



LUDWIG-  
MAXIMILIANS-  
UNIVERSITÄT  
MÜNCHEN

# Halbleiterlaser

Seminar Laserphysik

17.06.15





## a) Halbleiter

- Eigenschaften
- Dotierung
- pn – Übergang
- LED

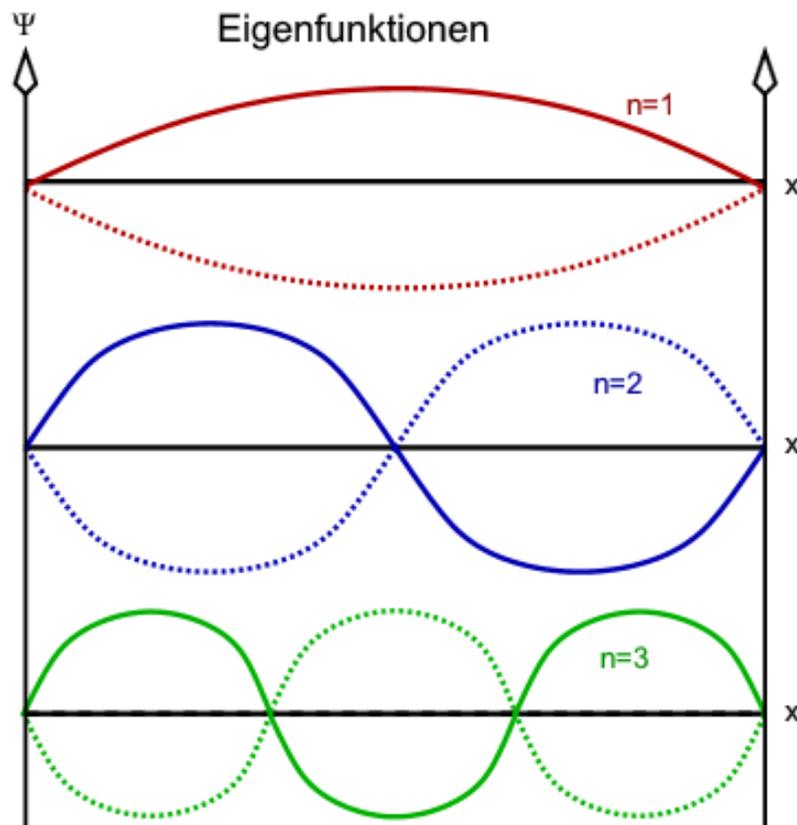
## b) Diodenlaser

- Ladungsinversion
- Bauformen
- Strahlprofil
- Leistungsangaben

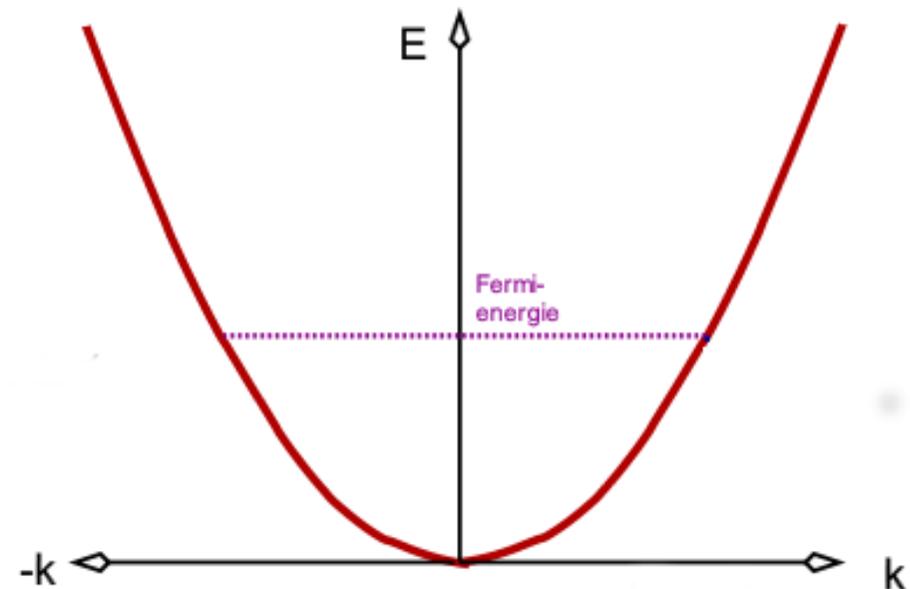
## c) Anwendungsgebiete



## Einfachstes Modell: Freies Elektronengas



$$E(\vec{k}) = \frac{(\hbar\vec{k})^2}{2m}$$

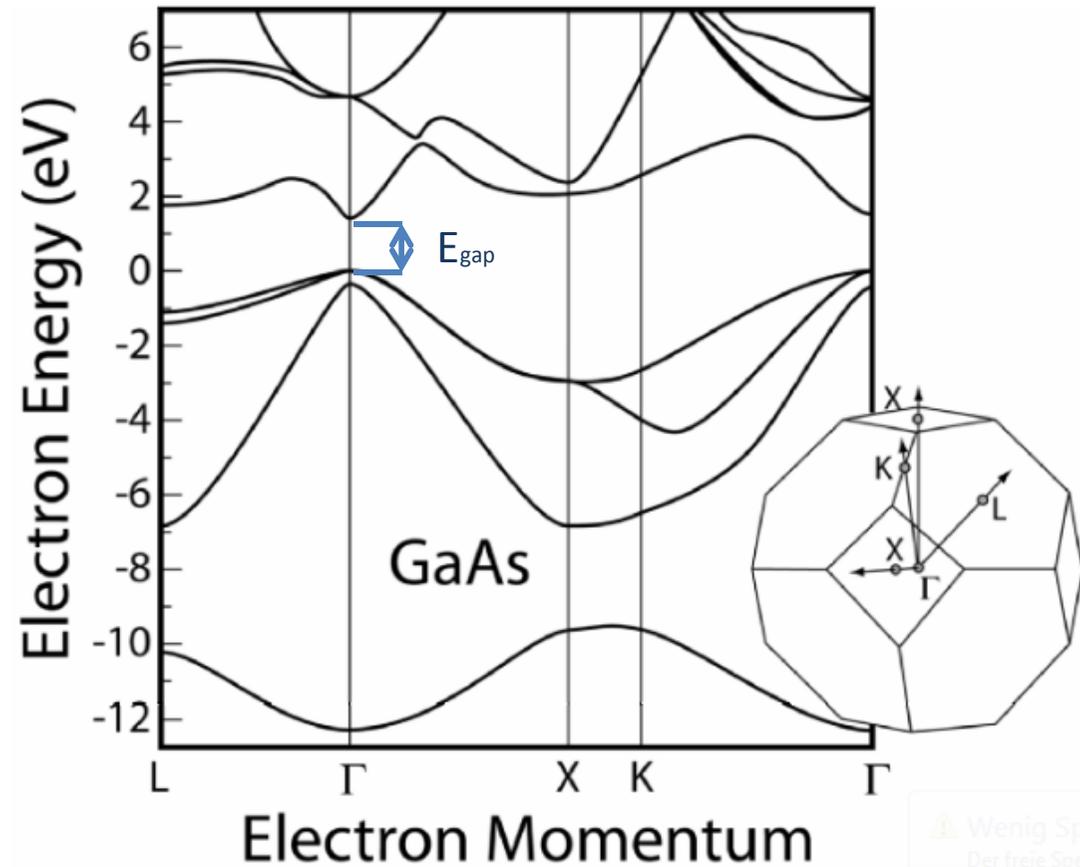
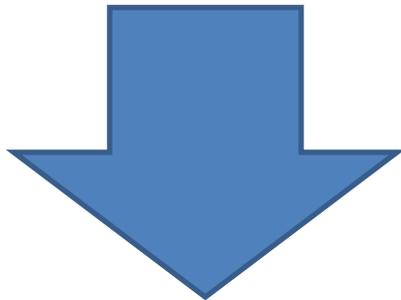


