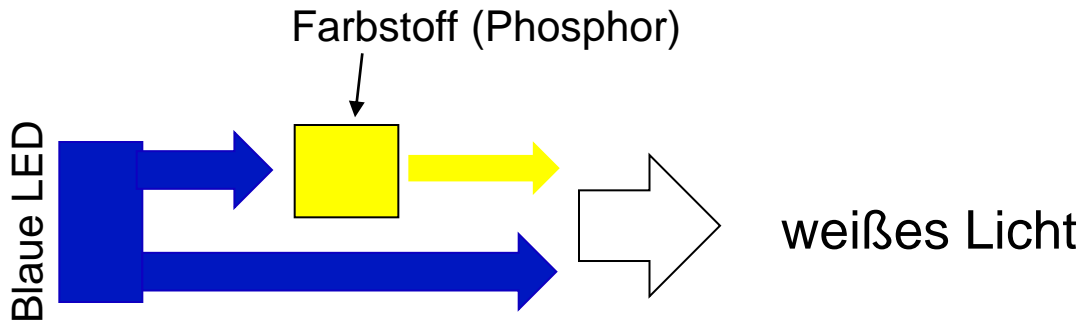
Spektren der Einzeldioden



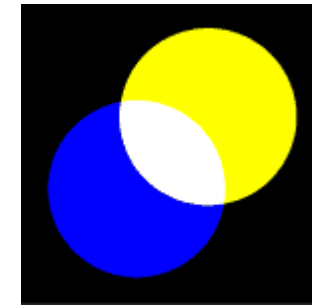
Weißer LED

„Lumineszenz-Konversions-LED“ (Nitchia1995)

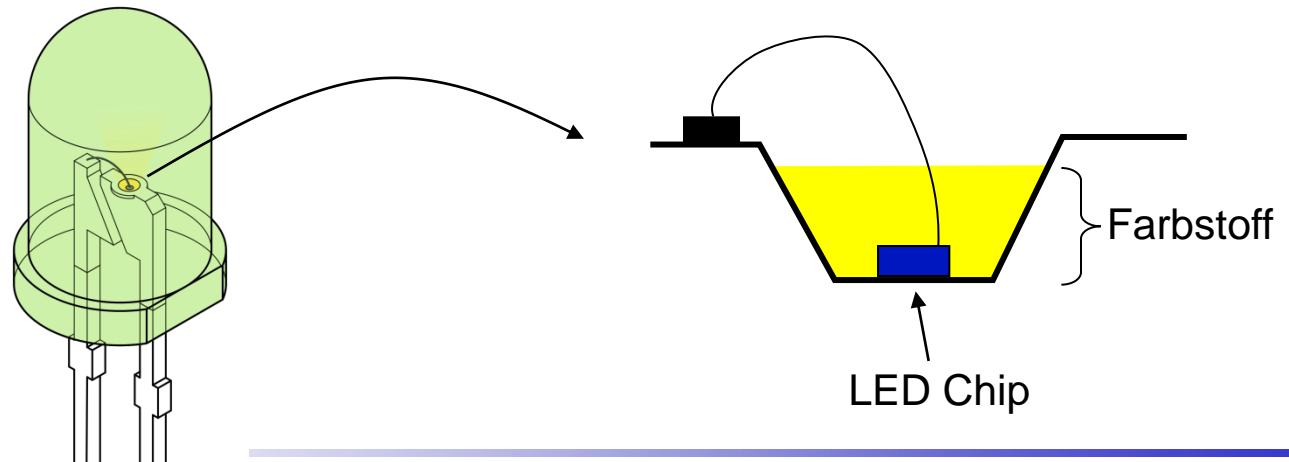
Prinzip:



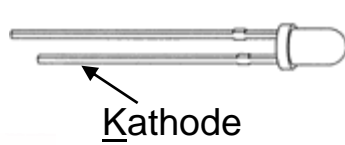
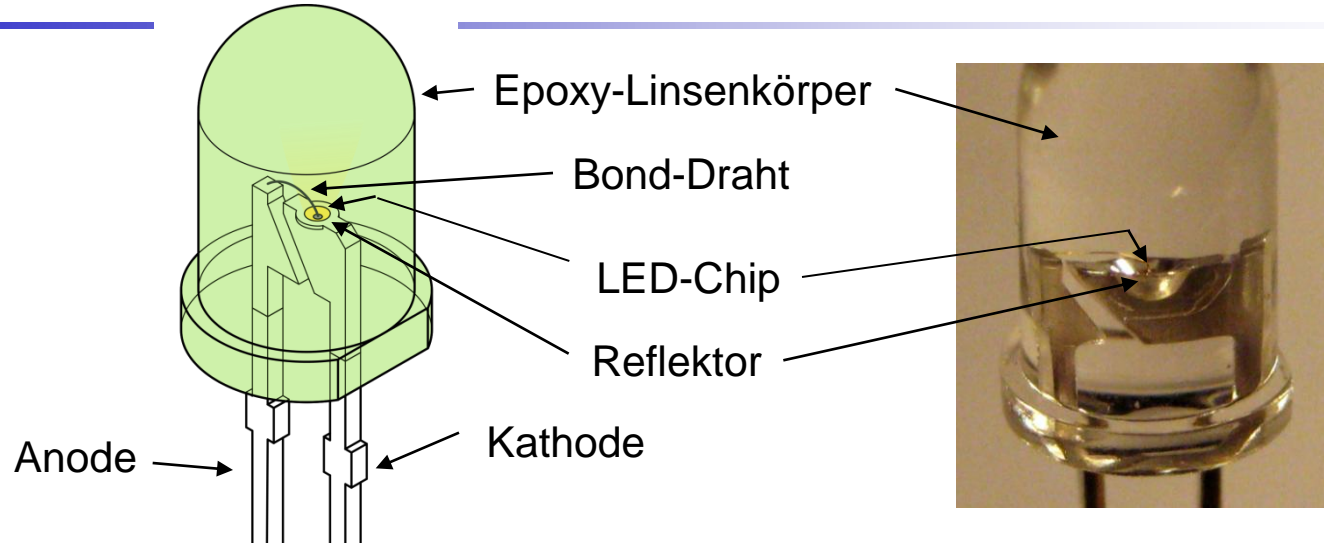
Additive Mischung:



Aufbau:



Bauformen



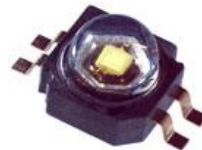
bedrahtete 3 mm, 5 mm LED

- einfach zu fertigen
- Kunststoffkörper als Linse und zur Herabsetzung des Winkels der Totalreflexion



SMD LED

„Spider“ LED



„Luxeon“ LED
(Hochleistungs-LED)



Chip on Board device

Device Performance I

A) Spektrale Emissionscharakteristik

Linienbreite bei
Raumtemperatur (T=300K)

$$|\Delta\lambda|_{T=300K} = \frac{1}{24\mu\text{m}} \lambda^2$$

Herleitung als Übung

Im Beispiel:

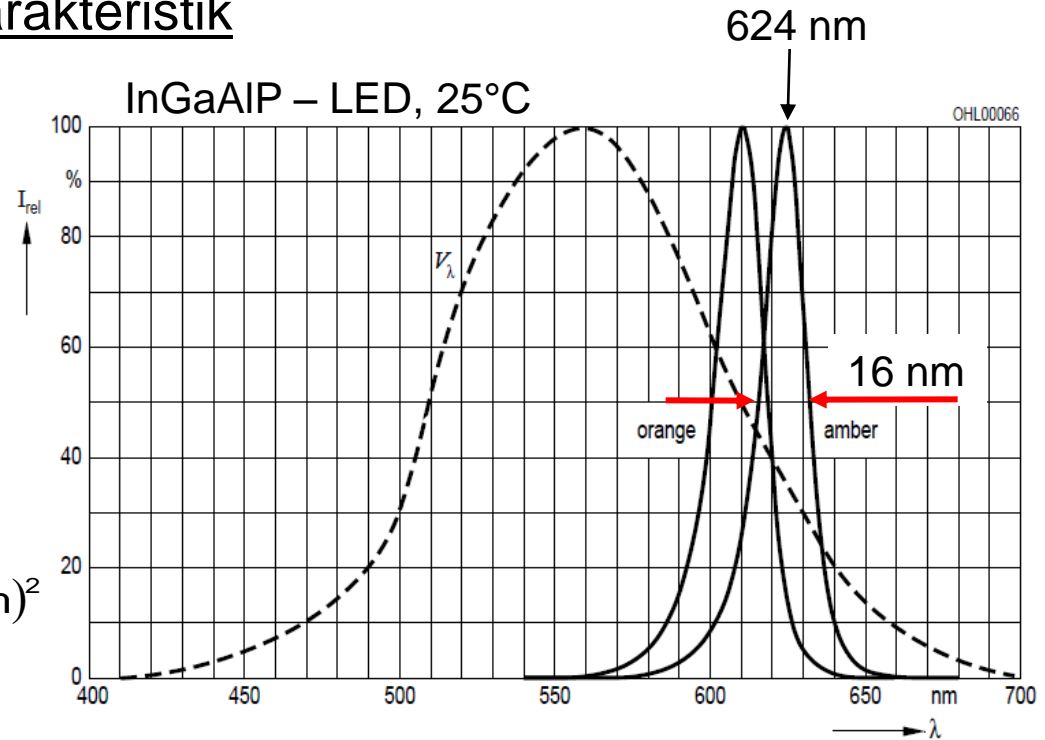
$$|\Delta\lambda(624\text{nm})|_{T=300K} = \frac{1}{24\mu\text{m}} (624\text{nm})^2$$

$$|\Delta\lambda| = 16\text{nm}$$

Temperaturabhängigkeit der
Emissionswellenlänge bzw. Bandlücke

bei III-V Halbleitern:

- 5meV/K bzw. 1,5nm/K



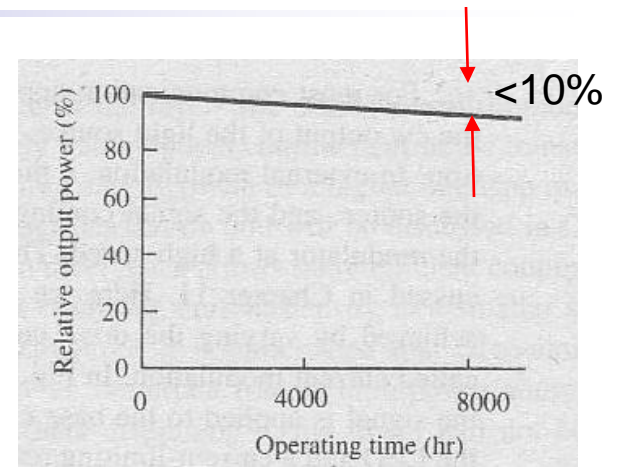
Quelle: OSRAM GmbH

Device Performance II

B) Ausgangsleistung über Zeit Charakteristik

Aussage über Lebensdauer der LED, $\Delta P_O < 10\%/8000h$
Beispiel: AlGaAs-LED (Kantenemitter)

Stichwort: Accelerated ageing tests



C) LED I / U Kennlinie

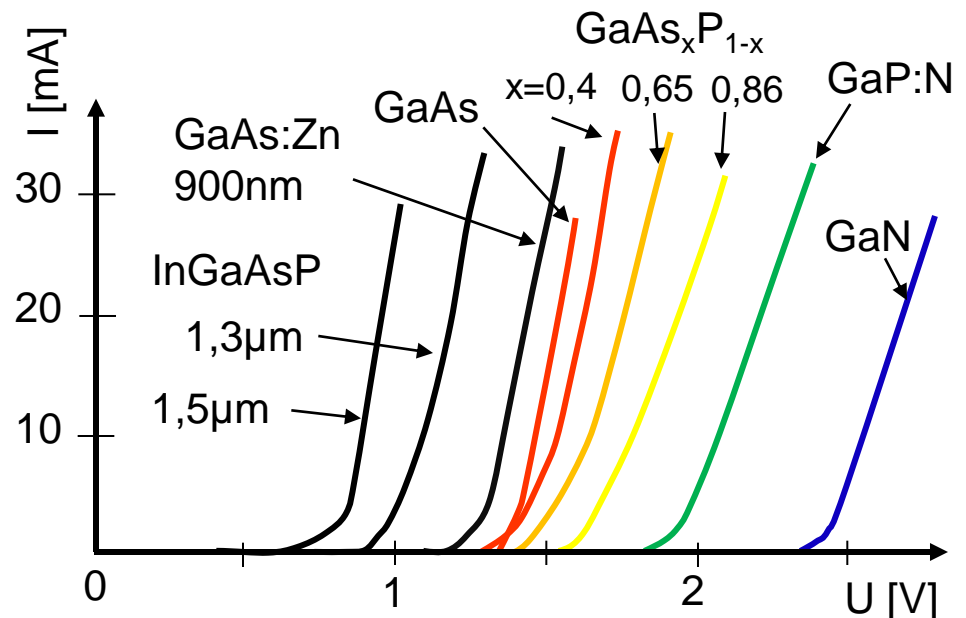
„Knick“-Spannung in Abhängigkeit
von der Emissionswellenlänge
(Bandlücke)

Rot: $\sim 1,5$ V

Grün: $\sim 1,8$ V

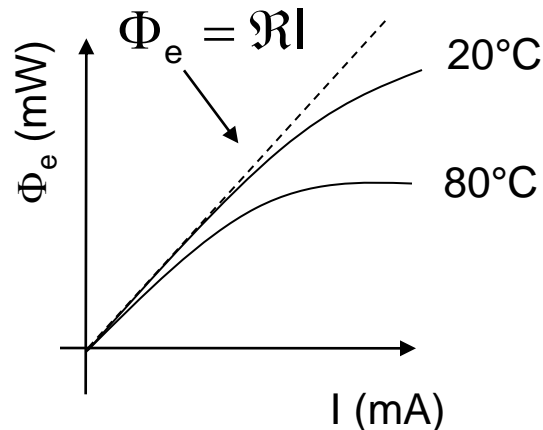
Blau: $\sim 2,5$ V

Niedrige Sperrspannungen (~ 5 V)!!



