

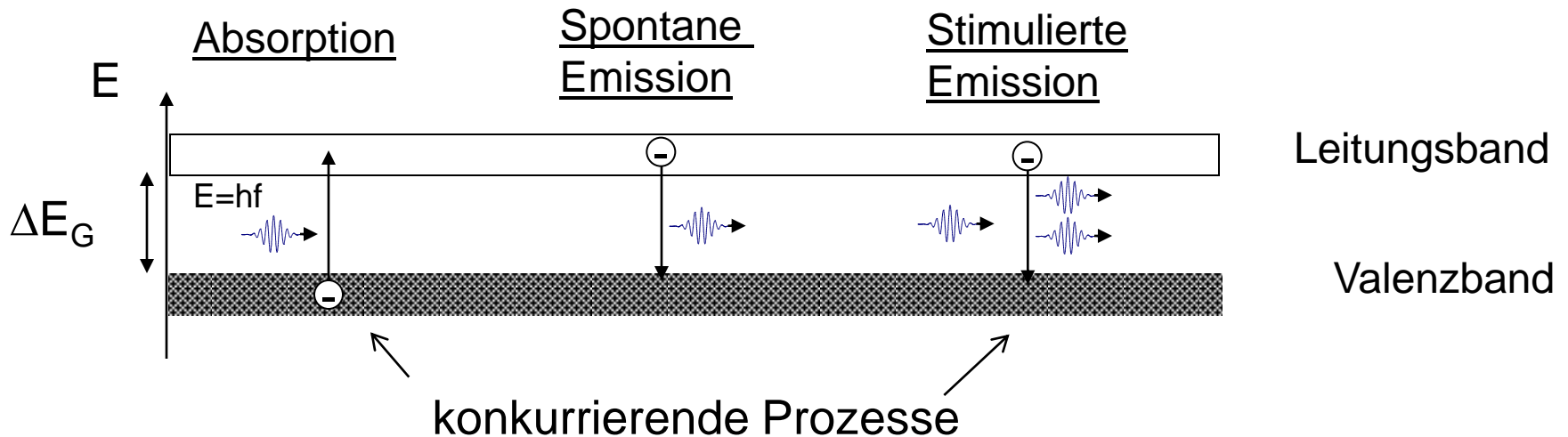
7 Halbleiterlaser

Einführung und Überblick

- Einführung Laser
- Grundlagen, 1. und 2. Laserbedingung
- Halbleiterlaser -- Injektionslaser
- Laseraufbau, Bauformen
- Kennzahlen von Laserdioden
- Weiterführende Laserkonzepte

Laser: Stimulierte Emission

Stimulierte Emission vs. Absorption und spontane Emission



Bedingung für vorwiegend Stimulierte Emission ???

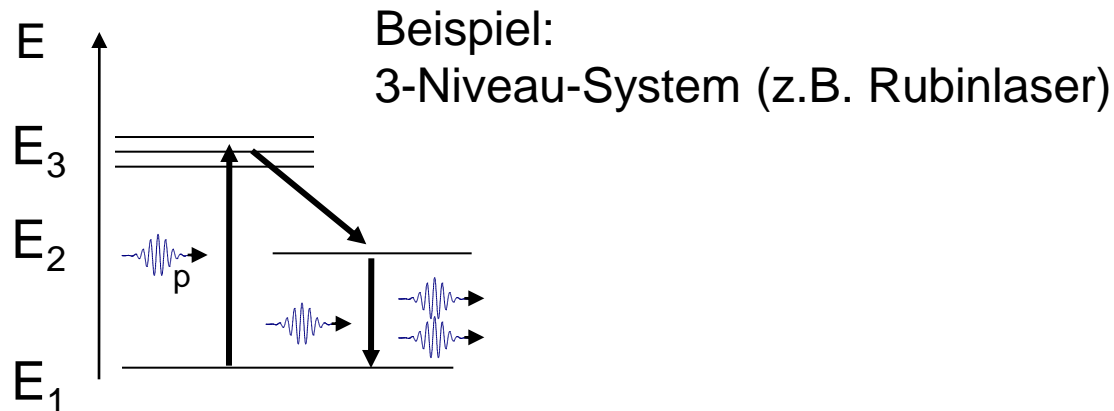
wenn diese Bedingung erfüllt, dann:

Laser: „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“

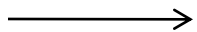
Grundlagen

1. Laserbedingung

„Inversionsbedingung“ (beim Laser im Allgemeinen)



Absorption $E_1 \rightarrow E_2$ vs. Stimulierte Emission $E_2 \rightarrow E_1$
Konkurrenzprozesse



$$N_2 > N_1$$

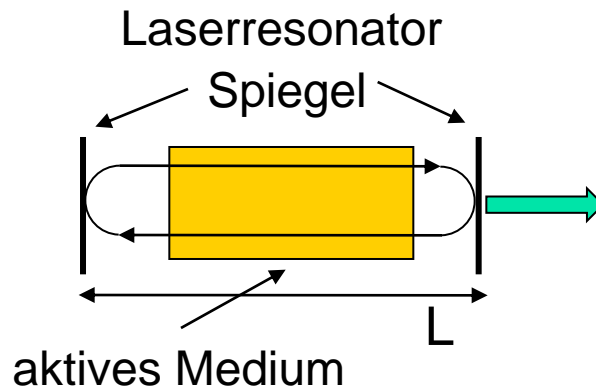
Besetzungsinversion

N_1 : Zahl der Elektronen im Zustand 1
 N_2 : Zahl der Elektronen im Zustand 2

Grundlagen

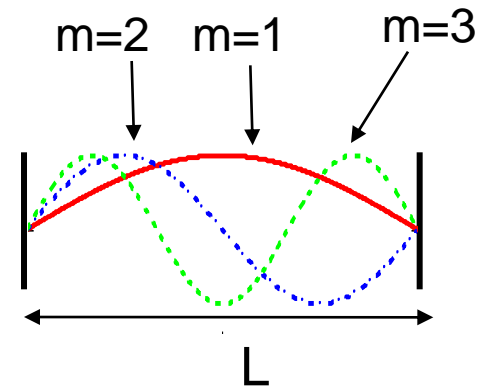
2. Laserbedingung

„Selbsterregungs- bzw. Resonatorbedingung“



Verluste < Gewinn (Verstärkung)

$$\alpha_i + \alpha_R = g_{th} < g$$



Stehende Wellen
(konstruktive Interferenz)

$$L = \frac{m\lambda^*}{2}; \quad \lambda_m = \frac{2n^*L}{m}$$

$$m=1,2,3\dots$$

Besetzungsinversion im Halbleiterlaser im Nicht-Gleichgewicht

1. Halbleiter im Gleichgewicht:

$$n_0 = n_i e^{\frac{E_F - E_i}{k_B T}} \quad p_0 = n_i e^{\frac{E_i - E_F}{k_B T}} \quad n_0 p_0 = n_i^2$$

2. Halbleiter im Nicht-Gleichgewicht:

$$n = n_0 + \Delta n = n_i e^{\frac{E_{Fn} - E_i}{k_B T}} \quad p = p_0 + \Delta p = n_i e^{\frac{E_i - E_{Fp}}{k_B T}} \quad np = n_i^2 e^{\frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{kT}} > n_i^2$$

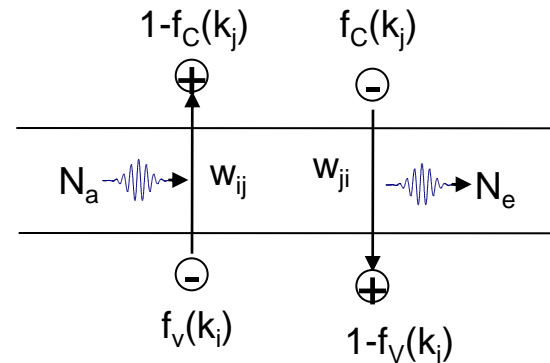
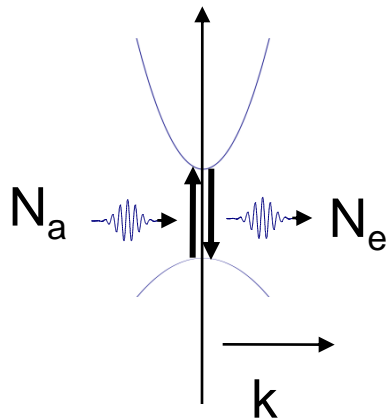
Nichtgleichgewicht, erzeugt durch Injektion von Ladungsträgern:

$$E_{Fn} - E_{Fp} > 0$$

Wie groß muss $E_{Fn} - E_{Fp}$ sein, damit Inversion hergestellt ist ?

Besetzungsinversion

Absorption und stimulierte Emission sind Konkurrenzprozesse



Photonendichten :

$$\text{absorbierte Ph.: } N_a = A_a u(\nu) \Delta \nu w_{ij} f_v(k_i) (1 - f_c(k_j))$$

$$\text{st. emittierte Ph.: } N_e = A_e u(\nu) \Delta \nu w_{ji} f_c(k_j) (1 - f_v(k_i))$$

Forderung

(für stimulierte Emission):

$$N_a < N_e$$

ν : Lichtfrequenz

$u(\nu) \Delta \nu$: spektrale Energiedichte im Resonator

$w_{ij} = w_{ji}$: Übergangswahrscheinlichkeiten

$A_a = A_e$: Übergangskoeffizienten

f_v, f_c : Fermi-Verteilungen

Besetzungsinversion

Forderung (für stimulierte Emission): $N_a < N_e$

$$\longrightarrow f_v(k_i)(1 - f_c(k_j)) < f_c(k_j)(1 - f_v(k_i))$$

Fermi-Verteilungen: $f_v(E_v(k_i)) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E_v(k_i) - E_{Fp}}{k_B T}}}$

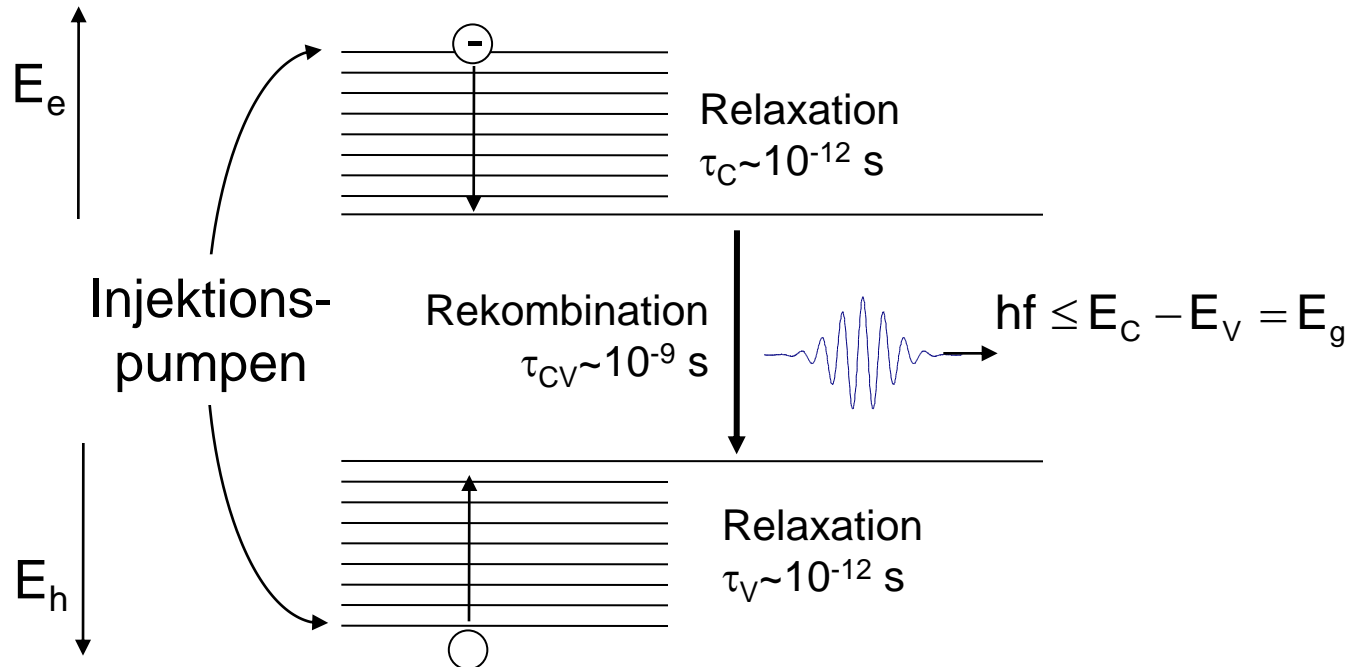
$$f_c(E_c(k_j)) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E_c(k_j) - E_{Fn}}{k_B T}}}$$

$$\longrightarrow E_{Fn} - E_{Fp} > E_c(k_j) - E_v(k_i) = E_g$$

Die Fermi-Energien liegen in „ihren“ Bändern !