Zustandsdichte:  $D(E) = \frac{(2m)^{3/2}}{2\pi^2\hbar^3} \sqrt{E}$



Modifiziert durch:

- Periodizität des Kristalls
- Gitterpotential



Bandstruktur von Galliumarsenid  
(Angus Rockett, 2008)

**Bandstruktur im Impulsraum**



## Elektronen und Löcher

$$n = \int D_L(E) f(E) dE$$

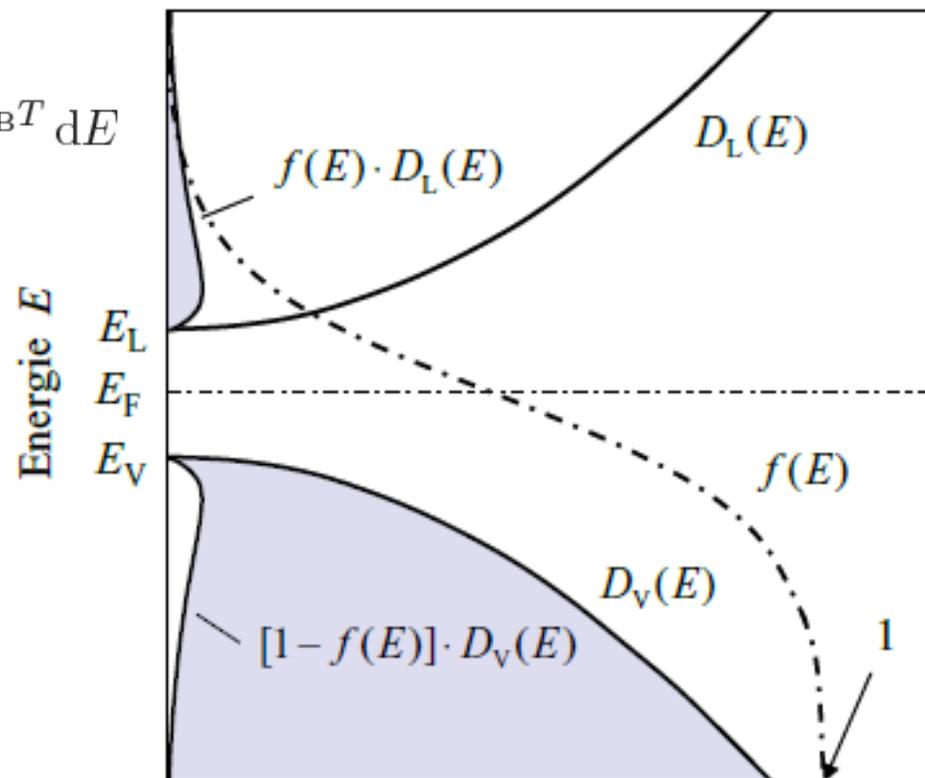
$$= \frac{(2m_n^*)^{3/2}}{2\pi^2 \hbar^3} e^{E_F/k_B T} \int_{E_L}^{\infty} \sqrt{E - E_L} e^{-E/k_B T} dE$$

(Boltzmann – Näherung)

$$n = 2 \left( \frac{m_n^* k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{-(E_L - E_F)/k_B T}$$

$$p = 2 \left( \frac{m_p^* k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{(E_V - E_F)/k_B T}$$

(Für nicht dotierte HL)



Zustandsdichte  $D(E)$ , Fermi-Funktion  $f(E)$

(Hunklinger Siegfried, 2009)



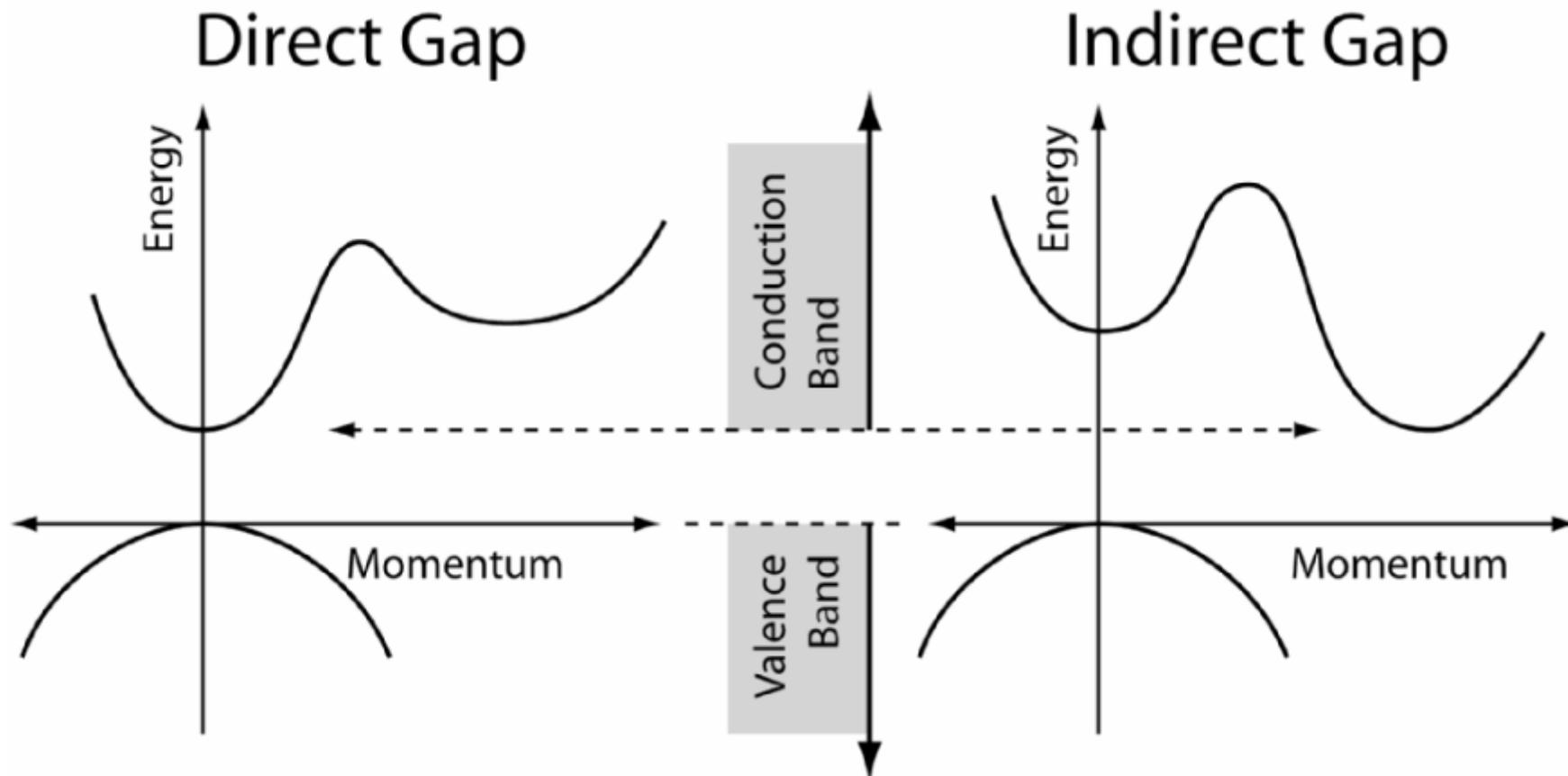
**Fermienergie:** Höchste Energie eines Elektrons im Grundzustand des Gesamtsystems