Device Performance III

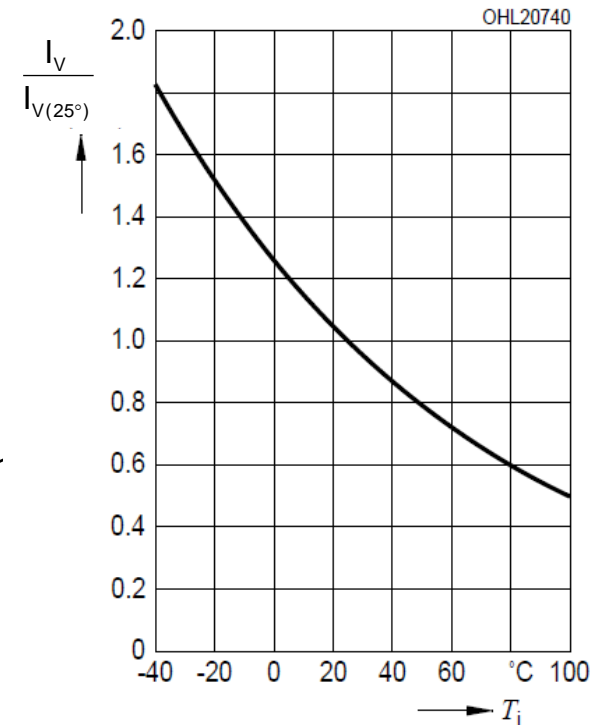
D) Ausgangsleistung vs. Diodenstrom (statische elektro-optische Kennlinie)



bei höherer Temperatur (Strom),
nicht strahlende Übergänge (Auger-Prozesse)

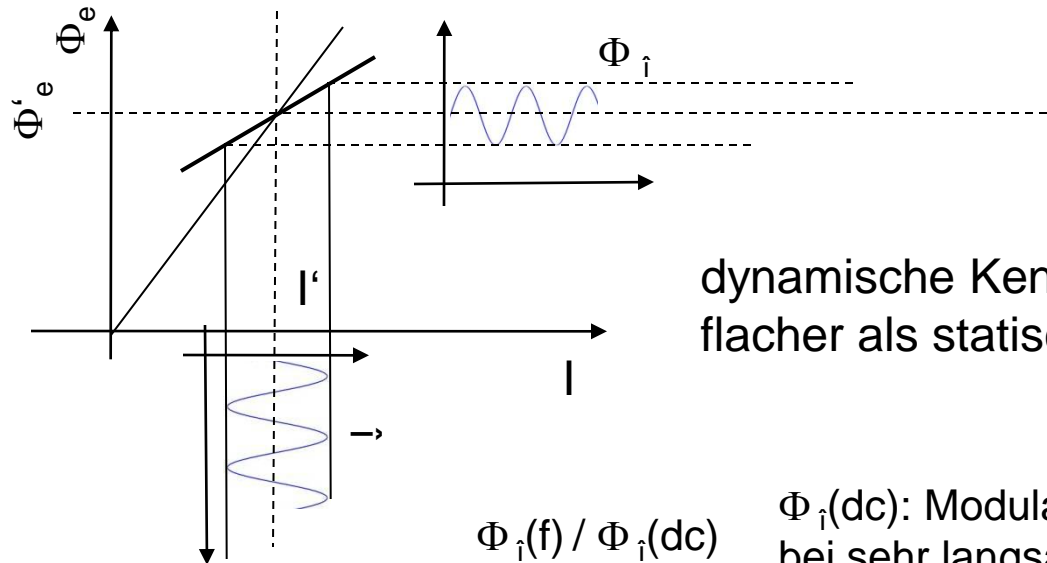
→ Reduzierung des internen
Quantenwirkungsgrades

Beispiel: InGaAlP-LED
Relative Lichtstärke vs. Temperatur
(konst. Diodenstrom)