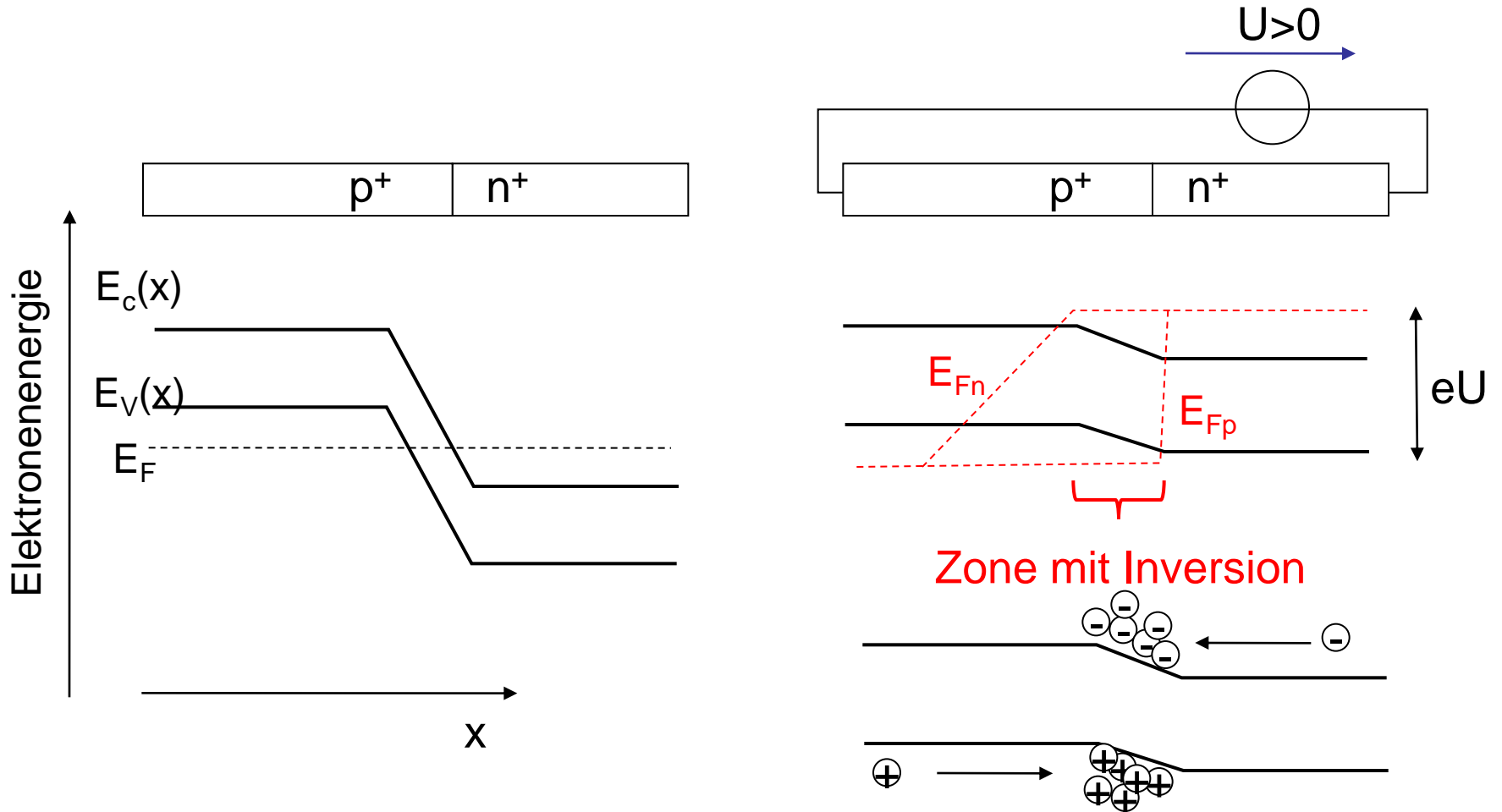
Energiebandschema des Injektionslasers

Halbleiterlaser = Vier-Niveau-Laser

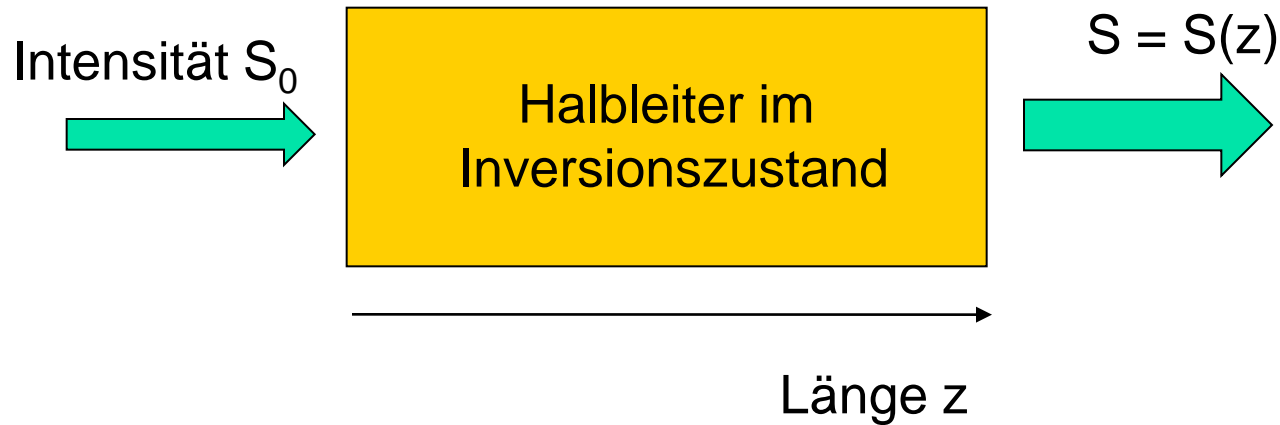


Injektion von Ladungsträgern: Erzeugung von Inversion

einfachste Realisierung: p^+n^+ Übergang mit $N_D \gg N_A$



Optische Verstärkung



Intensität nach Durchlaufen
des Halbleiters (steigt exponentiell an):

$$S(z) = S_0 e^{(g(hf)z)}$$

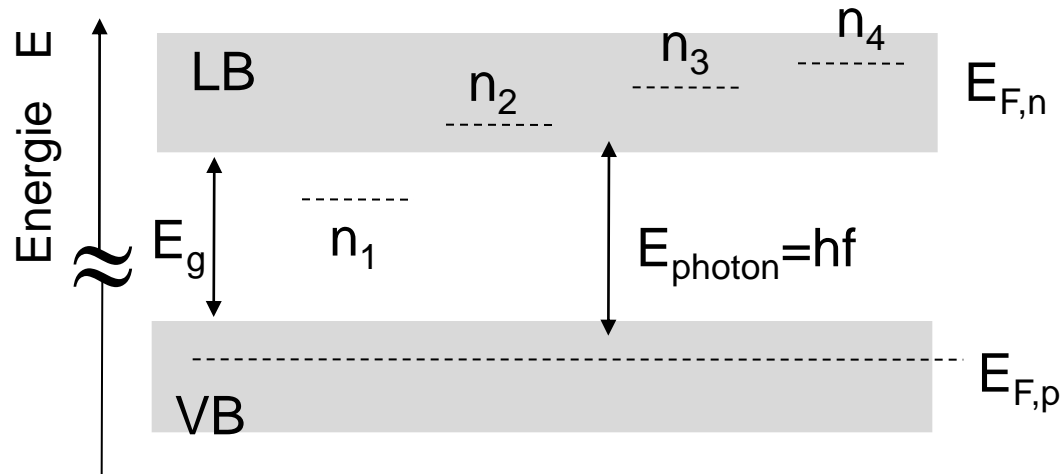
$g(hf)$: optischer Gewinn (Verstärkung, gain)

Definition Intensität
(Bestrahlungsstärke):

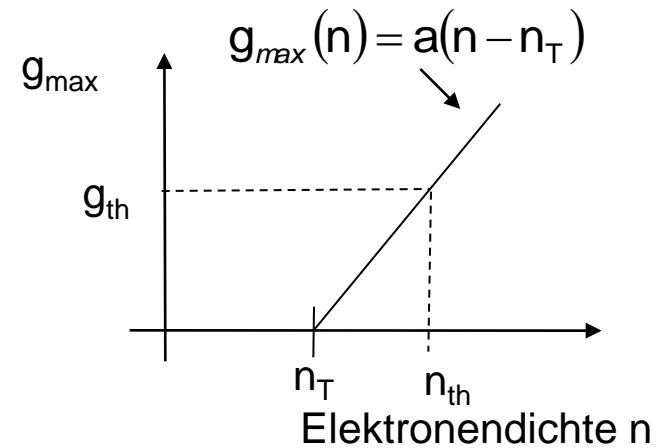
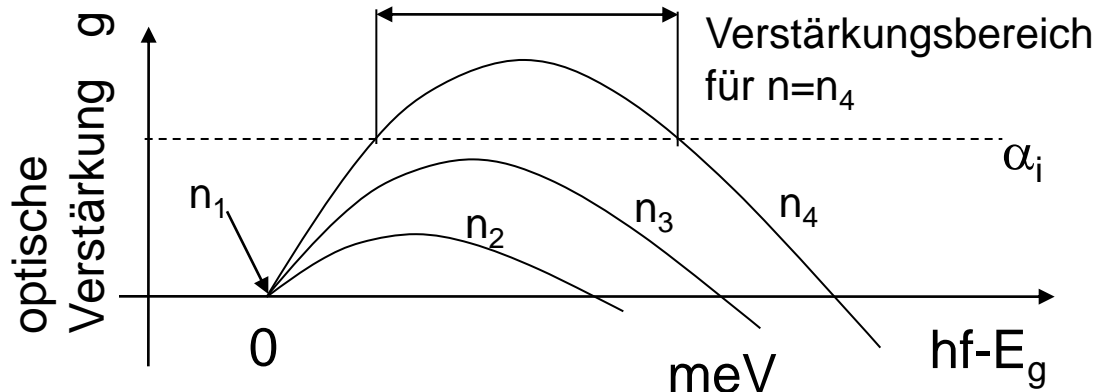
$$S = E_{e,v} = \frac{\Phi_{e,v}}{A}$$

Ladungsträgerdichte, Optischer Gewinn und Verluste

$E_{F,n}$ als Funktion der Elektronendichte n_x ($p=\text{konst.}$)



Resultierende Verstärkungsprofile



n_T : Transparenzdichte

n_{th} : Schwellendichte

$$S(z) = S_0 e^{((g(hf) - \alpha_i)z)}$$

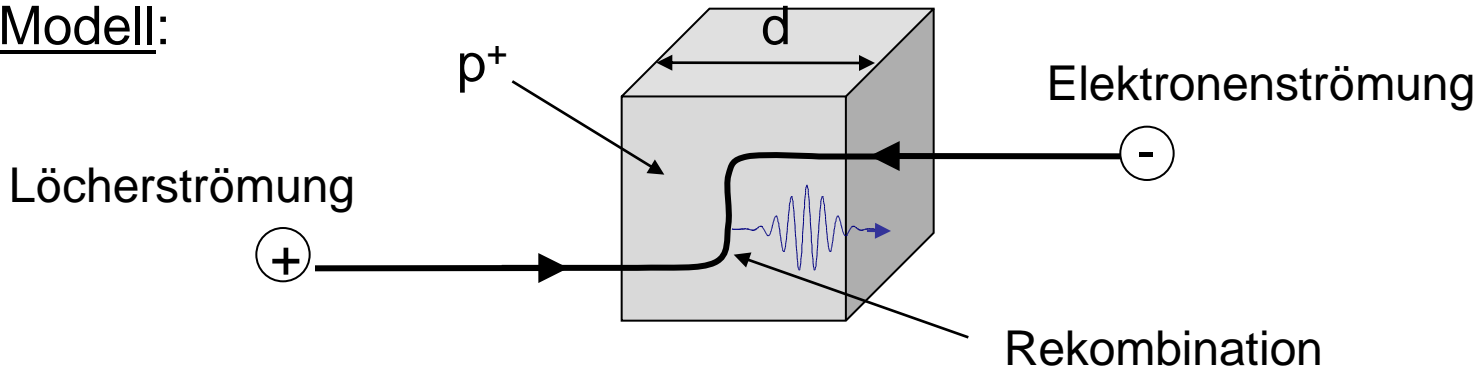
$$g_{\text{th}} \equiv g_{\text{max}}(n = n_{\text{th}}) = \alpha_i$$

$$\alpha_i = a(n_{\text{th}} - n_T)$$

$$n_{\text{th}} = n_T + \alpha_i / a$$

Stromanregung und Schwellstromdichte

Modell:



Schwellstromdichte:

$$J_{th} = \frac{ed}{\tau_n} n_{th} = \frac{ed}{\tau_n} \left(n_T + \frac{\alpha_i}{a} \right)$$

τ_n : Lebensdauer der
Minoritätsladungsträger

Realer Laser:

$$J_{th} = \frac{ed}{\Gamma_{el} \gamma_n \tau_n} n_{th}$$

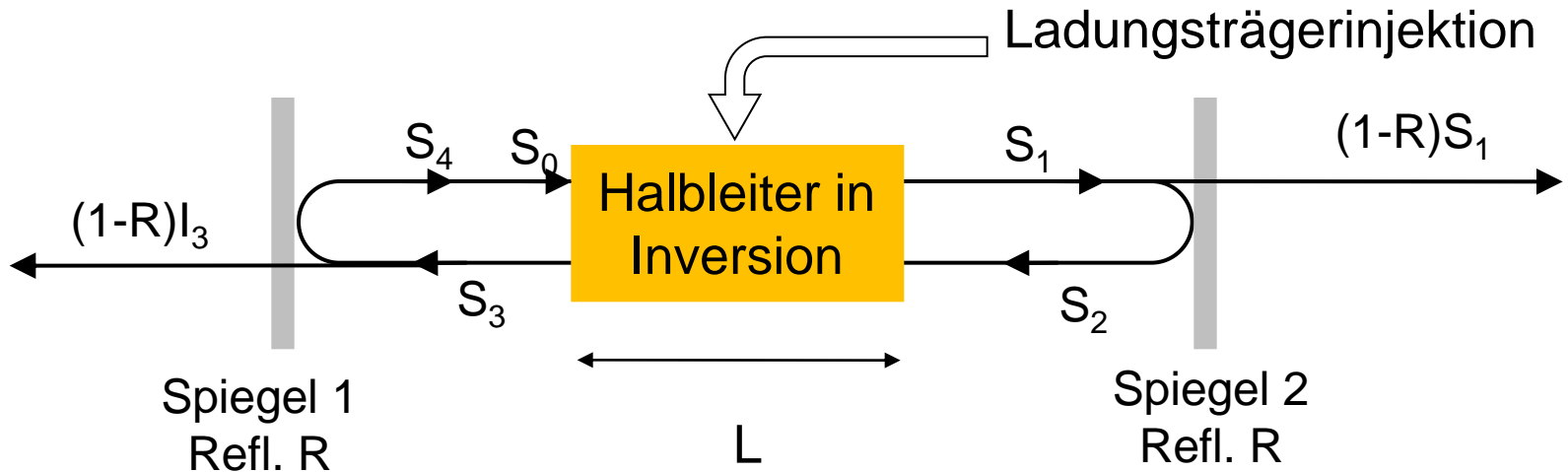
γ_n : Injektionseffizienz

Γ_{el} : Ladungsträgereinschluss
($\Gamma_{el}=0 \dots 1$)

Schlussfolgerung:

- Verstärkung wenn $J > J_{th}$
und Licht geeigneter Wellenlänge eingestrahlt
- $\Delta J = J - J_{th}$ liefert Träger zur stimulierten Verstärkung