Aus  $n = p$  folgt:

$$E_F = \frac{E_L + E_V}{2} + \frac{3}{4} k_B T \ln \left( \frac{m_p^*}{m_n^*} \right)$$



## Direkte und Indirekte Halbleiter

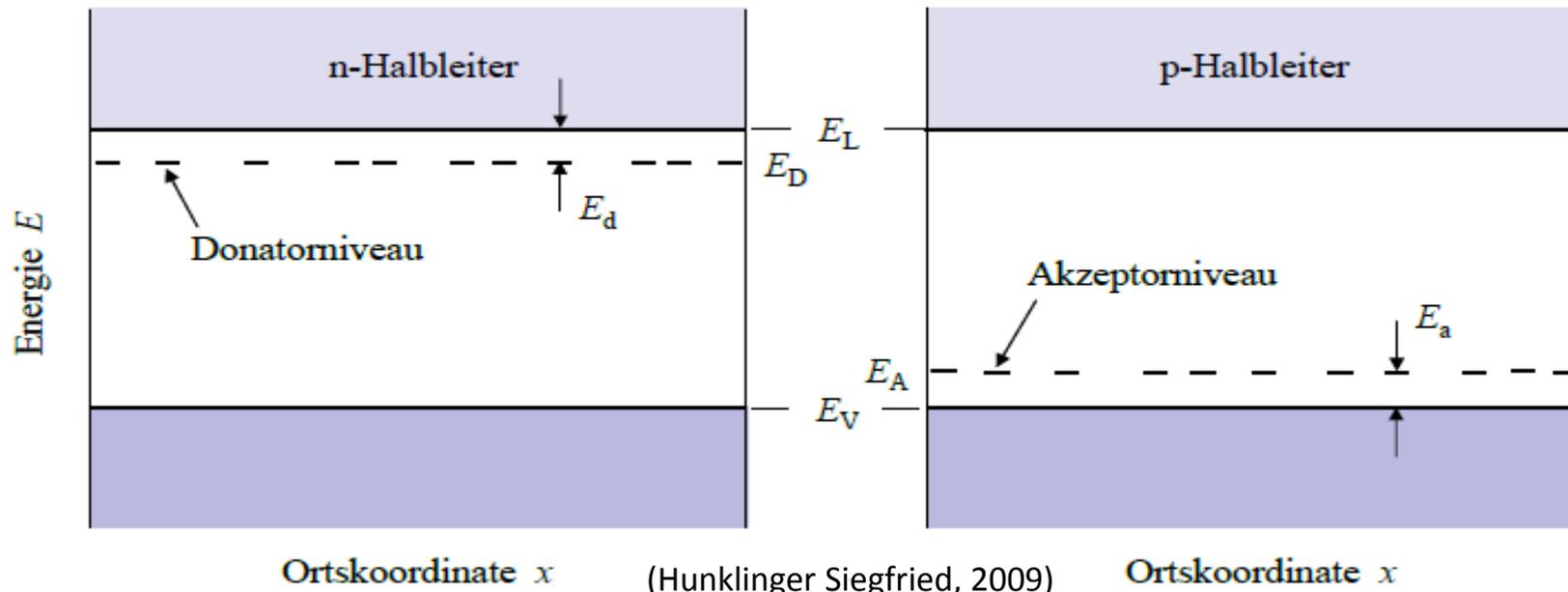


(Angus Rockett, 2008)



## Dotieren: Gezieltes Einbringen von Fremdatomen zur Veränderung der Ladungsträgerdichte

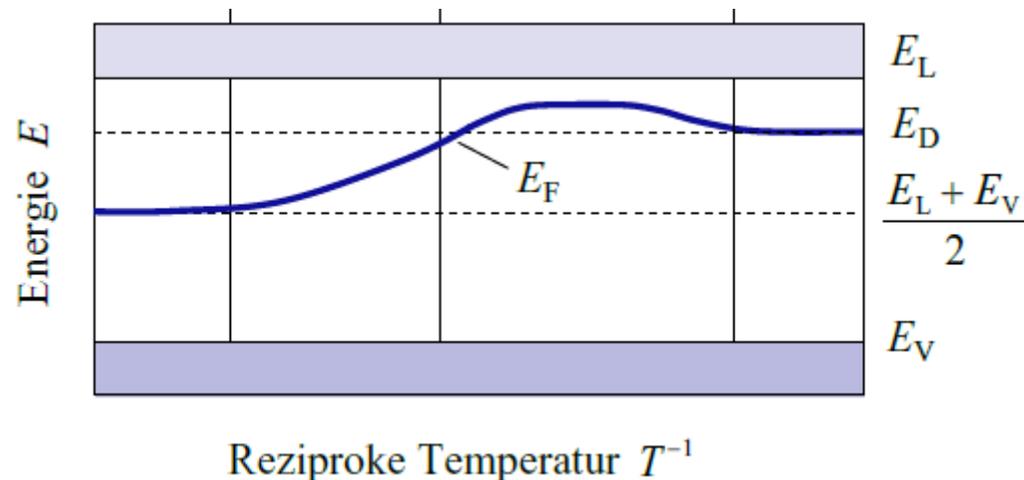
Wasserstoffmodell: 
$$E_D = -\frac{1}{2} \frac{m^* e^4}{(4\pi\epsilon_r\epsilon_0)^2 \hbar^2} \cdot \frac{1}{\nu^2}$$



(Hunklinger Siegfried, 2009)



## Fermienergie in dotierten Halbleitern:



(Hunklinger Siegfried, 2009)