Modulation zur Datenübertragung

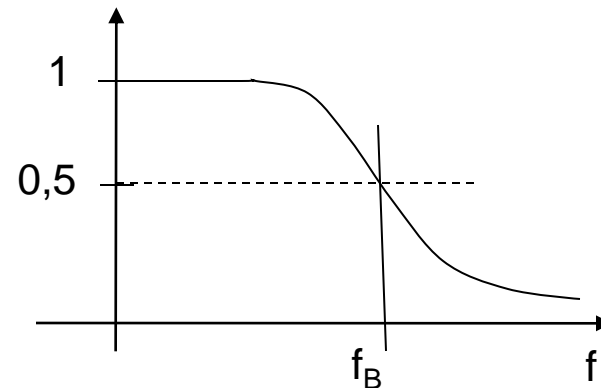
Modulation:



Definition „Modulationsbandbreite“

$$\Delta\Phi[\text{dB}] = 10 \log_{10} \left(\frac{\Phi_i(f)}{\Phi_i(dc)} \right)$$

f_B , wenn $\Delta\Phi = -3\text{dB}$



Zeitliches Verhalten

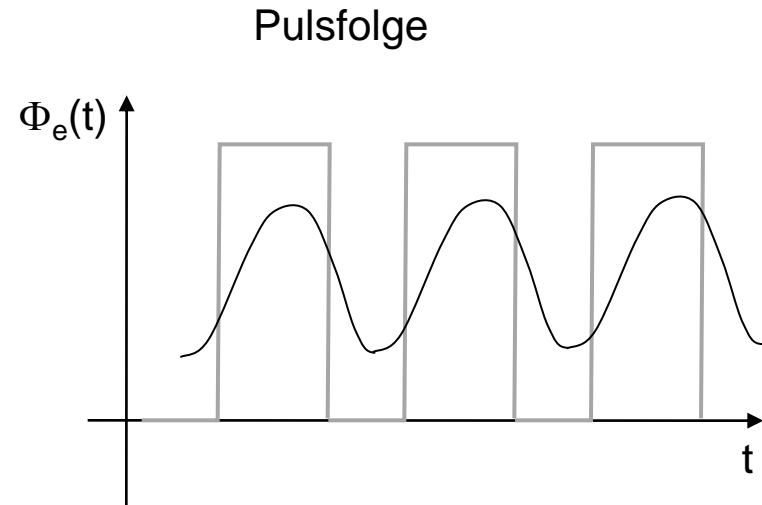
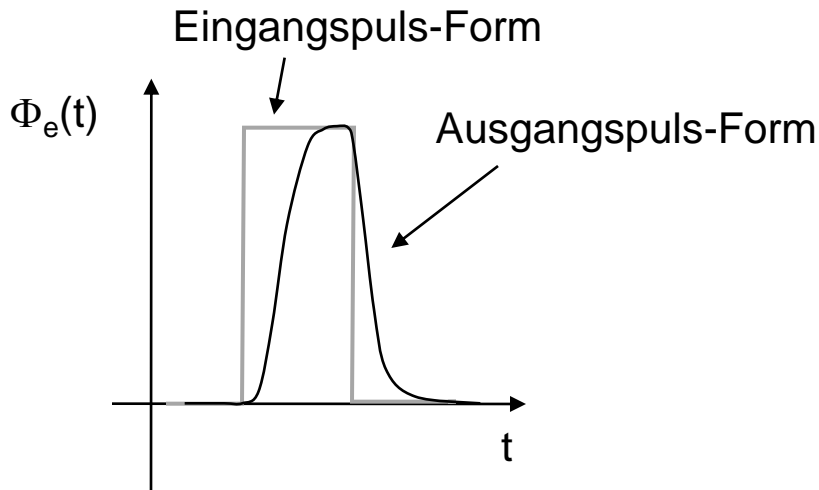
Lebensdauer der Ladungsträger

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_s} + \frac{1}{\tau_{ns}}$$

Frequenzverhalten

$$\frac{\Phi_i(f)}{\Phi_i(\text{dc})} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f)^2 \tau^2}} \longrightarrow f_{3\text{dB}} = \frac{\sqrt{3}}{2\pi\tau}$$

$f_{3\text{dB,typ}} < 300\text{MHz}$



Beispiele für LED Datenblätter

Hyper 3 mm (T1) LED, Diffused
Hyper-Bright LED
Lead (Pb) Free Product - RoHS Compliant

LS 3366, LA 3366, LO 3366, LY 3366



Vorläufige Daten für OS-PCN-2004-005-A /
Preliminary Data for OS-PCN-2004-005-A

Besondere Merkmale

- **Gehäusertyp:** eingefärbtes, diffuses 3 mm (T1) Gehäuse
- **Besonderheit des Bauteils:** Lötspieße mit Aufsetzebene
- **Wellenlänge:** 633 nm (super-rot), 615 nm (amber), 606 nm (orange), 587 nm (gelb)
- **Abstrahlwinkel:** 70°
- **Technologie:** InGaAlP
- **optischer Wirkungsgrad:** 11 lm/W (gelb, orange, amber), 7 lm/W (super-rot)
- **Gruppierungsparameter:** Lichtstärke, Wellenlänge
- **Lötmethode:** Wellenlöten (TTW)