Halbleiterlaser als Oszillator Modell



$$S_1 = S_0 e^{(g-\alpha_i)L}$$

$$S_2 = S_1 R$$

$$S_3 = S_2 e^{(g-\alpha_i)L}$$

$$S_4 = S_3 R$$

$$S_4 = S_0 R^2 e^{(g-\alpha_i)2L}$$

Spiegel: Kristallendflächen ($n^*=3,59$, GaAs)

$$R = \left(\frac{n^* - 1}{n^* + 1} \right)^2 = 0,32$$

$$\alpha_R = -\frac{1}{L} \ln(R)$$

längenbezogener
Resonatorverlust

$$S_4 = S_0 e^{[g-(\alpha_i+\alpha_R)2L]}$$

Halbleiterlaser als Oszillator

Schlussfolgerungen

Anschwingen: $S_4 > S_0$ \longrightarrow $g > \alpha_i + \alpha_R \equiv g_{th}$

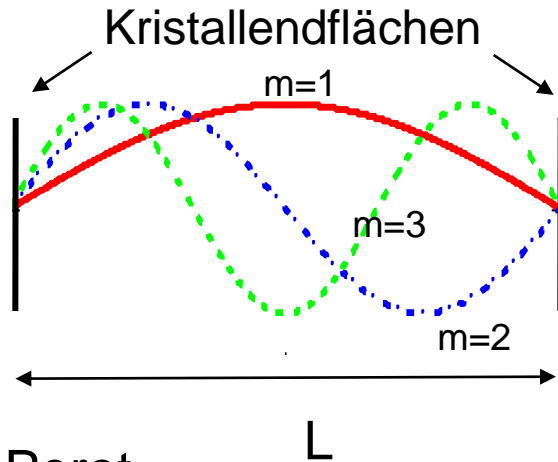
\longrightarrow Laserschwelle: $g_{th} = g(n = n_{th}) = \alpha_i + \alpha_R$

Stationärer Laserbetrieb: $S_4 = S_0$

$$g_{stationär} = g_{th}$$

$$n_{stationär} = n_{th}$$

2. Laserbedingung, Laserschwelle und Schwellstromdichte



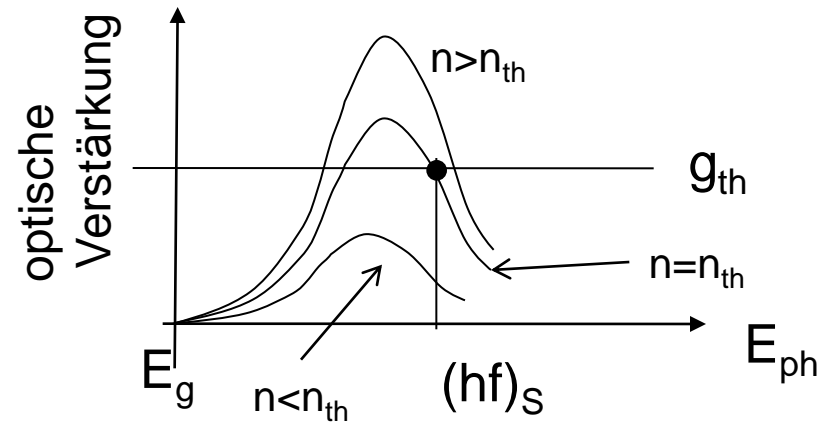
Fabry-Perot-
Bedingung

$$L = \frac{m\lambda^*}{2}; \quad \lambda_m = \frac{2n^*L}{m}$$

(longitudinale) Laserfrequenzmoden

$$f_m = m \frac{c}{2n^*L}; \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

$$\Delta f = f_{m+1} - f_m = \frac{c}{2n^*L}$$



$$\alpha_i + \alpha_R = g_{th} = g(n = n_{th}; hf = (hf)_s)$$

$$J > J_{th} = \frac{ed}{\tau_n} n_{th}$$

$$n_{th} = n_T + \frac{(\alpha_i + \alpha_R)}{a}$$

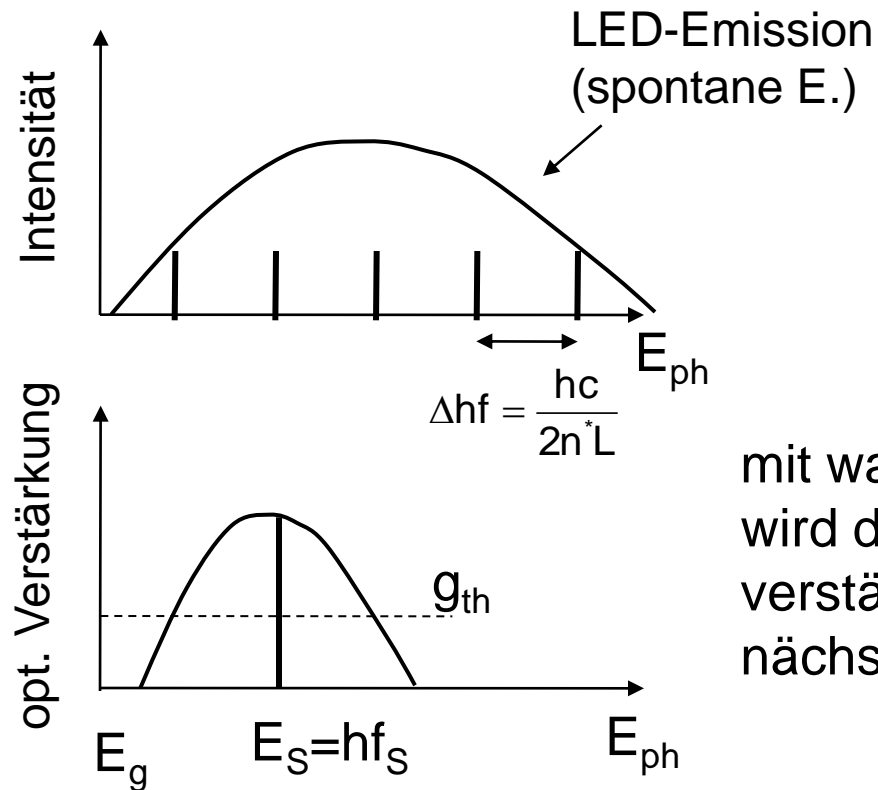


Laser schwingt auf einer
Mode an

Selbsterregung

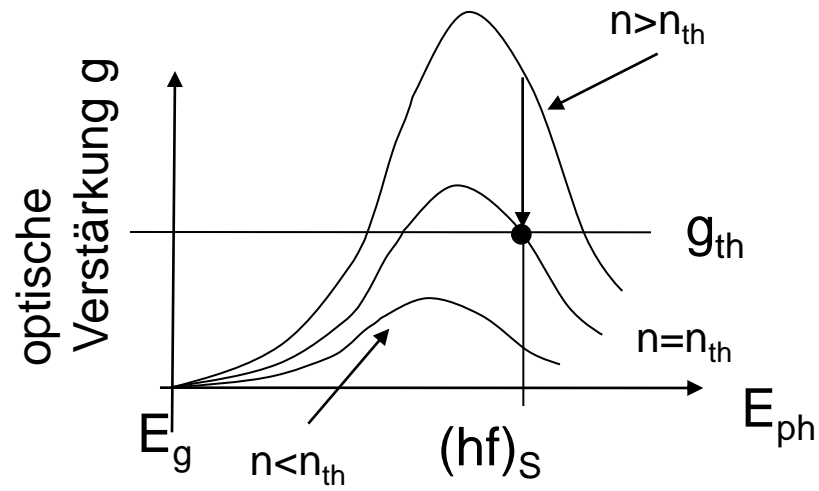
Selbsterregung

(Start: spontan emittierte Photonen)



mit wachender Stromdichte wird die Mode (die Moden) verstärkt, die g_{max} am nächsten liegt

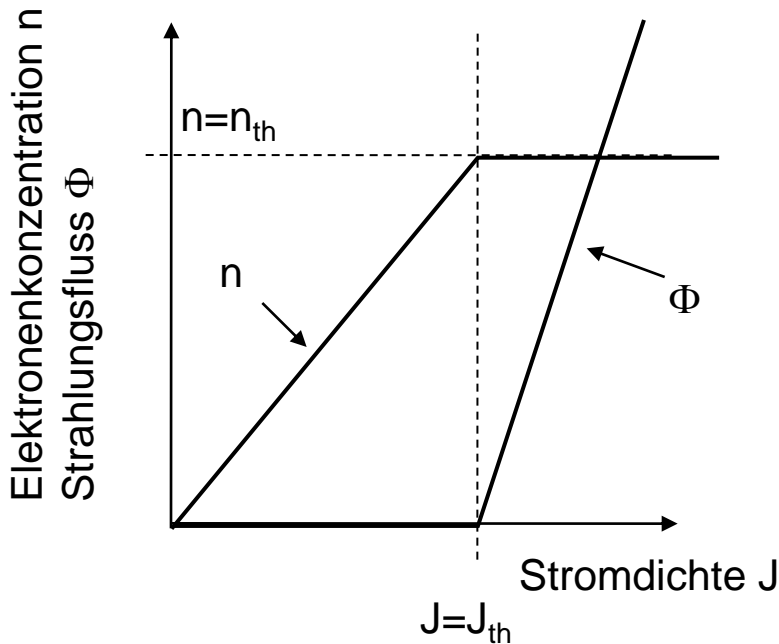
Verstärkungsregelung



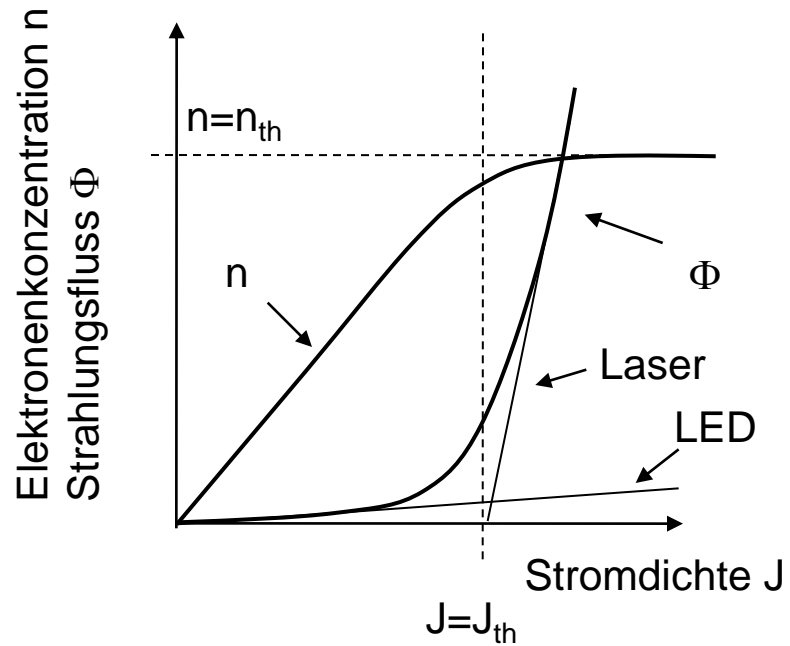
Beim Laser regelt sich die optische Verstärkung „automatisch“ auf die g_{th} ein, wenn $J > J_{th}$ ist

Halbleiterlaser - Kennlinie

ohne Berücksichtigung der spontanen Emission



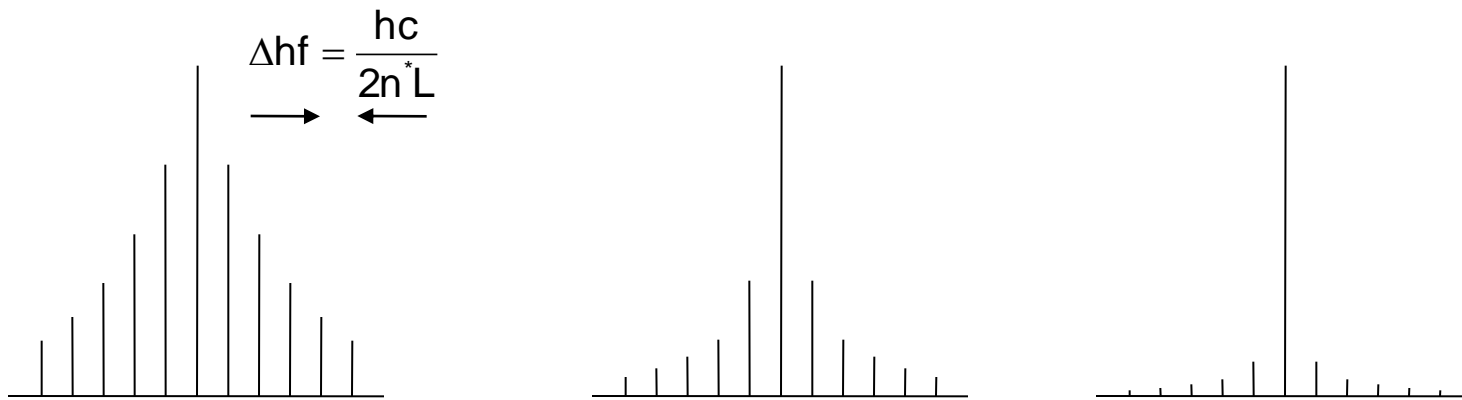
mit Berücksichtigung der spontanen Emission (reales Verhalten)



Einmoden- vs. Mehrmodenbetrieb

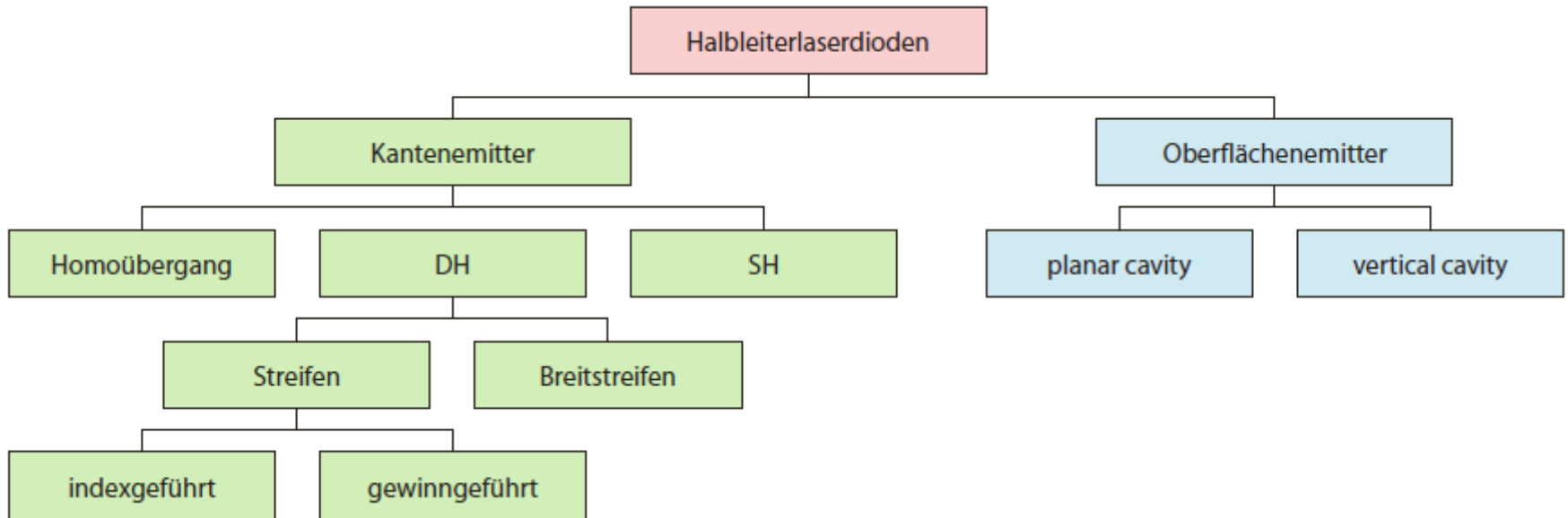
- keine spontane Emission: Laser emittiert eine Laserlinie
(,die mit der höchsten Verstärkung)
- spontane Emission: Laser emittiert Linienspektrum, alle Linien,
für die gilt: $g > g_{th}$,
einhüllende Kurve: spektrale Verstärkungskurve