Tendenz in Richtung des Donator/Akzeptorniveaus

Starke Dotierung verschiebt Fermienergie in Leitungs- bzw. Valenzband

# a) Halbleiter: p-n - Übergang

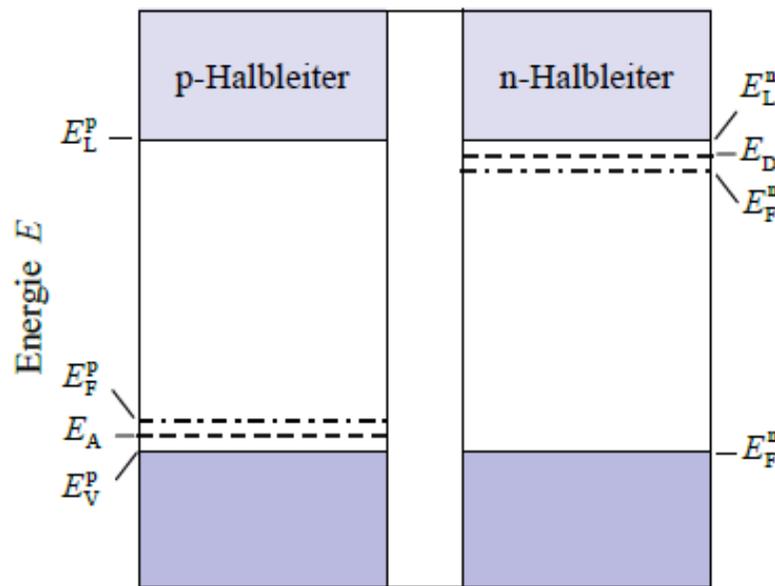


Selbes Material, unterschiedliche Dotierung

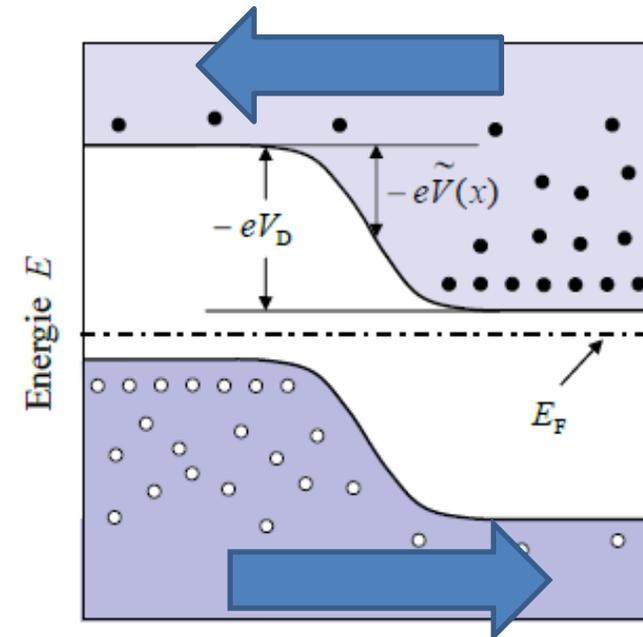


- Unterschiedliche Ladungsträgerkonzentration
- Unterschiedliche Fermienergie

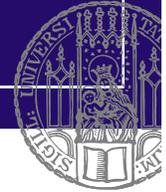
## Resultat: Diffusionsstrom



Ortskoordinate  $x$  (Hunklinger Siegfried, 2009)



Ortskoordinate  $x$



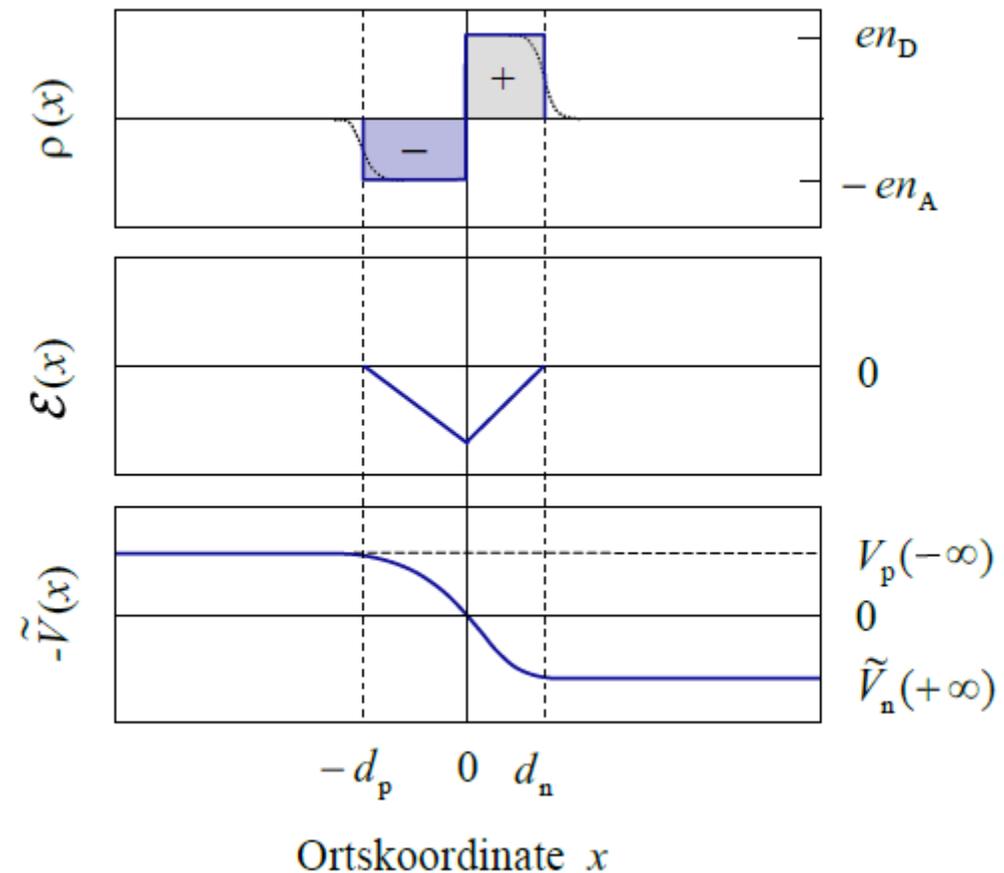
## Räumliche Ladungstrennung erzeugt Spannung