Features

- **package:** colored, diffused 3 mm (T1) package
- **feature of the device:** solder leads with stand-off
- **wavelength:** 633 nm (super-red), 615 nm (amber), 606 nm (orange), 587 nm (yellow)
- **viewing angle:** 70°
- **technology:** InGaAlP
- **optical efficiency:** 11 lm/W (yellow, orange, amber), 7 lm/W (super-red)
- **grouping parameter:** luminous intensity, wavelength
- **soldering methods:** TTW soldering
- **packing:** bulk, available taped on reel



Datenblatt 1

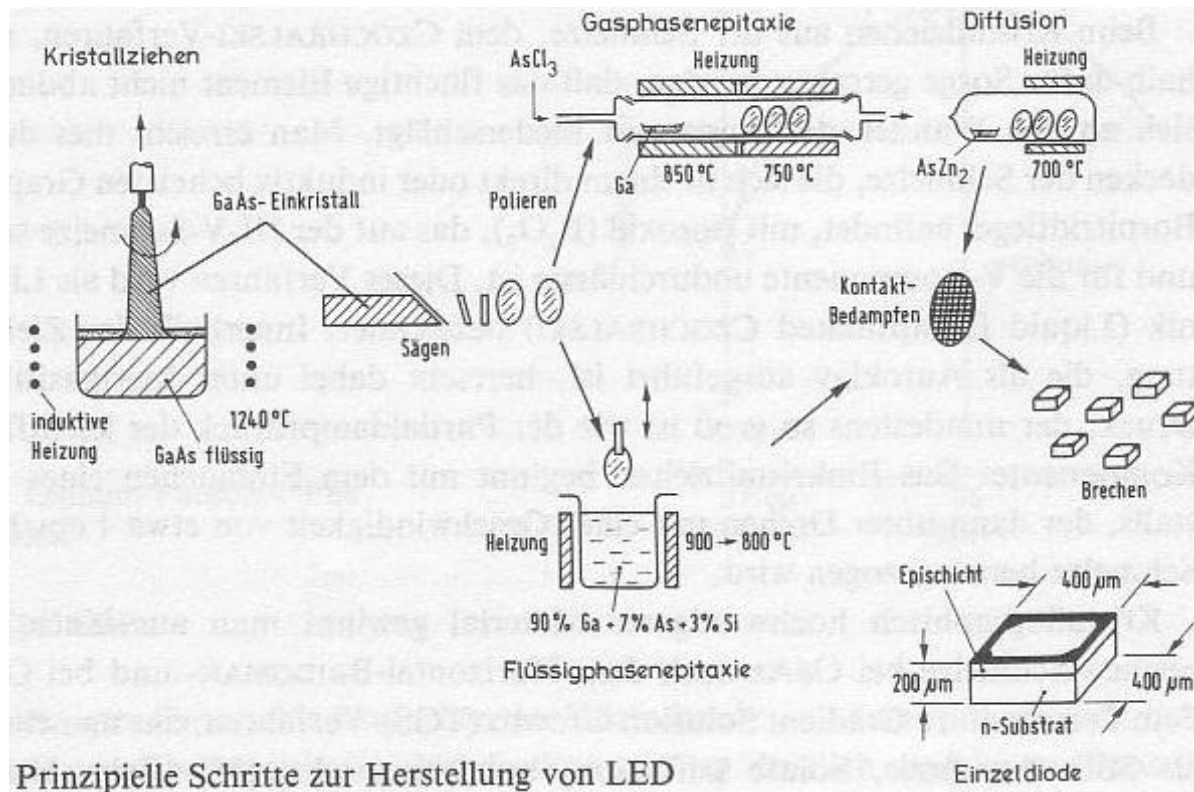


Datenblatt 2