Anteil der spontanen Emission fällt, J steigt



Technischer Aufbau von LDs

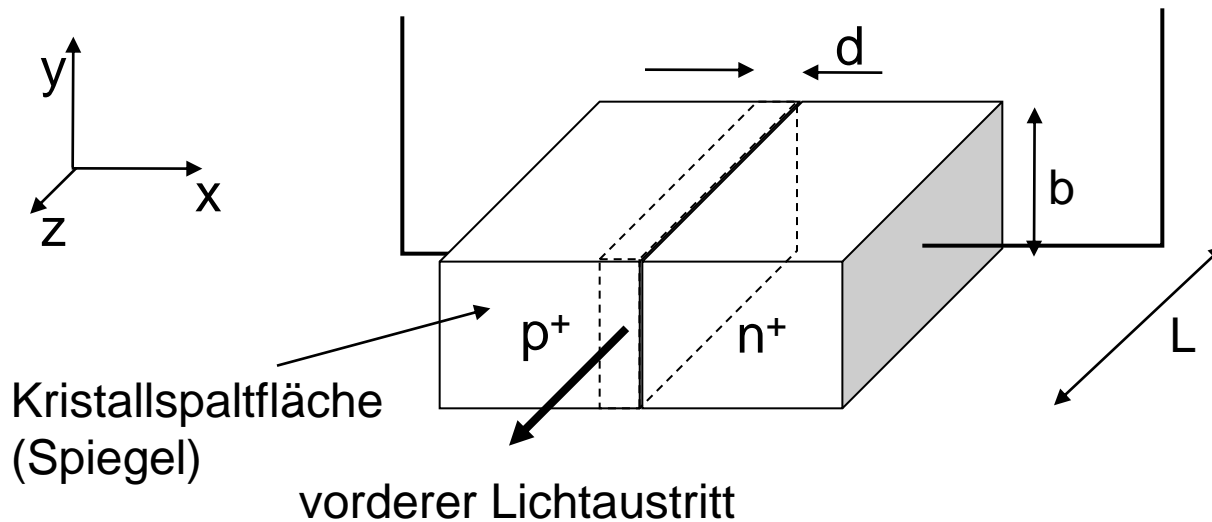
Klassifizierung



DH: Doppel-Heterostruktur
SH: Einfach-Heterostruktur
(single heterostructure)

Technischer Aufbau

einfachster Aufbau: Homostruktur mit p⁺n⁺Übergang



$$J_{\text{th}} = \frac{ed}{\Gamma_{\text{el}}\gamma_n\tau_n} n_{\text{th}} = \frac{ed}{\Gamma_{\text{el}}\gamma_n\tau_n} \left(n_T + \frac{1}{a} \left(\alpha_i - \frac{1}{L} \ln(R) \right) \right)$$

Technischer Aufbau Heterostruktur-Laserdioden

Ziele der Weiterentwicklung der Laserstrukturen:

- Reduzierung der Laserschwelle
- Vergrößerung der vom Laser abgegebenen Leistung

Mögliche Maßnahmen:

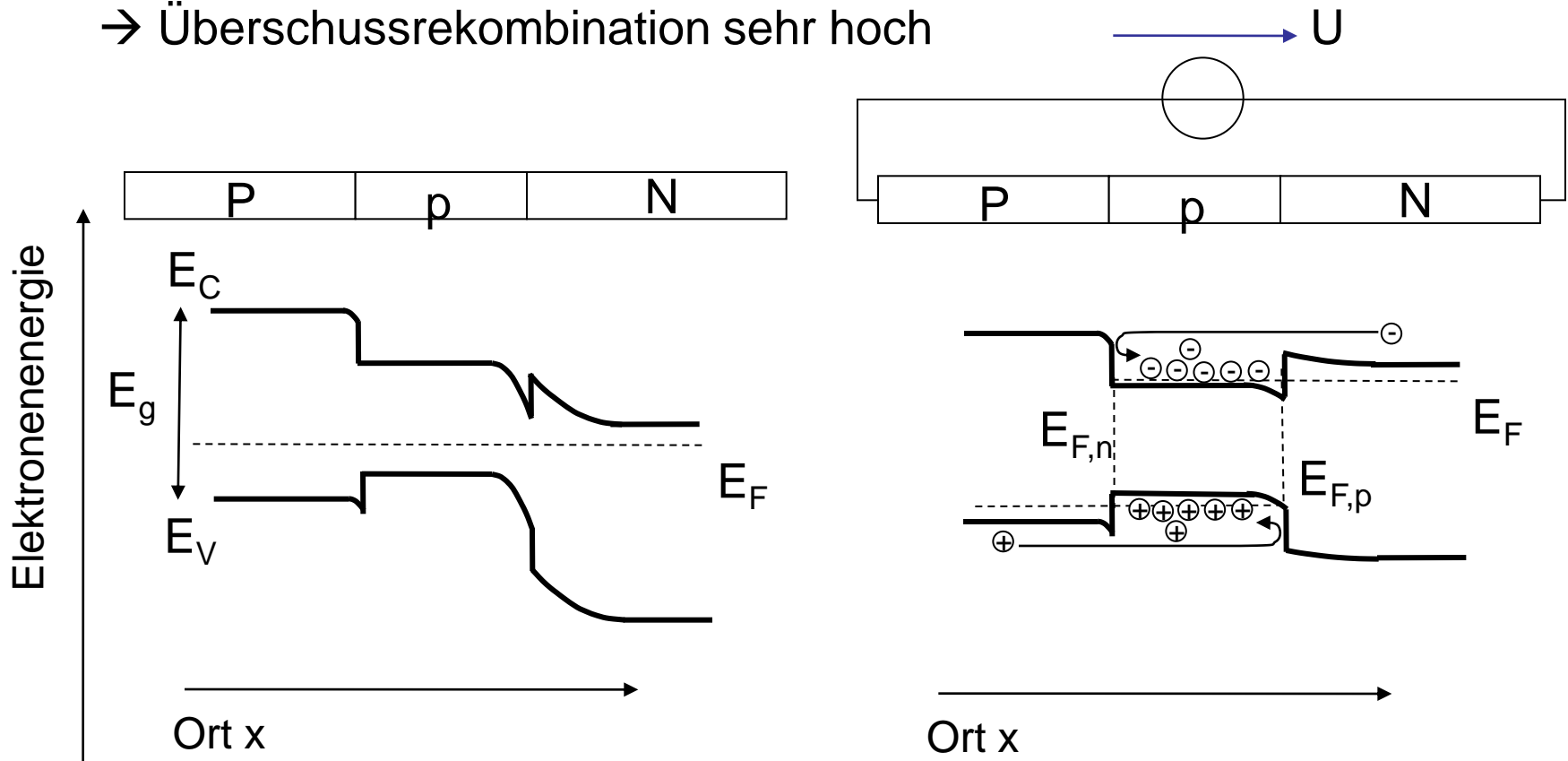
- Verspiegelung der Endflächen ☹️ (Modulationseigenschaften werden verschlechtert)
- Verlängerung des Resonators ☹️ (Modulationseigenschaften werden verschlechtert)
- Erhöhung der Ladungsträgerdichte in der aktiven Zone
- gleichzeitig Erhöhung der Photonendichte



Mehrschichtaufbau der Laserdiode

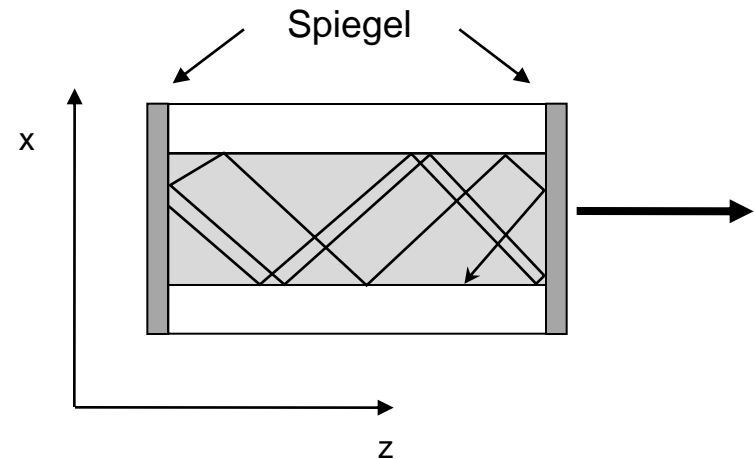
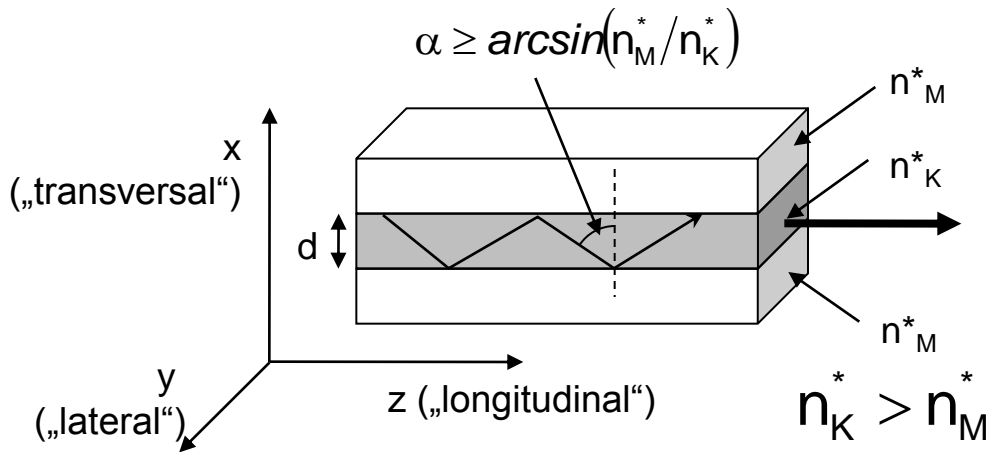
Einschluss der Ladungsträger z.B. PpN Doppelheterostruktur

effektiver Ladungsträgerereinschluss in Potentialmulden
 → Überschussrekombination sehr hoch

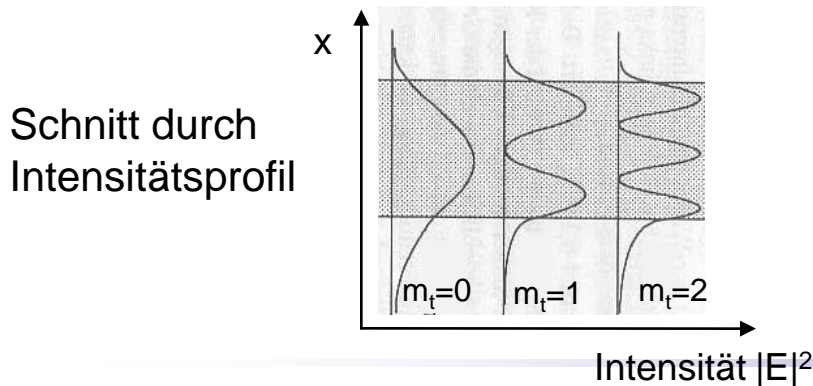


Transversale Lichtführung

Prinzip: Totalreflexion im Wellenleiter (=Schichtfolge des Halbleiters)



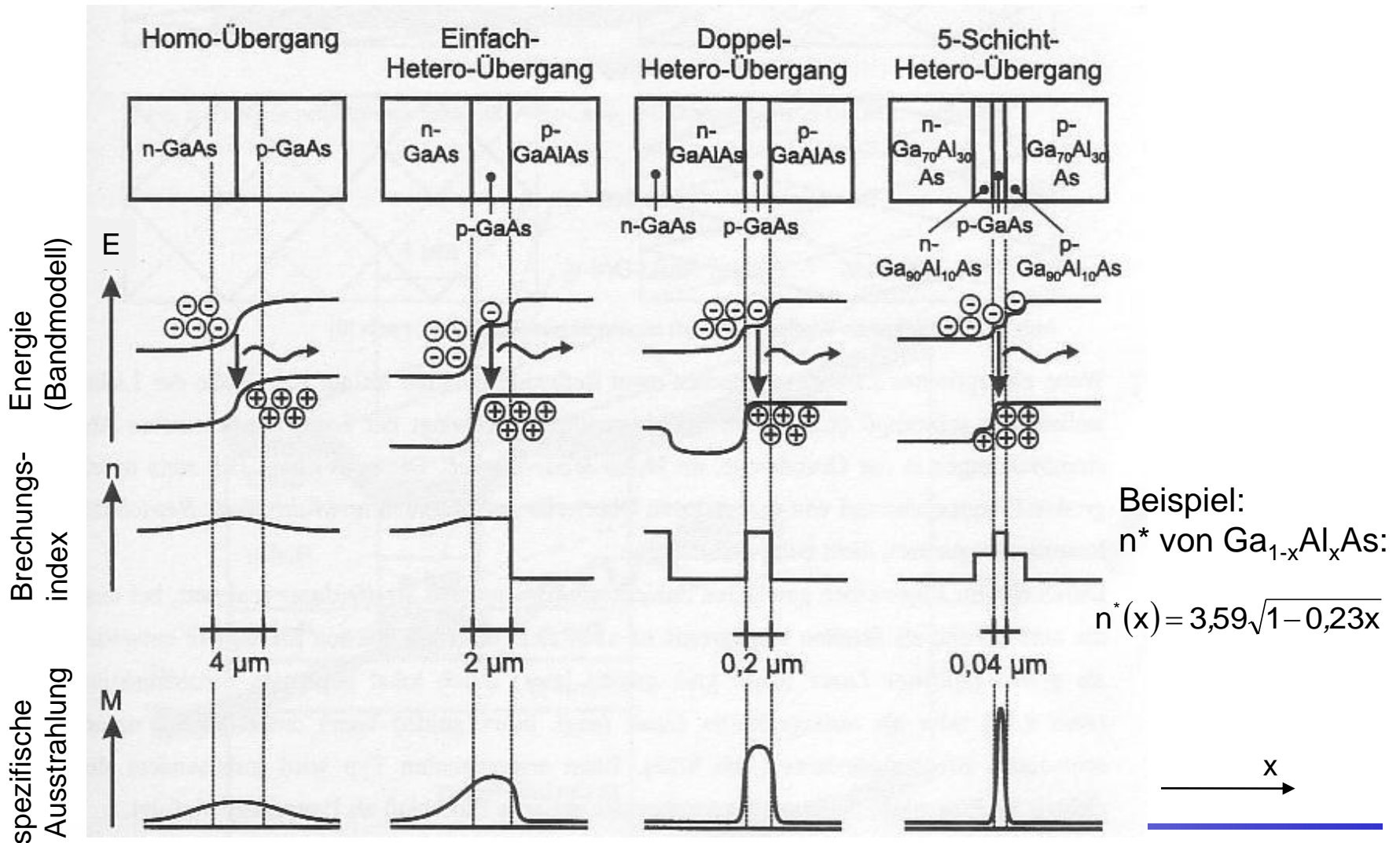
Transversalmoden des Halbleiterlasers (Lösung der Wellengleichung)