**Kompensation des  
Diffusionsstroms  
durch Feldstrom**

$$j^f + j^d = 0$$

$$|j^d| = a(T) e^{-eV_D/k_B T}$$

**Feldstrom nahezu unabhängig von  
Diffusionsspannung**

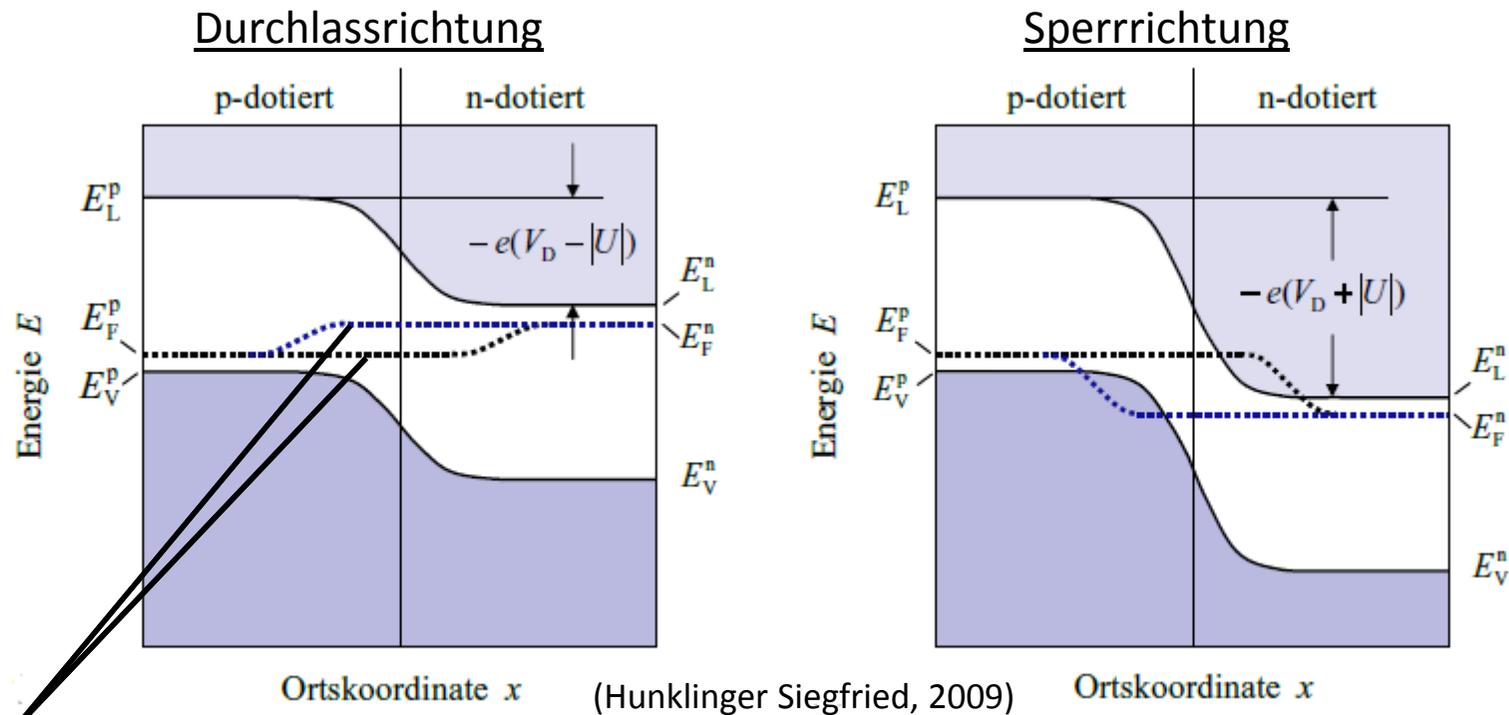


(Hunklinger Siegfried, 2009)

# a) Halbleiter: p-n - Übergang



## Spannung am p-n- Übergang



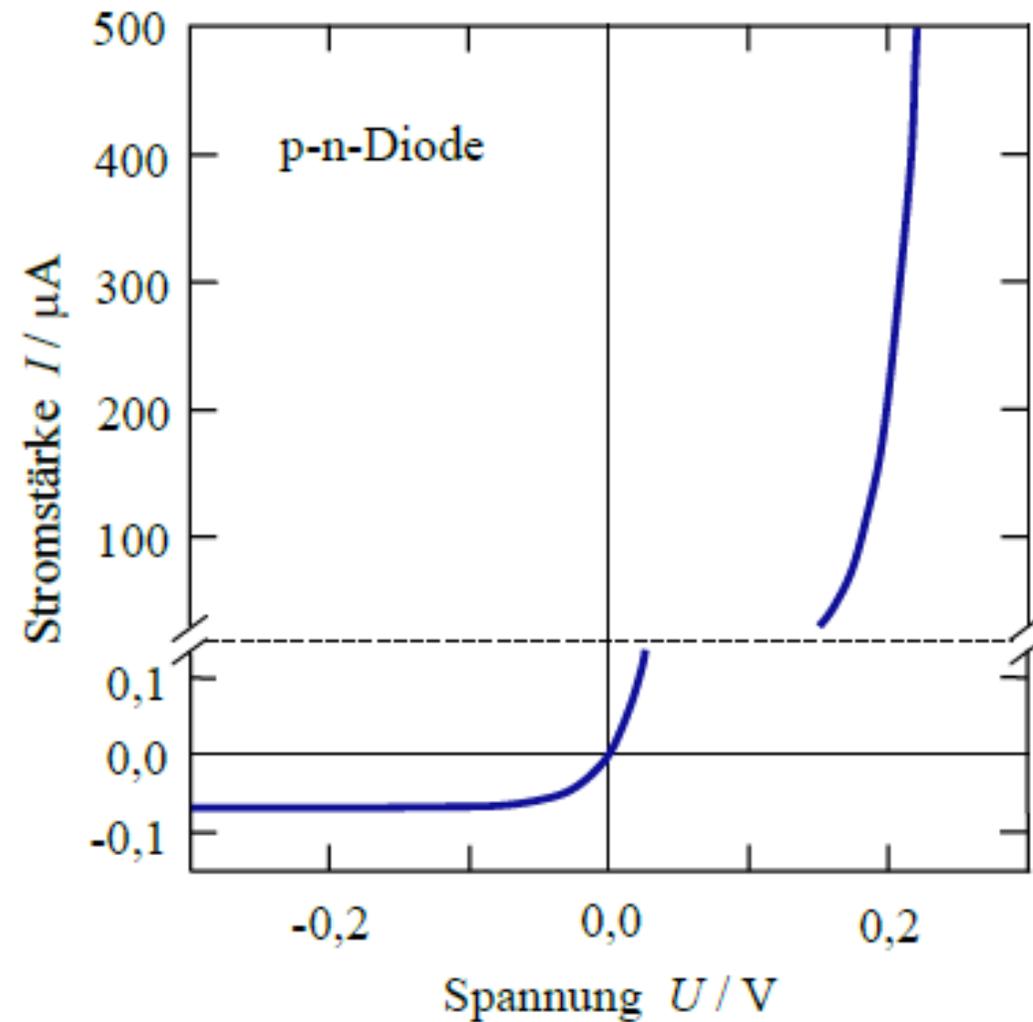
Quasiferminiveaus

**Vergrößerung bzw. Verkleinerung der Diffusionsspannung**

# a) Halbleiter: p-n - Übergang



$$|j^d| = a(T) e^{-eV_D/k_B T}$$



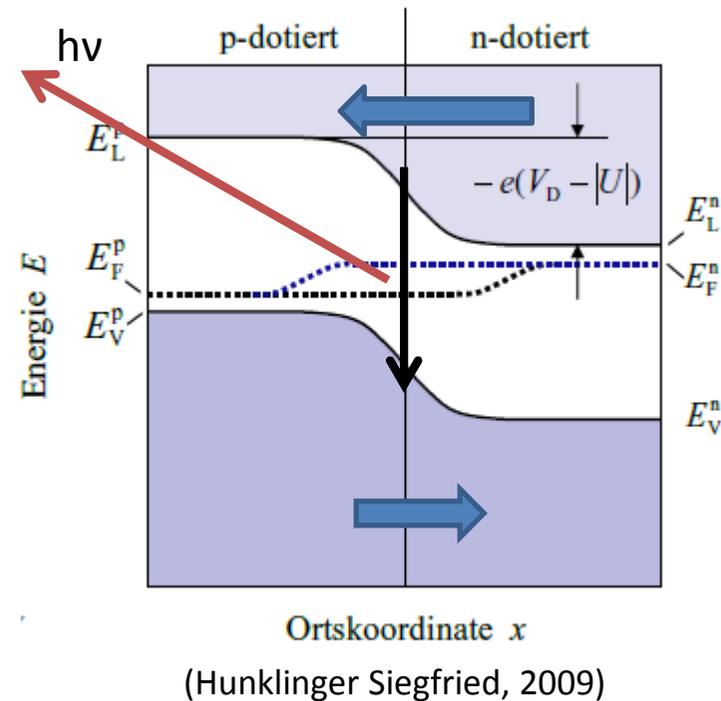


## Betrieb in Durchlassrichtung

Rekombination nach  
Rekombinationszeit  $\mathcal{T}$  (Bei GaAs ca. 1ns)