Herstellung von LED

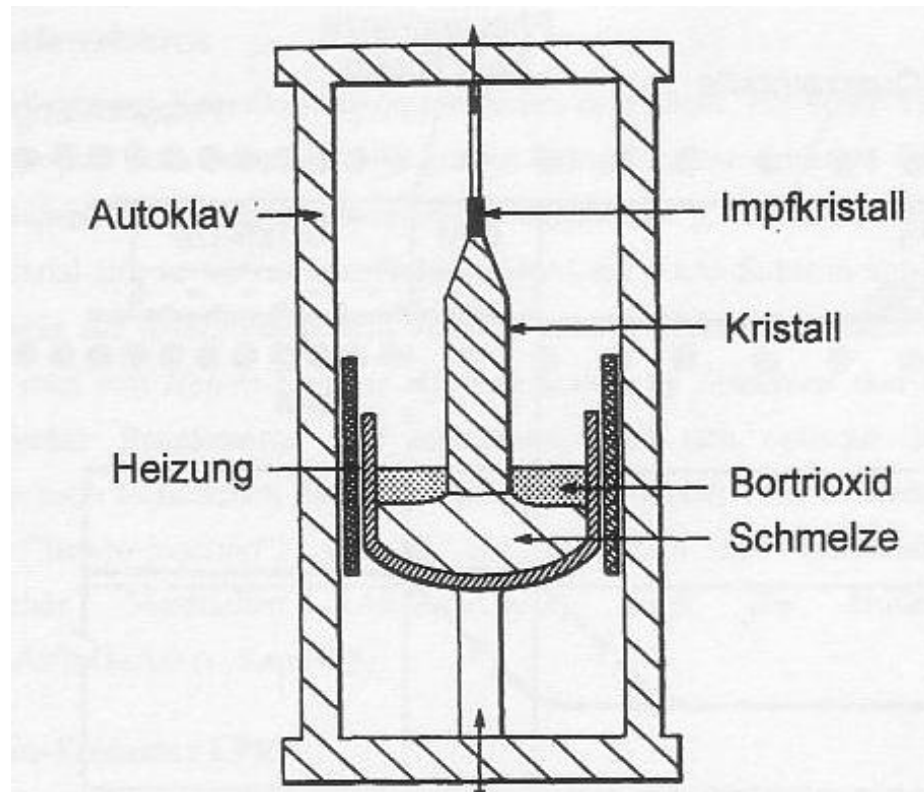
4 Herstellungsschritte

1. Herstellung des Substrats (Einkristallziehen, Sägen, Polieren)
2. Epitaxie der Schichtstruktur
3. Diffusion der Dotierungen (Akzeptoren, Donatoren)
4. Kontaktierung, Brechen, Montage der LED



Kristallzucht

Beispiel: Herstellung eines GaP-Einkristalls mit Hilfe der LEC-Methode
(LEC: liquid encapsulated Czochralski method)



Dotierung

Dotierungsverfahren

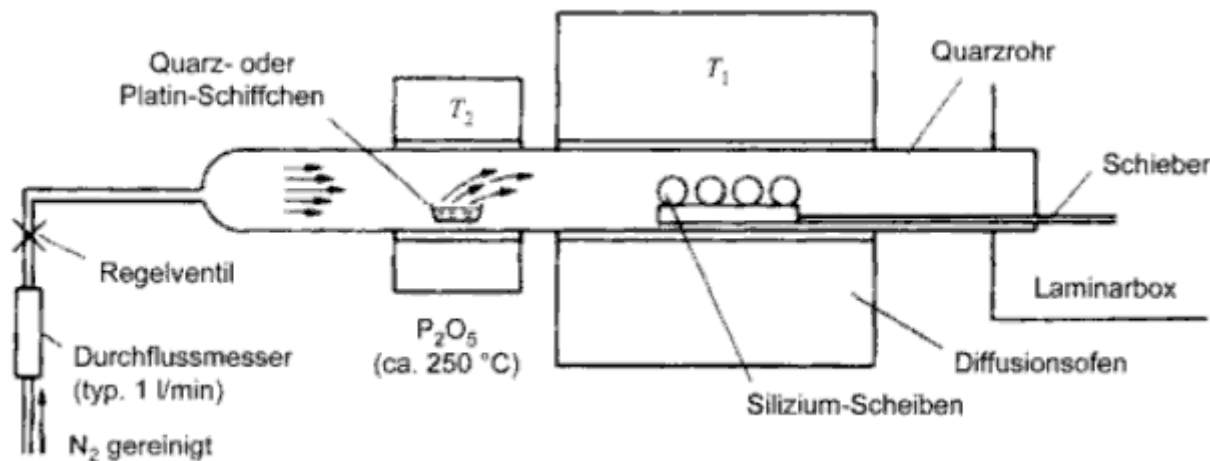
Dotieren während
der Kristallzucht/
Epitaxie