Füllfaktor Γ_{opt} der Grundmode ($m=0$)

$$\frac{1}{\Gamma_{\text{opt}}} = 1 + \frac{1}{2\pi^2 (d/\lambda)^2 (n_K^{*2} + n_M^{*2})}$$

Zusammenfassung Bauprinzipien für Ladungsträgereinschluss und Lichtführung

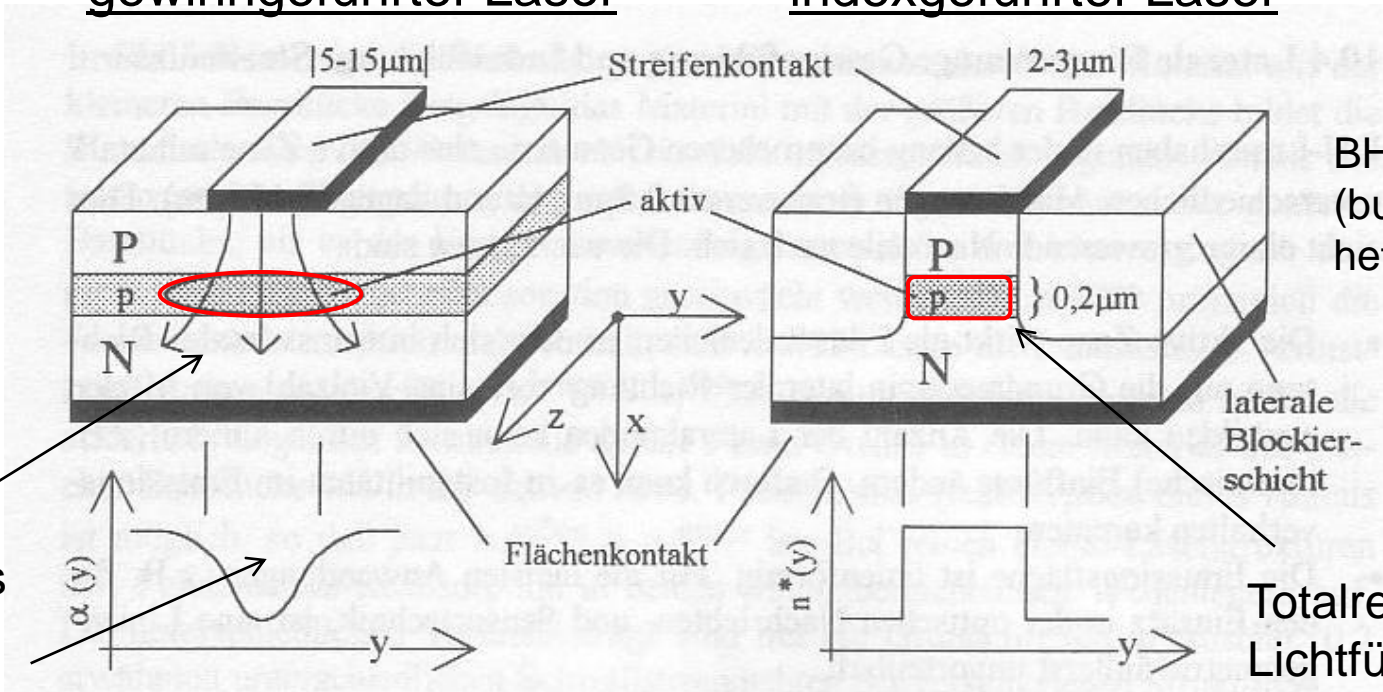


Laterale Eingrenzung: Gewinn- und Indexführung im Streifenlaser

aktive Zone: transversal $0,2\mu\text{m}$, lateral $150\mu\text{m}$ →
laterale Lichtführung nötig

gewinngeführter Laser

indexgeführter Laser



BH-laser
(buried heterostructure)

Totalreflexion →
Lichtführung durch
lateralen Verlauf
 $n^*(y)$

○ Einschluss des Lichtfeldes

Verstärkung nur,
wo α klein

Stromfluss

Flächenkontakt

Streifenkontakt

aktiv

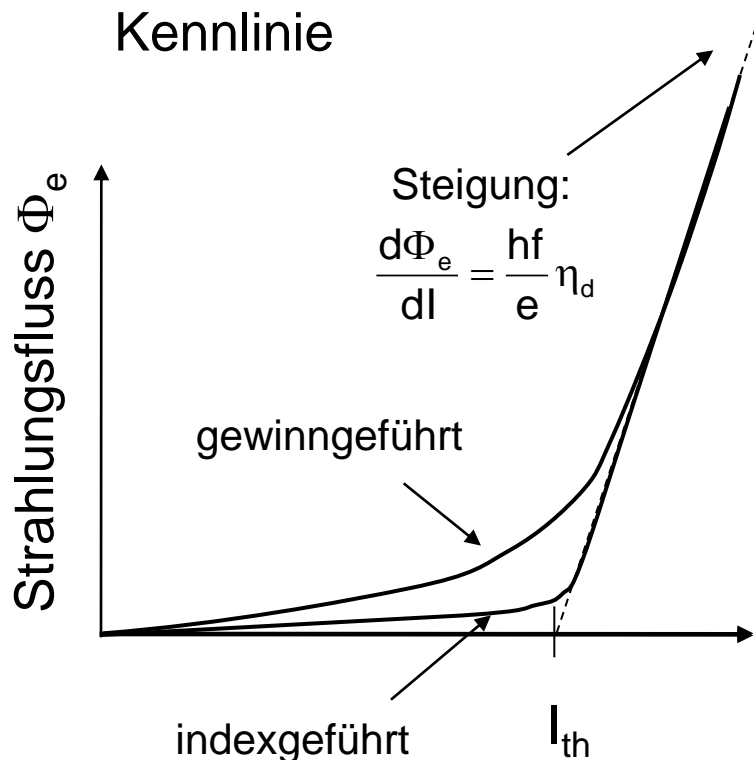
laterale
Blockierschicht

Kenngrößen von Laserdioden

- elektro-optische Kennlinie
- differentielle Wirkungsgrad
- optisches Spektrum / Kohärenz
- Abstrahlcharakteristik und Polarisierung
- Temperaturverhalten
- Modulationsverhalten
- Strom-Spannungs-Kennlinie

Elektro-optische Kennlinie

Differentieller Wirkungsgrad



externer Wirkungsgrad
(siehe LED)

$$\eta_0 = \frac{\Phi_e}{I} \frac{e}{hf}$$

aber Laser: differentieller
Wirkungsgrad (nur stimulierte
Emission):

$$\eta_d = \frac{e}{hf} \frac{d\Phi_e}{dI} = 0,8065 \cdot \lambda [\mu\text{m}] \frac{d\Phi_e [\text{W}]}{dI [\text{A}]}$$

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

Beispiel: Osram LD 450 nm, PL T4 NSB

Auszug aus Datenblatt

PL T4 NSB

Laserkennwerte ($T_{\text{case}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$)
Laser Characteristics

Bezeichnung Parameter	Symbol Symbol	Wert Values			Einheit Unit
		min.	typ.	max.	
Zentrale Emissionswellenlänge ³⁾ Emission Wavelength ³⁾	λ_{peak}	440	450	460	nm
Spektrale Breite (Halbwertsbreite) ³⁾ Spectral Width (FWHM) ³⁾	$\Delta\lambda$	–	2	–	nm
Schwellstrom Threshold Current	I_{th}	–	30	60	mA
Betriebsstrom ³⁾ Operating Current ³⁾	I_{F}	–	80	120	mA
Betriebsspannung ³⁾ Operating Voltage ³⁾	V_{F}	–	5.5	6.5	V
Strahldivergenz (FWHM) ³⁾ Beam Divergence (FWHM) ³⁾	$\theta_{\parallel} \times \theta_{\perp}$	4x15	7x21	15x25	deg
Polarisation ³⁾ Polarization ³⁾	P_{gr}	20:1		–	
Modulationsfrequenz Modulation Frequency	f	–	>100	–	MHz

³⁾ Standardbetriebsbedingungen beziehen sich auf $P_{\text{op}}=50\text{mW}$ Ausgangsleistung.
Standard operating conditions refer for to an output power of $P_{\text{op}}=50\text{mW}$



$$\eta_d = \frac{q}{hf} \frac{d\Phi_e}{dl}$$

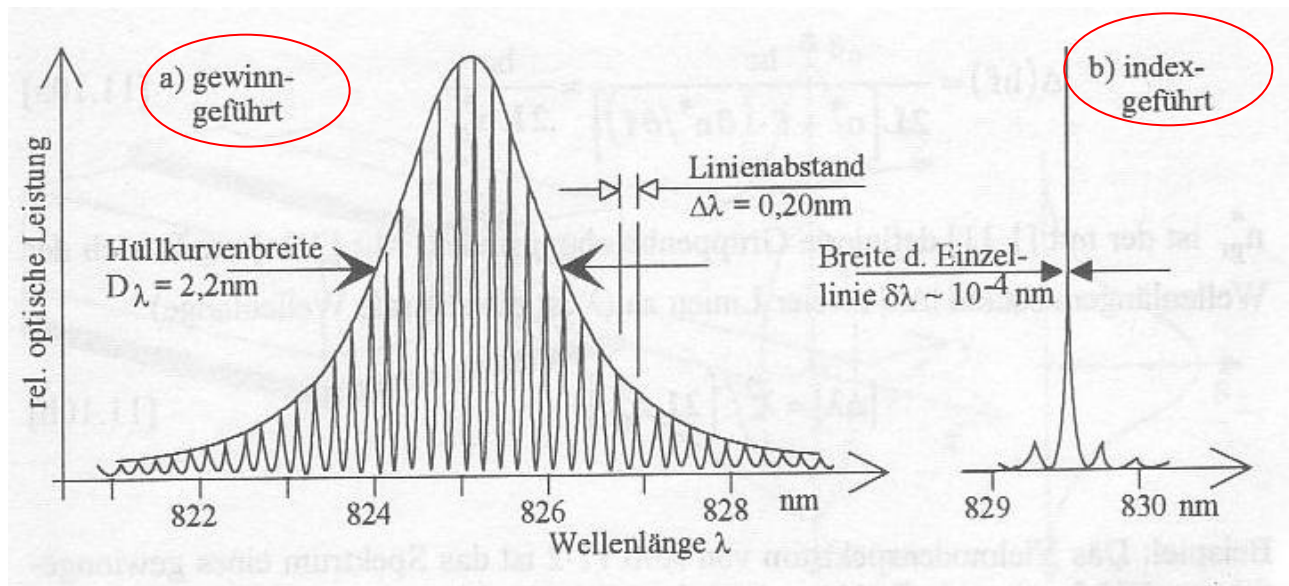
$$= 0,8065\lambda [\mu\text{m}] \frac{d\Phi_e}{dl} \left[\frac{\text{W}}{\text{A}} \right]$$

$$= 36\%$$

Hochleistungslaser: ..80%

Optisches Spektrum / Kohärenz

Linienbreite



Kohärenzlänge:

- (Länge bzw. Zeit,
 - nach der sich die Lichtphase
 sprunghaft ändert,
 - in der das Licht interferenzfähig ist)

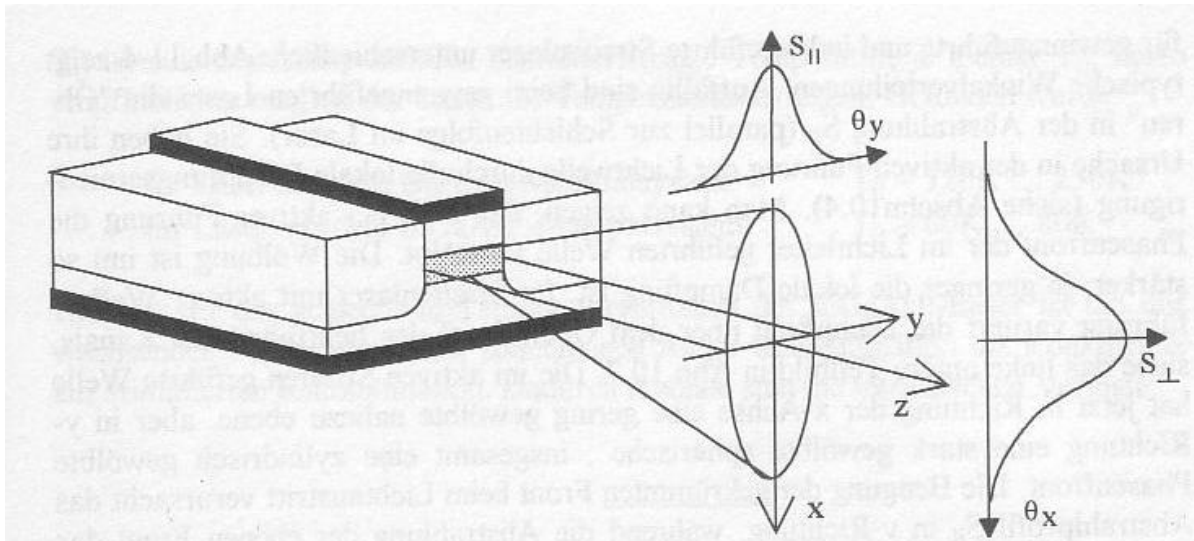
$$L = cT_c \quad T_c \propto \frac{1}{\Delta f_{\text{HWB}}}$$

$$L_{\text{gewinn}} = 98 \mu\text{m}$$

$$L_{\text{index}} = 2,2\text{m}$$

Abstrahlgeometrie und Polarisation

Burried-Heterostructure Laser



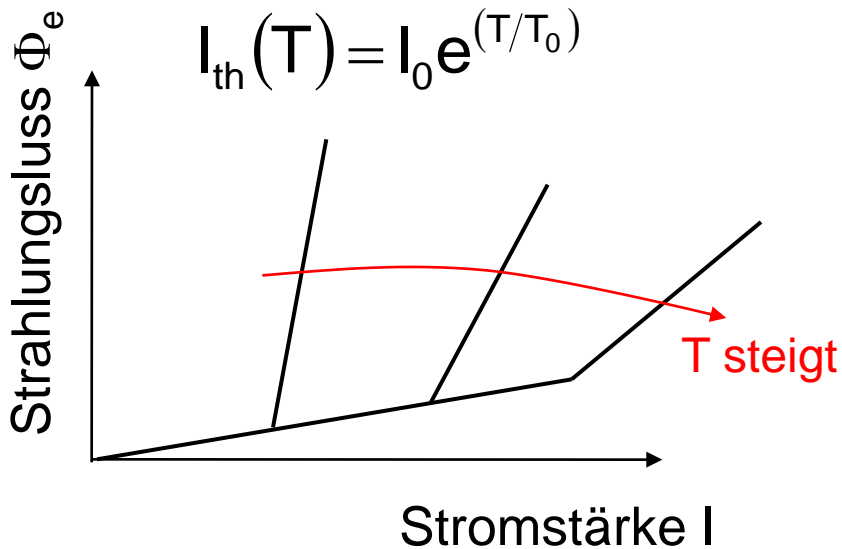
Abstrahlcharakteristik durch Beugung bestimmt.
 Beispiel: Osram, 450 nm, PL T4 NSB