Für GaAs ist  
Rekombinationslänge  
 $d \approx 1 \mu\text{m}$

**Spontane Emission!**





## Wie erreicht man Ladungsinversion an Bandkanten?

$$f(E = E_L) > f(E = E_V)$$

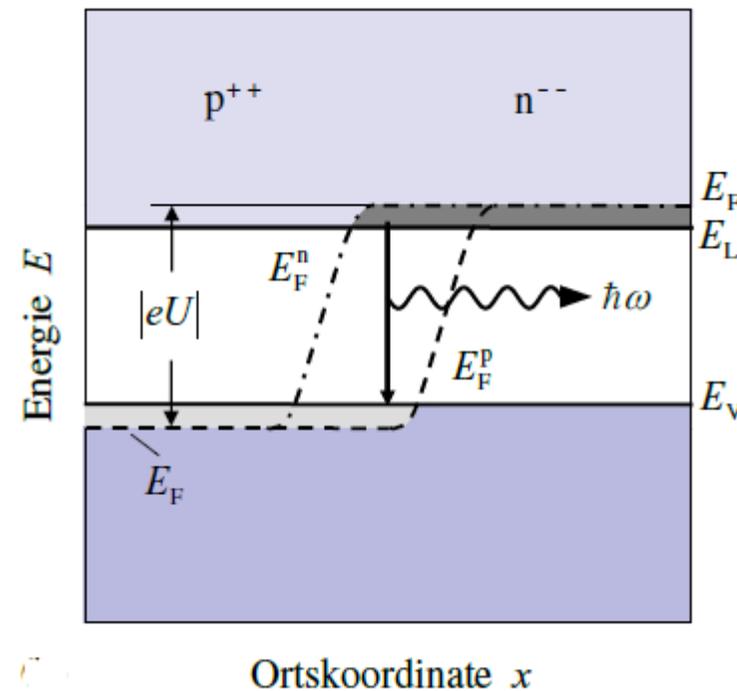
$$f(E_L) = [1 + \exp(E_L - E_F^n)/k_B T]^{-1}$$

$$f(E_V) = [1 + \exp(E_V - E_F^p)/k_B T]^{-1}$$



$$E_F^n - E_F^p > E_L - E_V = E_g$$

**Starke Dotierung benötigt!**

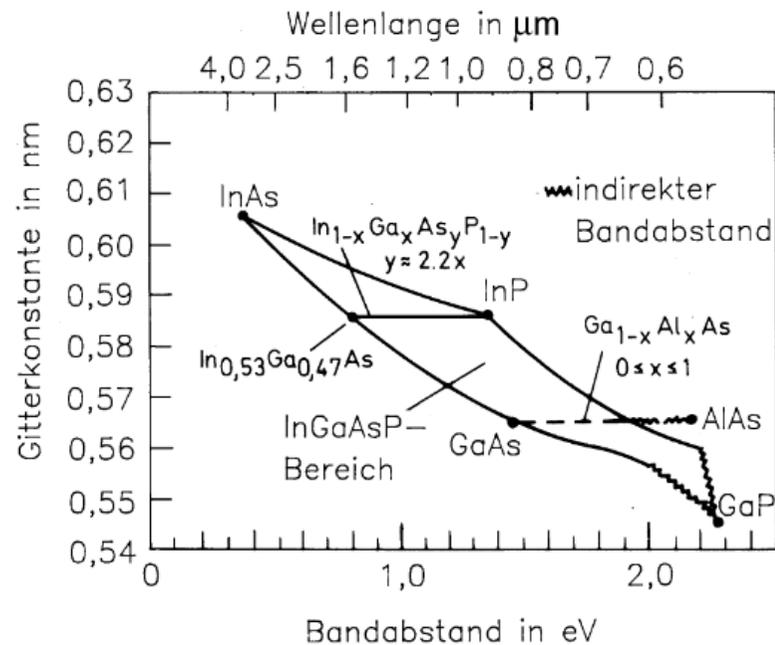


(Hunklinger Siegfried, 2009)

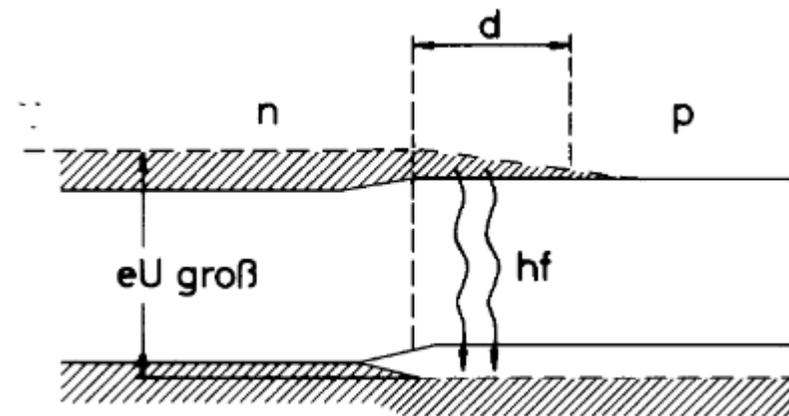
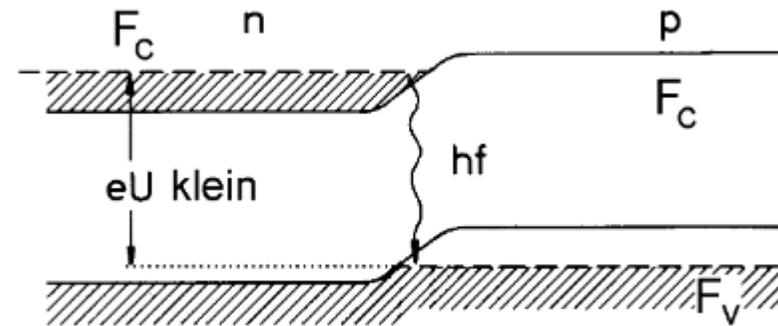


Verstärkung ist spannungs- bzw. stromabhängig

Größe der Bandlücke bestimmt Wellenlänge



(Jürgen Eichler, 2006)



(Jürgen Eichler, 2006)