Legieren

Diffusion

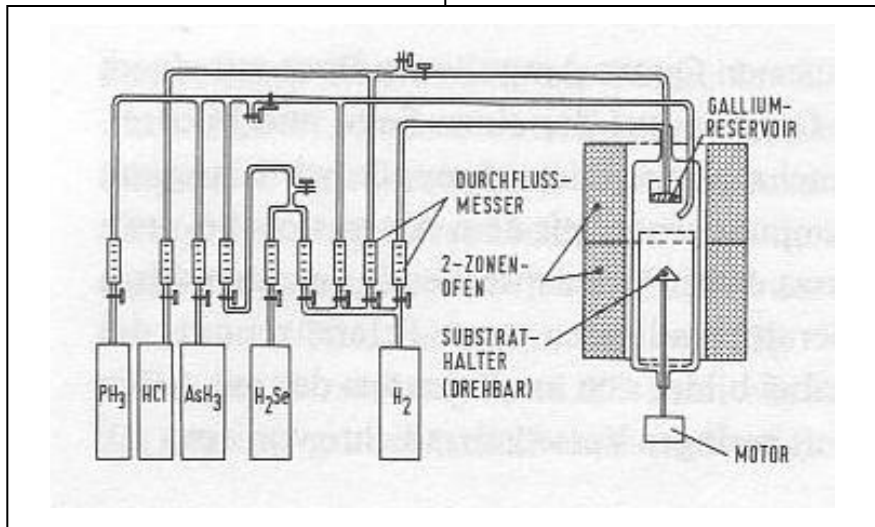
Ionenimplementation

Beispiel Diffusion:



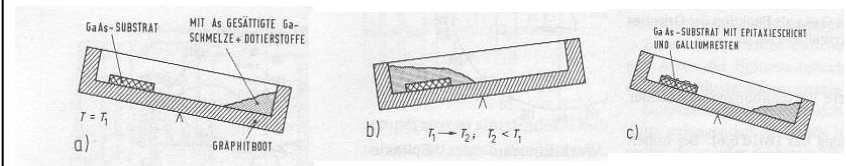
Epitaxie

Epitaxie: (griechisch: obenauf): Abscheidetechnik auf molekularer Ebene

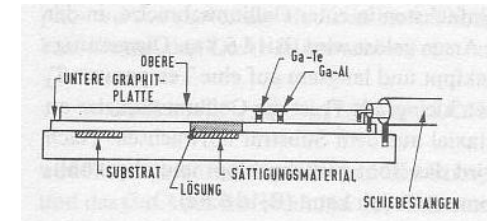


Gasphasenepitaxie von GaAsP

Kippmethode



Schiebemethode



Strukturierung, Kontaktierung und Montage

- Lithographie zur Erzeugung von sub- μm Strukturen.
- Ätzen zur weiteren Strukturierung der LED Schichtaufbauten
- Sägen des Kristalls
- Metallisierung (Kontaktierung), z.B. Sputtern
- Mounting, Einbau in Gehäuse
- Montage der Wärmeabführung
- Montierung von Mikrooptiken, Glasfaseranbindung

Anwendungen von LED (Beispiele)

- Signalisierung (Fahrzeugbau, Anlagenbau...)
- Signalübertragung (intraoffice, kurze Reichweiten, niedrige Datenraten)
- Anzeigeneinheiten (7-Segement, Matrix-Elemente)
- Display-Technologie
- Beleuchtungszwecke (Scheinwerfer, Rücklichter, Blinkleuchten)
- Straßenbeleuchtung
- Erzeugung von optischen Effekten

Defekte und Zuverlässigkeit von LEDs

keine „catastrophic degradation“ wie Halbleiterlaser

graduelle Degradation wird beobachtet → bestimmt Lebensdauer der LED

Kristall-Versetzungen → „dark line defects“, „dark spots“

tiefe Störstellen (e.g. Fehlstellen, Fremdatome, Zwischengitterdefekte) → Reduzierung der Quanteneffizienz

Beschreibung der Degradationsprozesse

(durch Aktivierungsenergie E_d und Arrhenius-Gesetz):

Degradationsrate: $\gamma_d = C e^{-\frac{E_d}{k_B T}}$

Ausgangsleistung: $\Phi_e(t) = \Phi_e(0) e^{-\gamma_d t}$

typ. Werte:

$$E_d = 0,6..1 \text{ eV}$$

$$C \sim 10^2 \text{ h}^{-1}$$

$$LT \sim 10^6 \dots 10^9 \text{ h}$$

Lernziele Kapitel 6

- Grundlage von Lumineszenz
 - Nichtgleichgewicht (Ladungsträgerüberschuss)
- Rekombinationsmechanismen
- Design von LEDs
 - Wirkungsgrade (Injektion, Rekombination Auskopplung, Leuchtwirkungsgrad)
 - „externe Wirkungsgrade“: Leistungs-, Leucht-, ext. Wirkungsgrad, Lichtausbeute
- LED Strukturen
- Abstrahlcharakteristik
- Einkopplung in die Glasfaser
- LEDs für verschiedene Wellenlängen
- Weiße LEDs
- Bauformen
- Device Performance und Datenblätter
- Herstellung
- Anwendungen
- Zuverlässigkeit