Polarisation:
 linear

Operating Voltage ³⁾					
Strahldivergenz (FWHM) ³⁾ Beam Divergence (FWHM) ³⁾	$\theta_{ } \times \theta_{\perp}$	4x15	7x21	15x25	deg
Polarisation ³⁾ Polarization ³⁾	P_{gr}	20:1		-	
Modulationsfrequenz	f		< 100		kHz

Temperaturverhalten

Ausgangsleistung

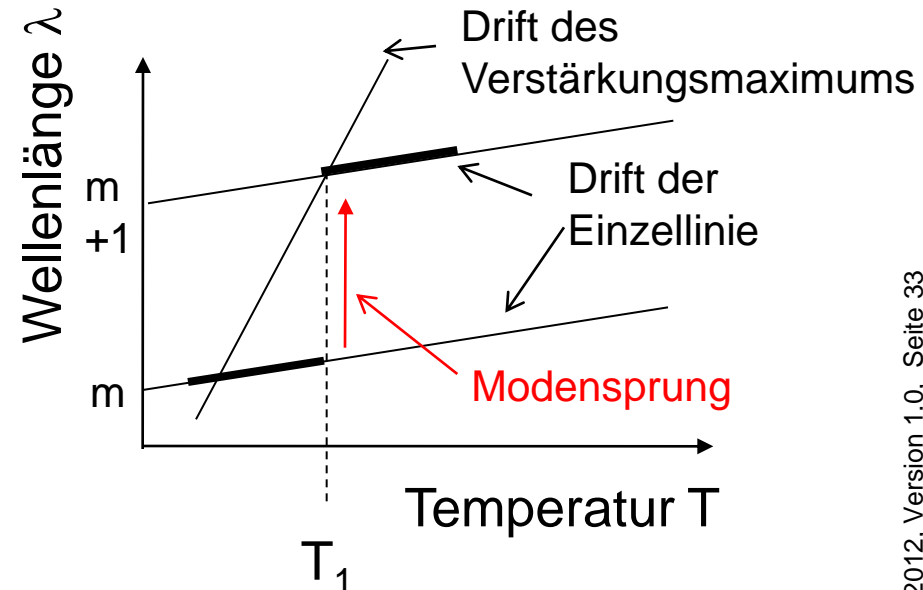


$$T \uparrow \Rightarrow \eta_d \downarrow \quad I_{th} \uparrow$$

GaAlAs: $T_0 = 120 \dots 230 \text{K}$

InGaAsP: $T_0 = 60 \dots 80 \text{K}$

Emissionsspektrum



Drift des Verstärkungsmaximums durch Verschiebung von E_g mit T

$$\left. \frac{\partial \lambda}{\partial T} \right|_{\text{Max}} \approx 0,25 \text{nm/K}$$

Drift der Laserlinien durch Änderung von n^* und L

$$\left. \frac{\partial \lambda}{\partial T} \right|_{\text{Linie}} \approx 0,10 \text{nm/K}$$

Modulationsverhalten

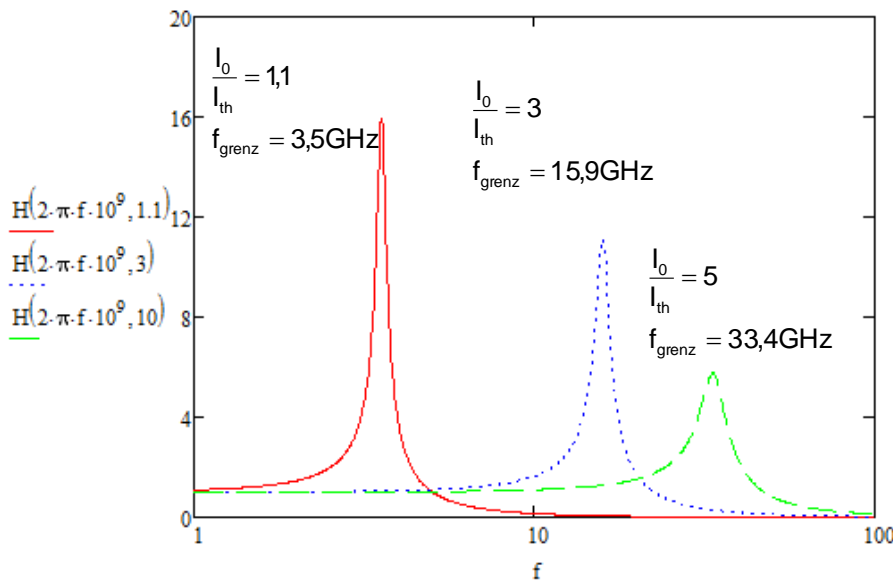
- a) Kleinsignalfall
(Modulation des Treiberstroms nur oberhalb der Laserschwelle)

$$i(t) = I_0 + \hat{i} \sin(\omega t), \quad I_0 > I_{th}; \quad \hat{i} < |I_0 - I_{th}| \quad \Rightarrow \quad \Phi_e(t) = \Phi'_e + \hat{\Phi}_e \sin(\omega t + \varphi)$$

$$\Phi'_e = \frac{hf}{e} \eta_d (I - I_{th})$$

$$\hat{\Phi}_e(\omega) = \frac{hf}{e} \eta_d H(\omega) (\hat{i} - I_{th})$$

Übertragungsfunktion $H(\omega=2\pi f)$



$$\tau_{ph} = 10\text{ps} \quad \tau_n = 1\text{ns}$$

wichtig: !! Vorstrom $I_0 \gg I_{th}$

nichtlineare Lasergleichungen

abhängig von τ_n , τ_{ph} , v_{gr} , n_{th} , n_T , Γ_{opt}

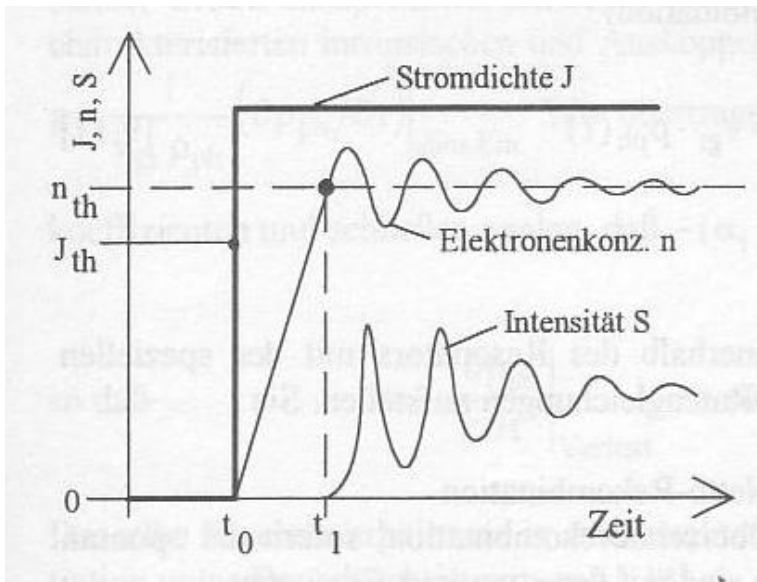
f_{grenz} steigt, wenn

a) I_0/I_{th} steigt

b) τ_{ph} fällt ($L_{\text{Resonator}}$ klein oder R klein (Reflexionsgrad der Spiegel))

Modulationsverhalten

- b) Großsignalfall
(Modulation des Treiberstroms für digitale Übertragung: OOK*)

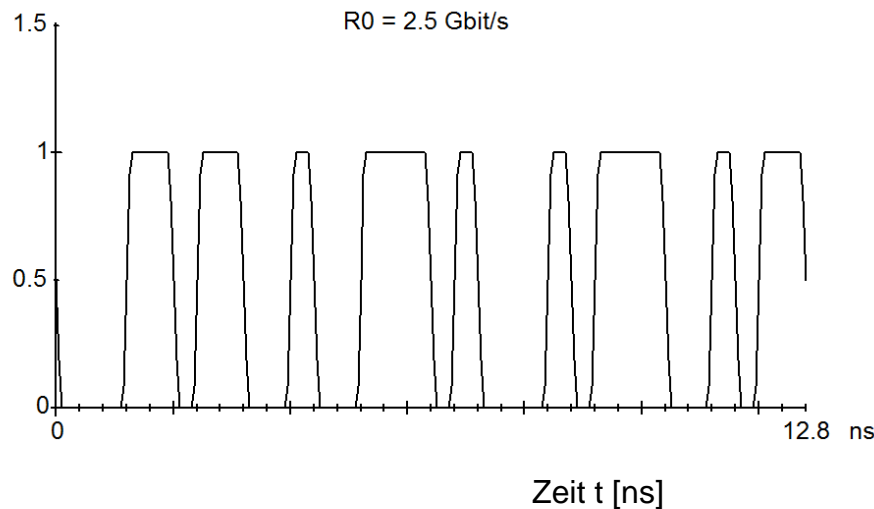


- verspäteter Einsatz der Laserstrahlung (kann durch Vorstrom dicht unter Laserschwelle reduziert werden)
- Relaxationsschwingungen
- Selbstpulsation der LD