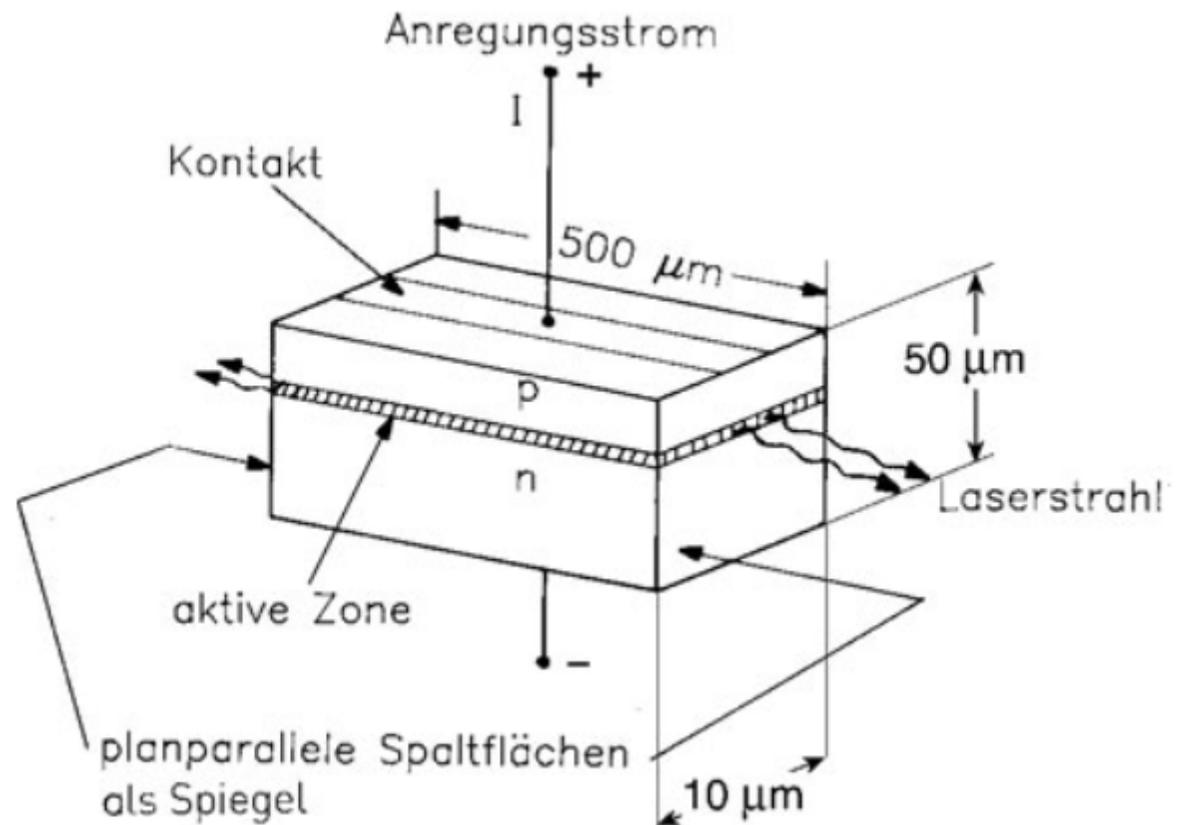


Einfachste Bauform:

## Homostruktur

### Nachteile:

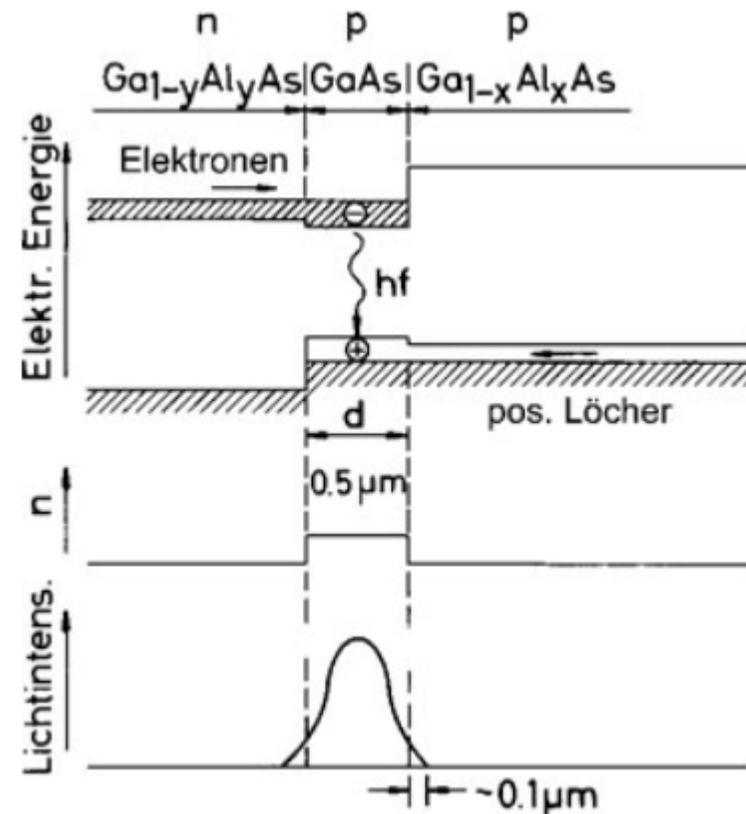
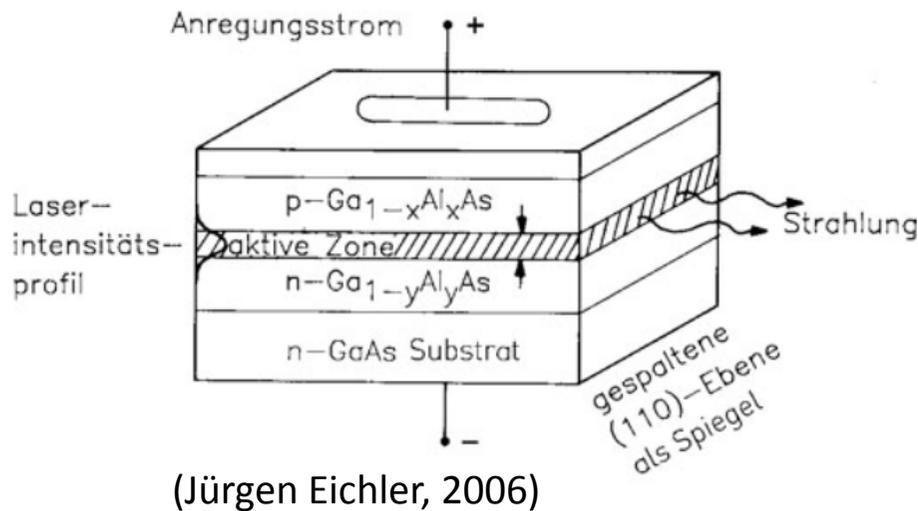
- Hoher Injektionsstrom
- Kontinuierlicher Betrieb nicht möglich



(Jürgen Eichler, 2006)



## Doppel-Heterostruktur



**Verhinderter Abfluss von Ladungsträgern**  
(electrical confinement)

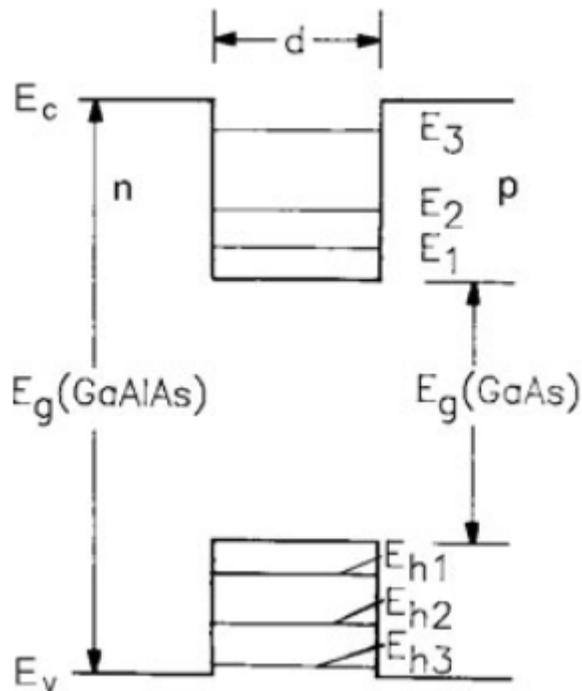
**Verbesserte Strahlführung durch unterschiedliche Brechungsindizes**  
(optical confinement)

- Stark verringerter Injektionsstrom
- Dauerbetrieb

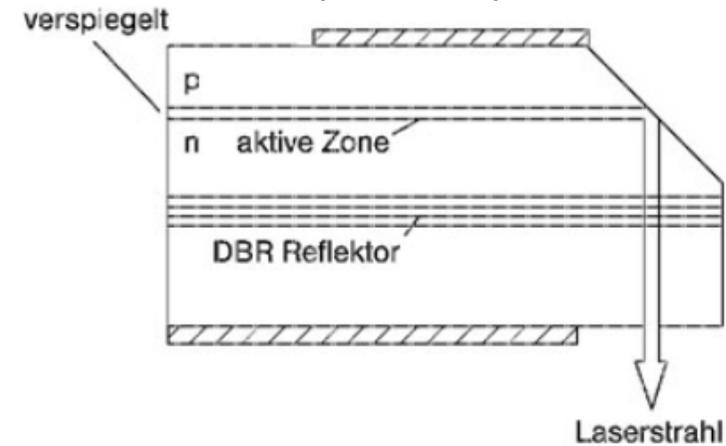


Weitere Typen:

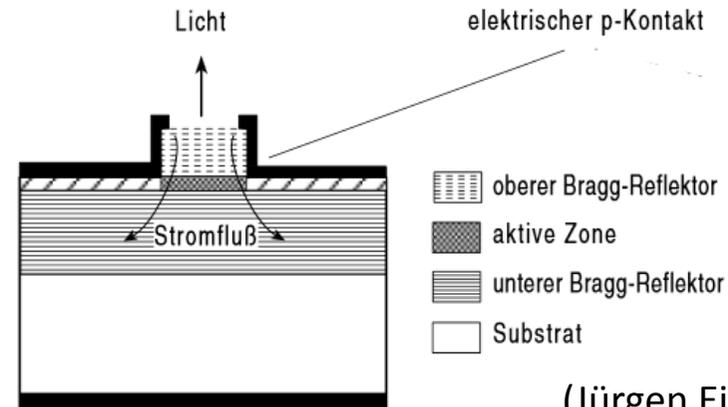
Quantengrabenlaser



Horizontal-cavity surface-emitting Laser (HCSEL)



Oberflächenemitter (VCSEL)

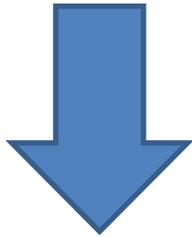


(Jürgen Eichler, 2006)

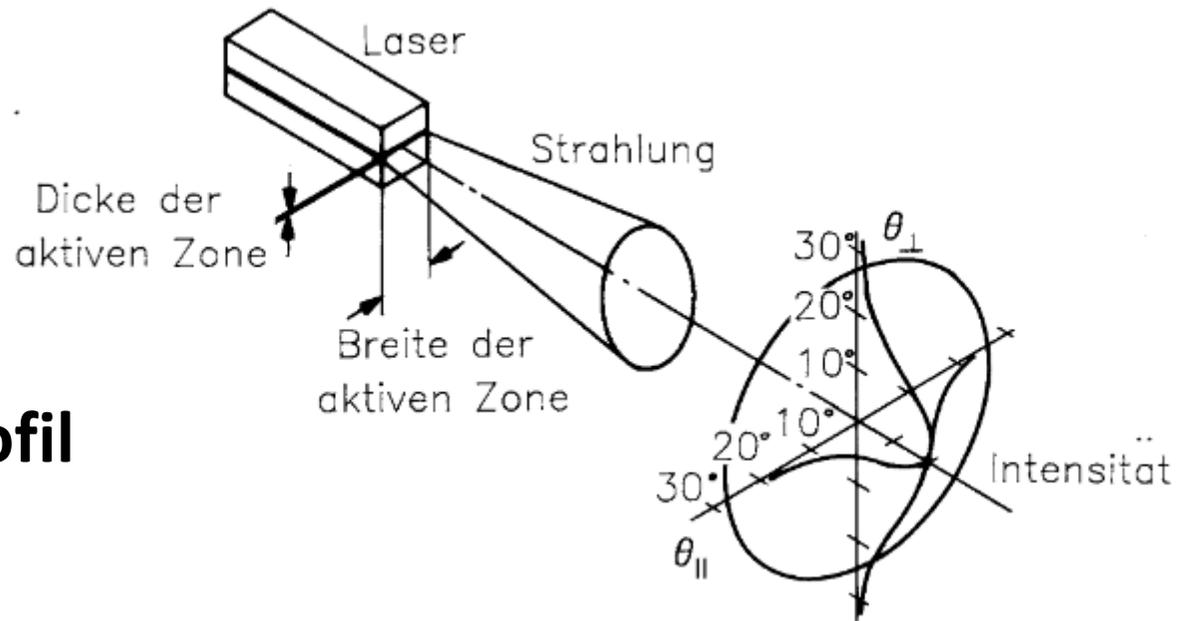


Für Kantenemitter:

Zonendicke  $\ll$  Zonenbreite



**Elliptisches Strahlprofil**



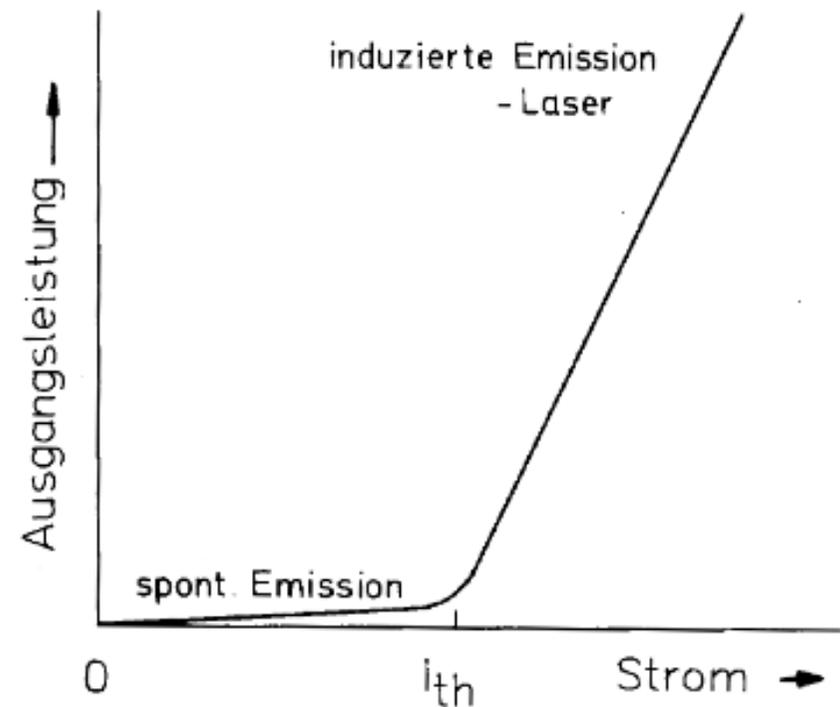
(Jürgen Eichler, 2006)



## Typische Leistungen im unteren Wattbereich (Einzelemitter)

Ausgangsleistung stark abhängig von:

- Anliegender Spannung
- Temperatur



(Jürgen Eichler, 2006)

Zusammenfassen vieler Einzelemitter zur Leistungssteigerung



## Enorme wirtschaftliche Bedeutung

- Informationsübertragung
- Datenspeicherung
- Pumplaser
- Materialbearbeitung
- Laserdrucker
- Sensortechnik
- Scanner



LUDWIG-  
MAXIMILIANS-  
UNIVERSITÄT  
MÜNCHEN

# Quellenangabe



- Laser: Bauformen, Strahlführung, Anwendungen, Jürgen Eichler, Joachim Eichler, 2006
- Festkörperphysik, Hunklinger Siegfried, 2009
- Laser Physics, Peter Milonni, Joseph Eberly, 2010
- The Materials Science of Semiconductors, Angus Rockett, 2008
- <http://www.roithner-laser.com/>

**Vielen Dank für eure Aufmerksamkeit**