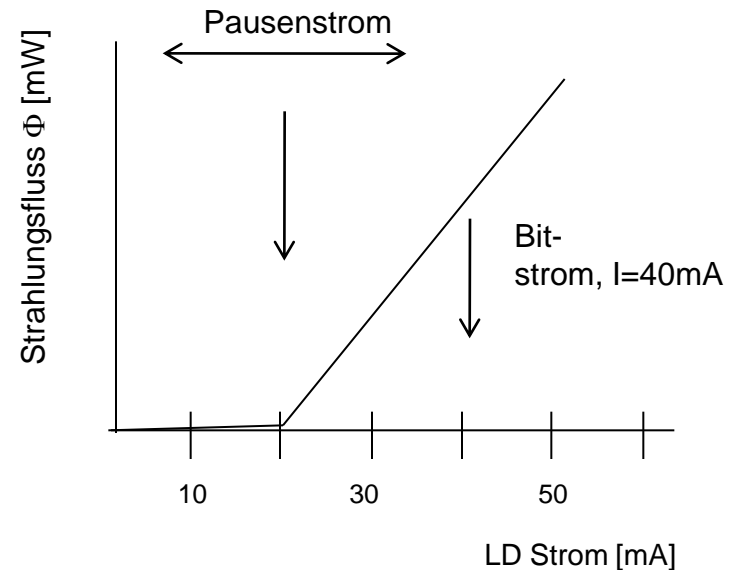
* OOK: On-Off-Keying

Modulationsverhalten einer LD: Beispiel

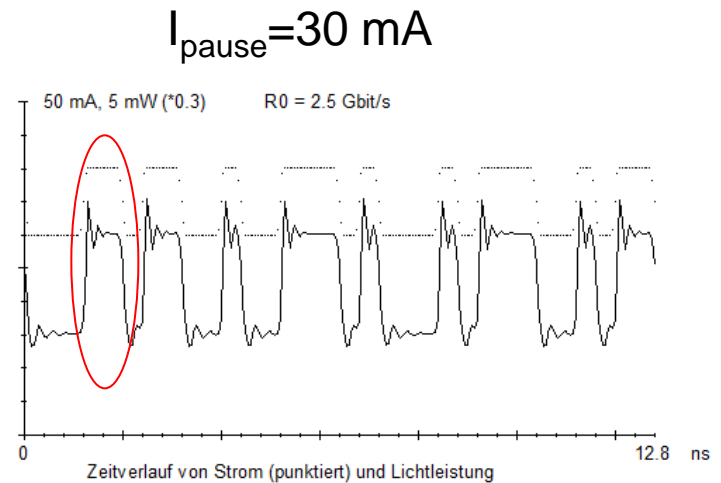
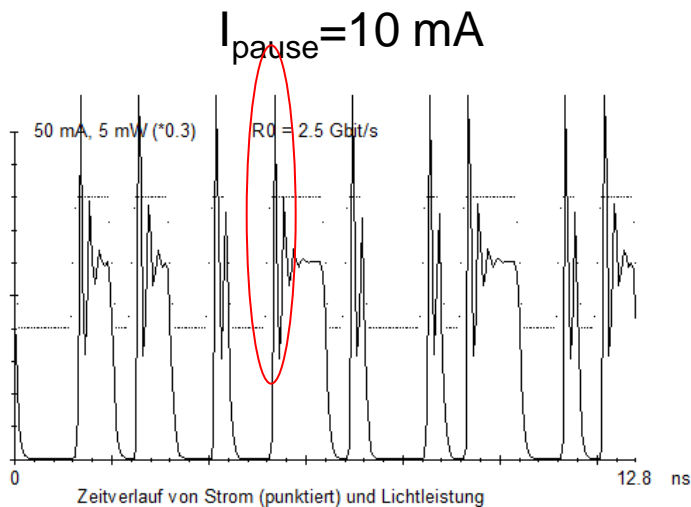
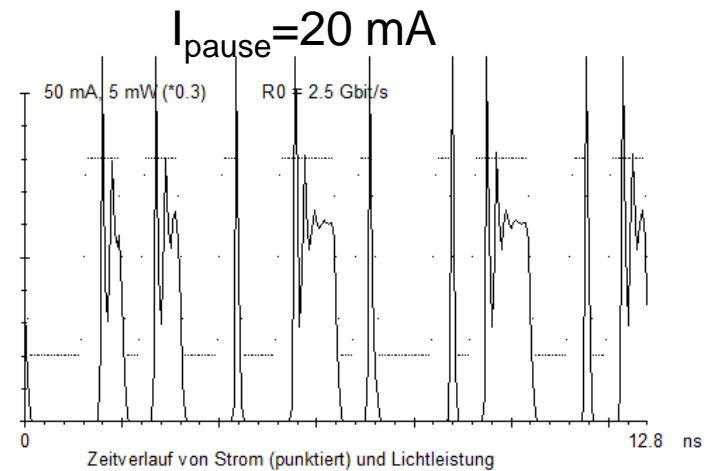
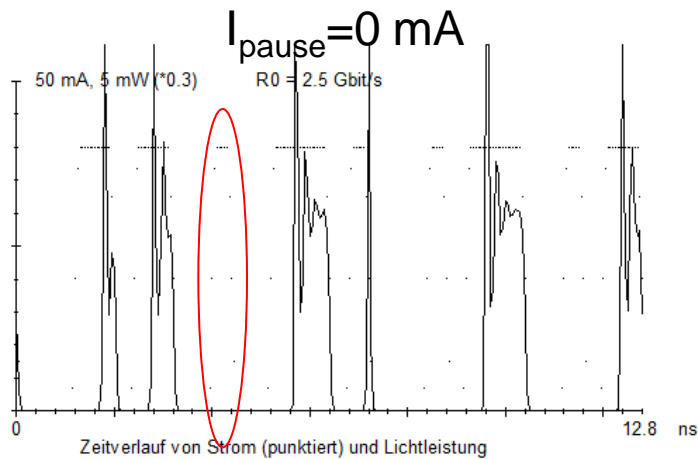
- Großsignalverhalten, simuliert mit SIMFOCs
- 2,5 Gbit/s „on off keying“
- Parameter: „Pausenstrom“
- Charakteristik:
„Bitwort“:



elektro-optische Kennlinie der LD



Modulationsverhalten einer LD: Beispiel, Ergebnisse



Modulationsverhalten einer LD

- System 2. Ordnung \rightarrow Amplituden-Übertragungsfunktion $H(\omega)$ mit ausgeprägter Eigenresonanz
- je größer $I_0 - I_{th} \rightarrow$ je größer Eigenfrequenz ω_0
- je kleiner Extinktion* (extinction ratio) ER,

$$ER = \frac{\Phi("1")}{\Phi("0")}$$

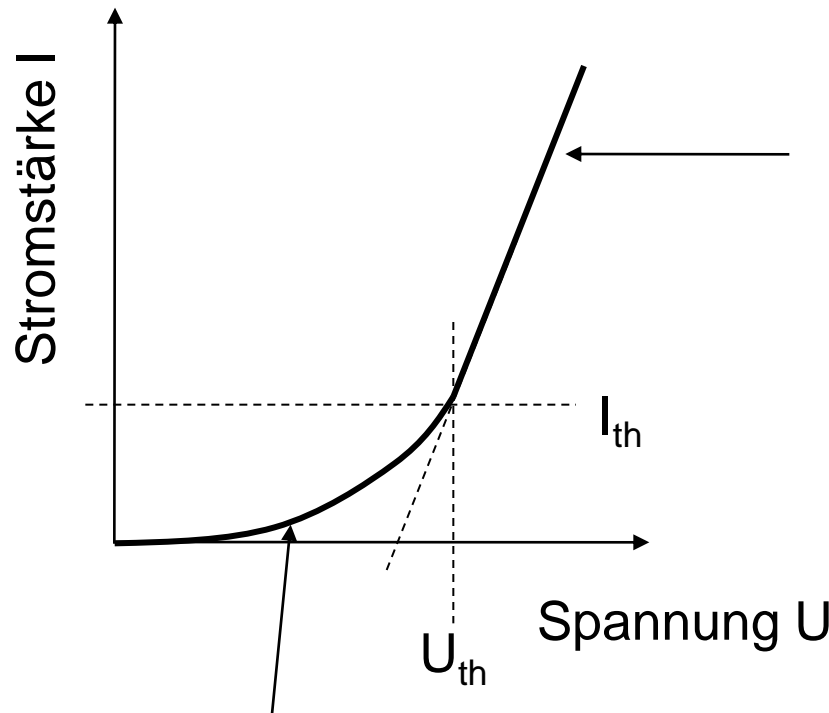
$\Phi("1")$: Strahlungsfluss während high level bit
 $\Phi("0")$: Strahlungsfluss während low level bit

und $I("0") > I_{th}$, je kleiner sind

- Relaxationsschwingungen
- Anschlagzeit
- aber: ER klein \rightarrow bit error rate (BER) steigt

* bei OOK, und direkt (strom-moduliertem Laser)

Kommentar zur U-I-Kennlinie des Halbleiterlasers



exponentieller Anstieg
(„normale“ U-I-Kennlinie der Diode)

linearer Anstieg für
 $U > U_{th}$, $U_{pn} = \text{const}$, \rightarrow

$$U = R_{\text{serie}} I$$

kein weiterer Anstieg
der Trägerdichte in der aktiven
Zone ($U_{pn} = \text{const}$)
alle überschüssigen Ladungsträger
rekombinieren durch
stimulierte Emission)

Weiterführende Laserkonzepte

- Ziele
 - longitudinale „Einmodigkeit“, Reduzierung der Zahl der Laserlinien im Verstärkungsprofil
 - Frequenzstabilität (höhere Temperaturstabilität)
 - höhere Ausgangsleistung
 - Neue optischen Emissionsfrequenzen
- DBR und DFB-Laser
- Multi-Quantum-Well Laser
- GRINSCH-Laser
- Oberflächenemittierende Laser „VCSEL“

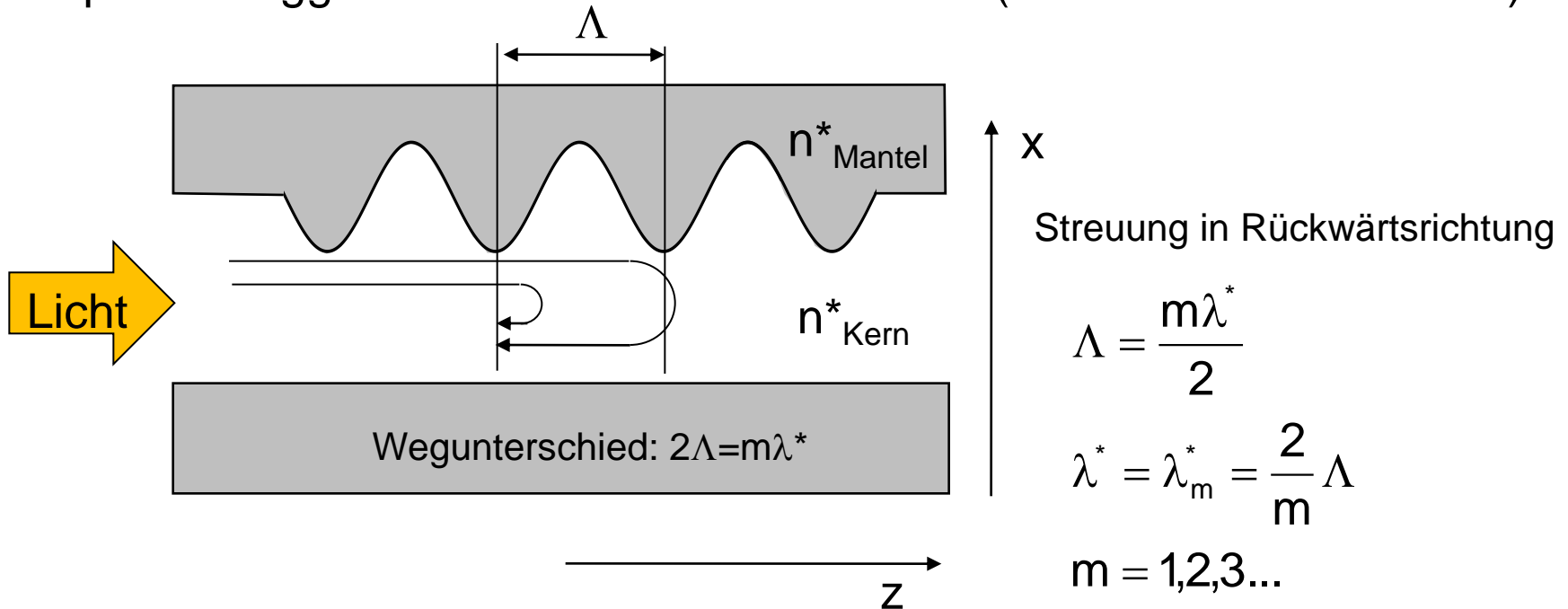
DBR und DFB Laser

DBR: distributed bragg reflector laser

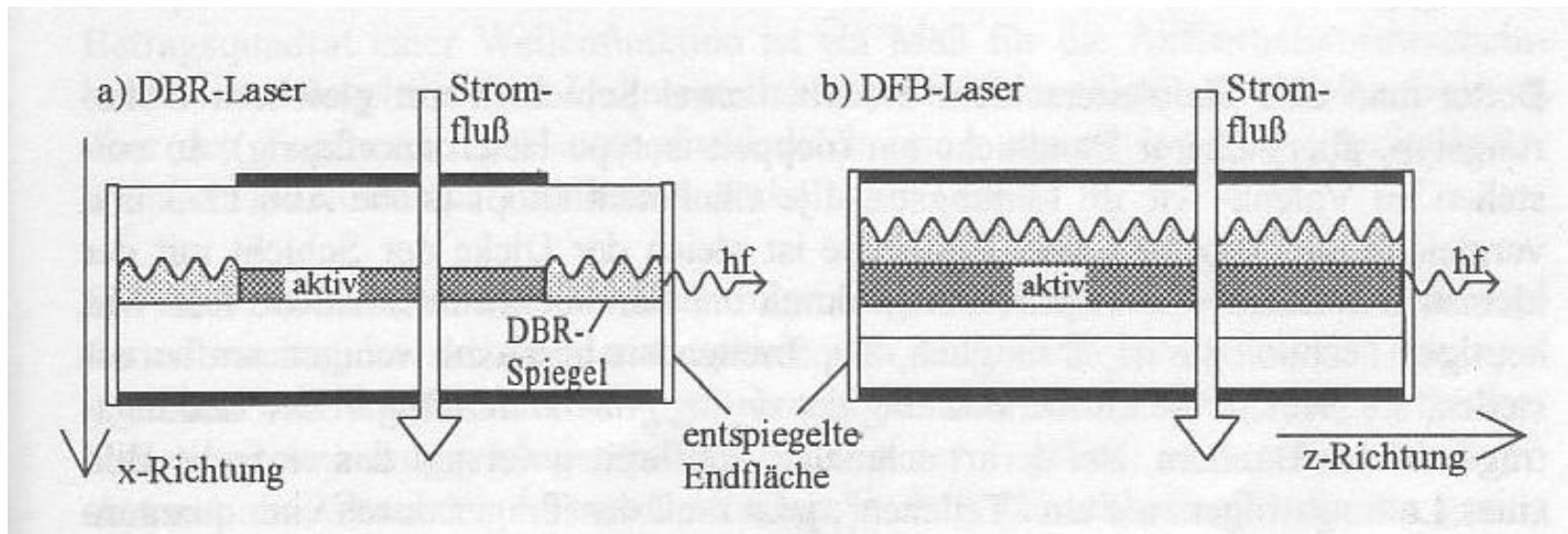
DFB: distributed feedback bragg reflector laser

Ziel: longitudinale Einmodigkeit : Verringerung der Anzahl der Resonatormoden im Verstärkungsbereich des HL

Prinzip der Bragg-Reflexion in Lichtwellenleitern (konstruktive Interferenz)



BFB und DBR Laser Aufbau



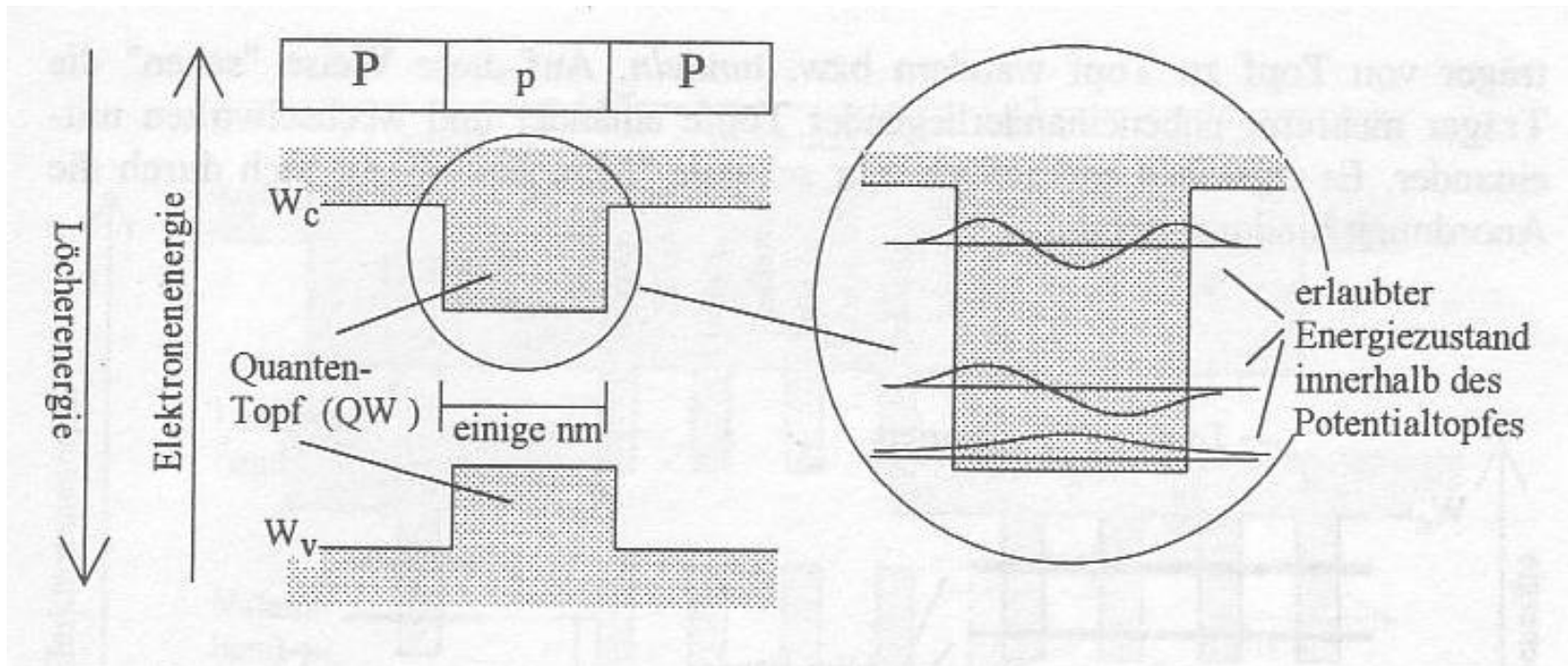
Quantentopf

Ziel: Besserer LT Einschluss

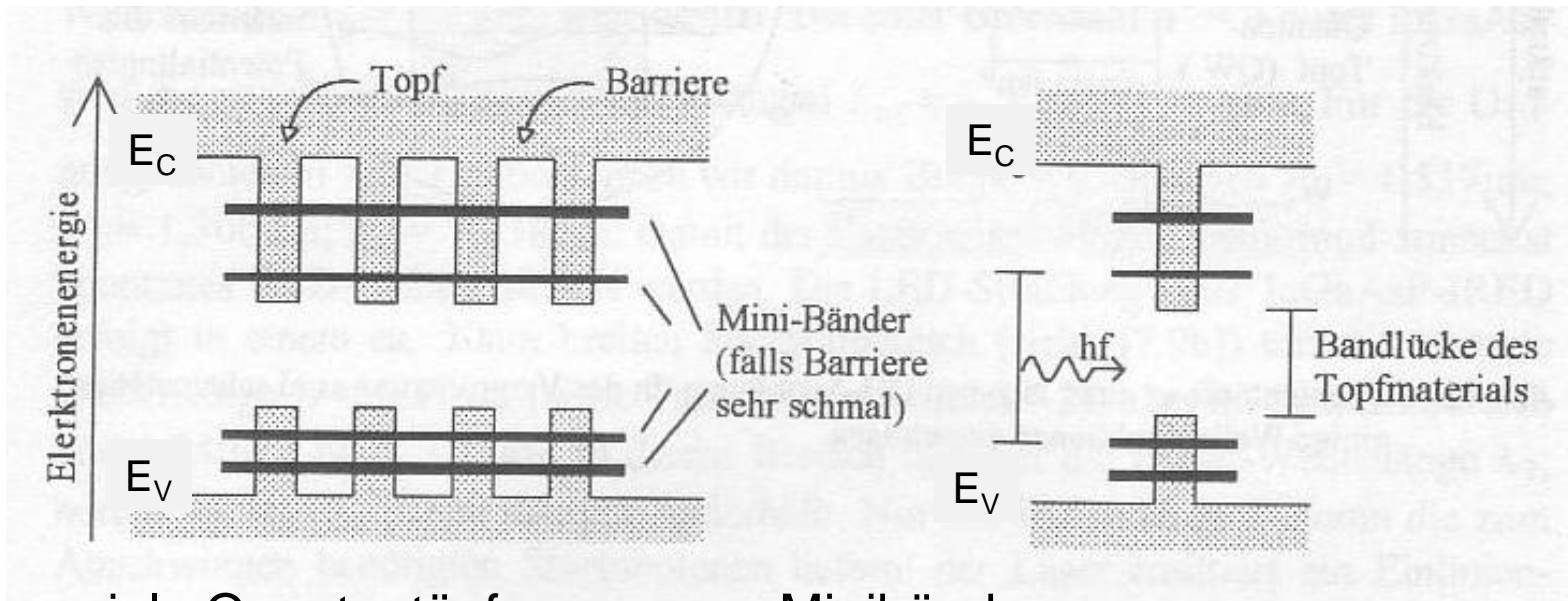
Senkung der Schwellstromdichte, Reduzierung der Laserlinienbreite

Reduzierung der Strukturgröße in einer Dimension →

Einschluss der LT (Quantencharakter)



Quantenwell und Minibänder



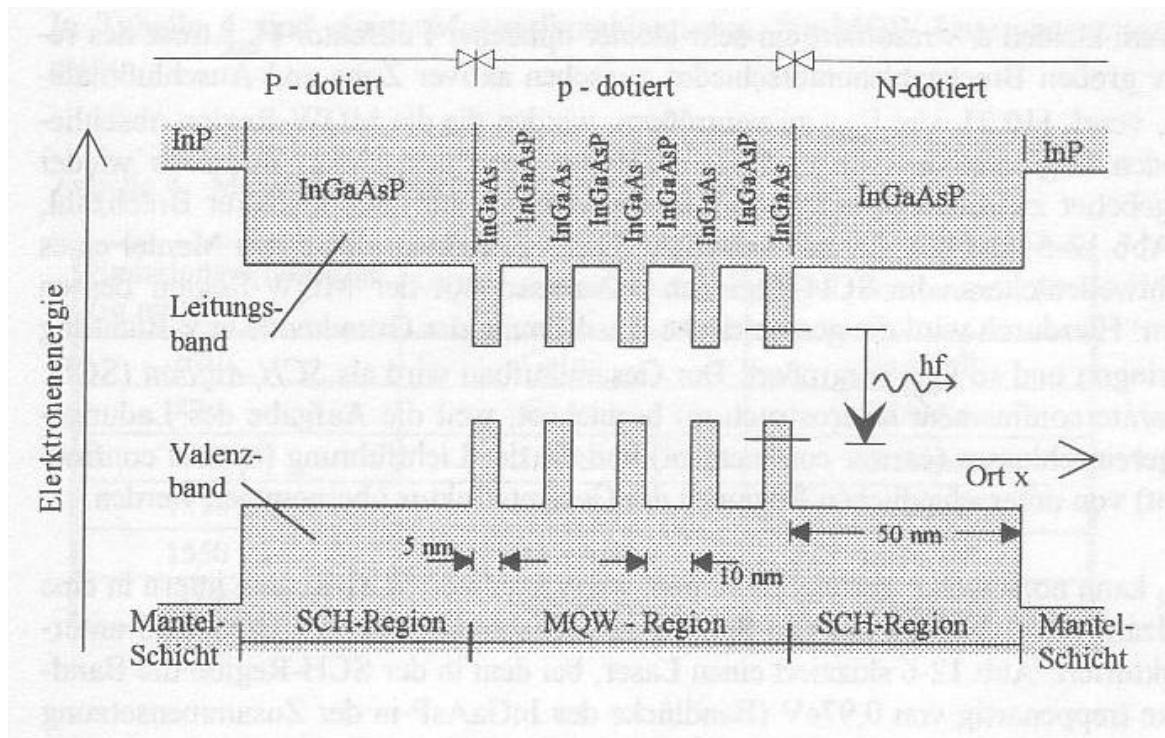
viele Quantentöpfe erzeugen Minibänder

→ neue E_{ph}

Neue Lichtfrequenzen möglich, schmalbandige Übergänge

aber: schlechter Lichtwelleneinschluss

Beispiel: Multiquantenwell-LD 1300 nm

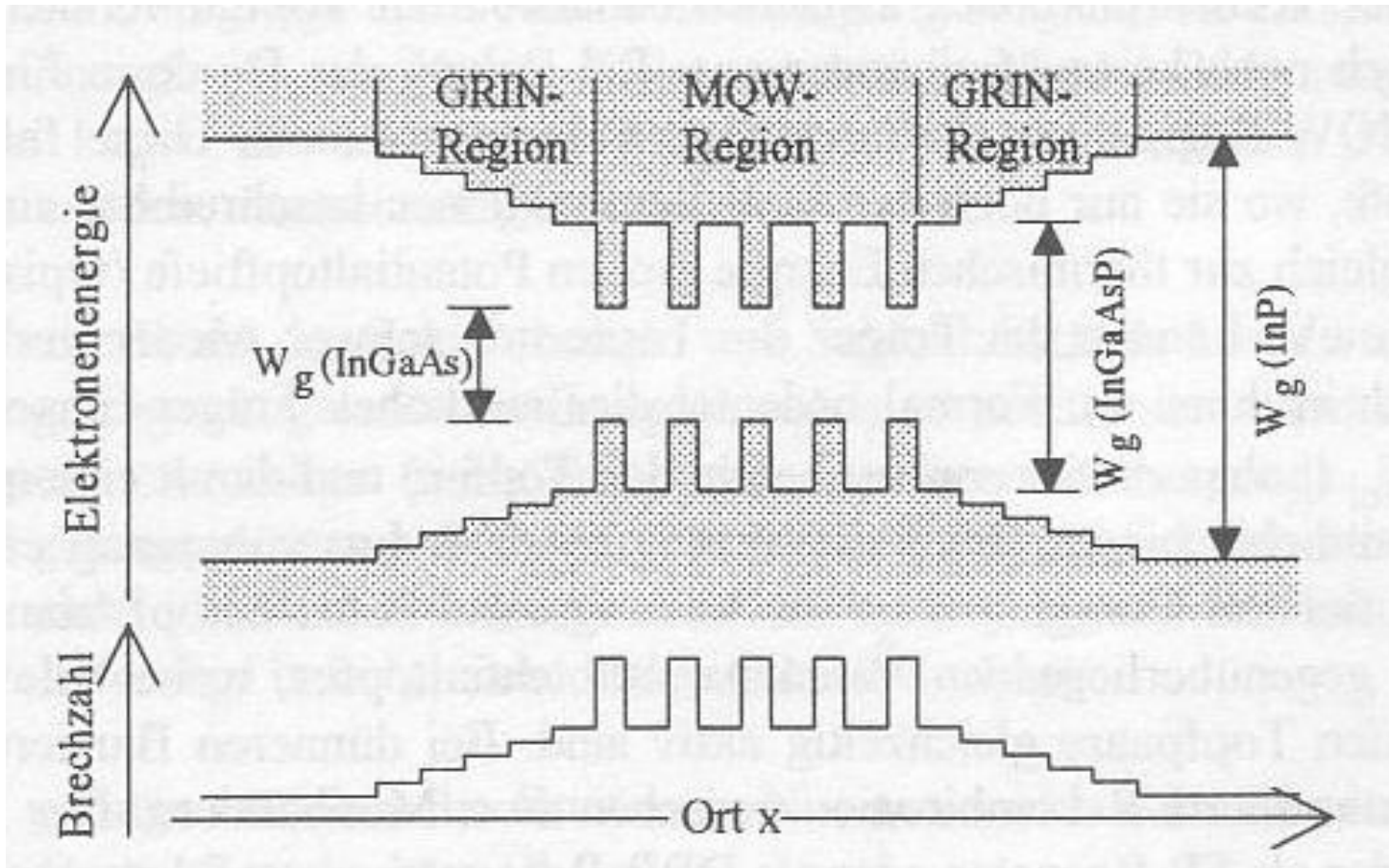


Ziele:

- Einschluss der LT in kleinsten Strukturen
- Führung des Lichts in transversaler Richtung

Sch: separate confinement heterostructure

GRINSCH-Laser



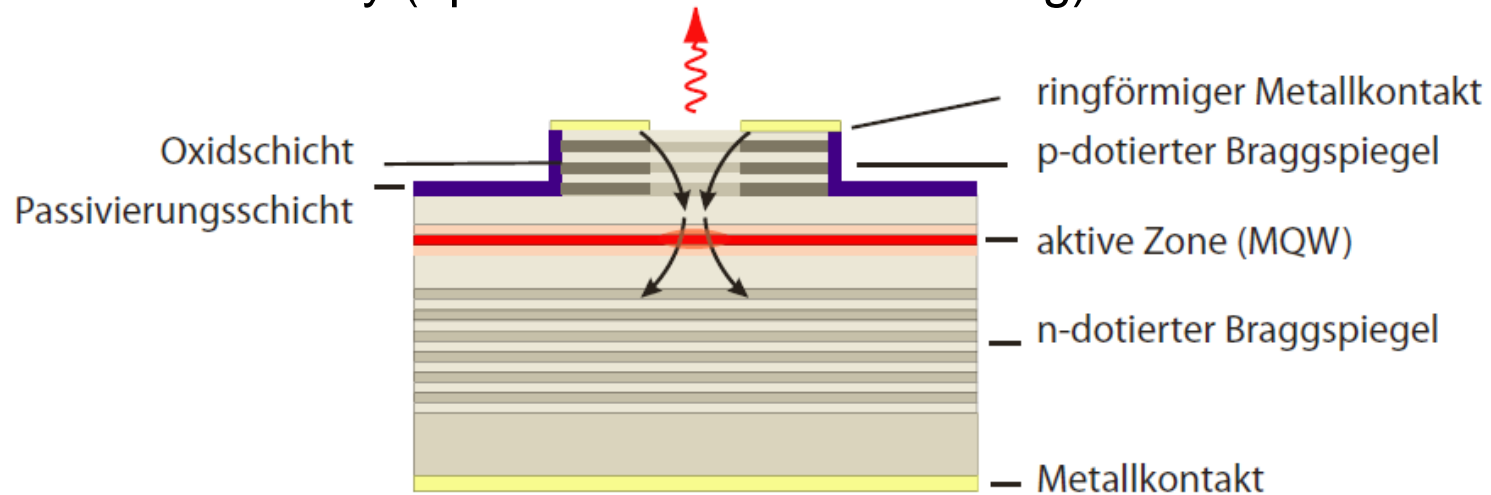
GRINSCH: graded index separate confinement heterostructure

VCSELs

Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers

Ziele:

- vertikal abstrahlender Laser
- runde Lasermode zur besseren Einkopplung in die Faser
- Flächen-Laserarray (optische Datenverarbeitung)



Bragg-Spiegel: hocheffizienter Spiegel

Dicke der Bragg-Schichten: $\lambda/4$

hoher Reflexionsgrad >99%

Vorteil: runde Strahlprofile
effiziente Einkopplung in Fasern

Lernziele Kapitel 7

- Grundlegende Konzepte des Lasers
- 1. und 2. Laserbedingung
 - Inversion und Resonanz
- Bauformen von Halbleiterlasern
- Grundlegende Eigenschaften von LD
- Kennzahlen von Laserdioden
- Weiterführende Konzepte für Halbleiterlaser
 - DFB, DBR
 - Quantentopf, MQW, GRINSCH Laser
 - VCSEL