

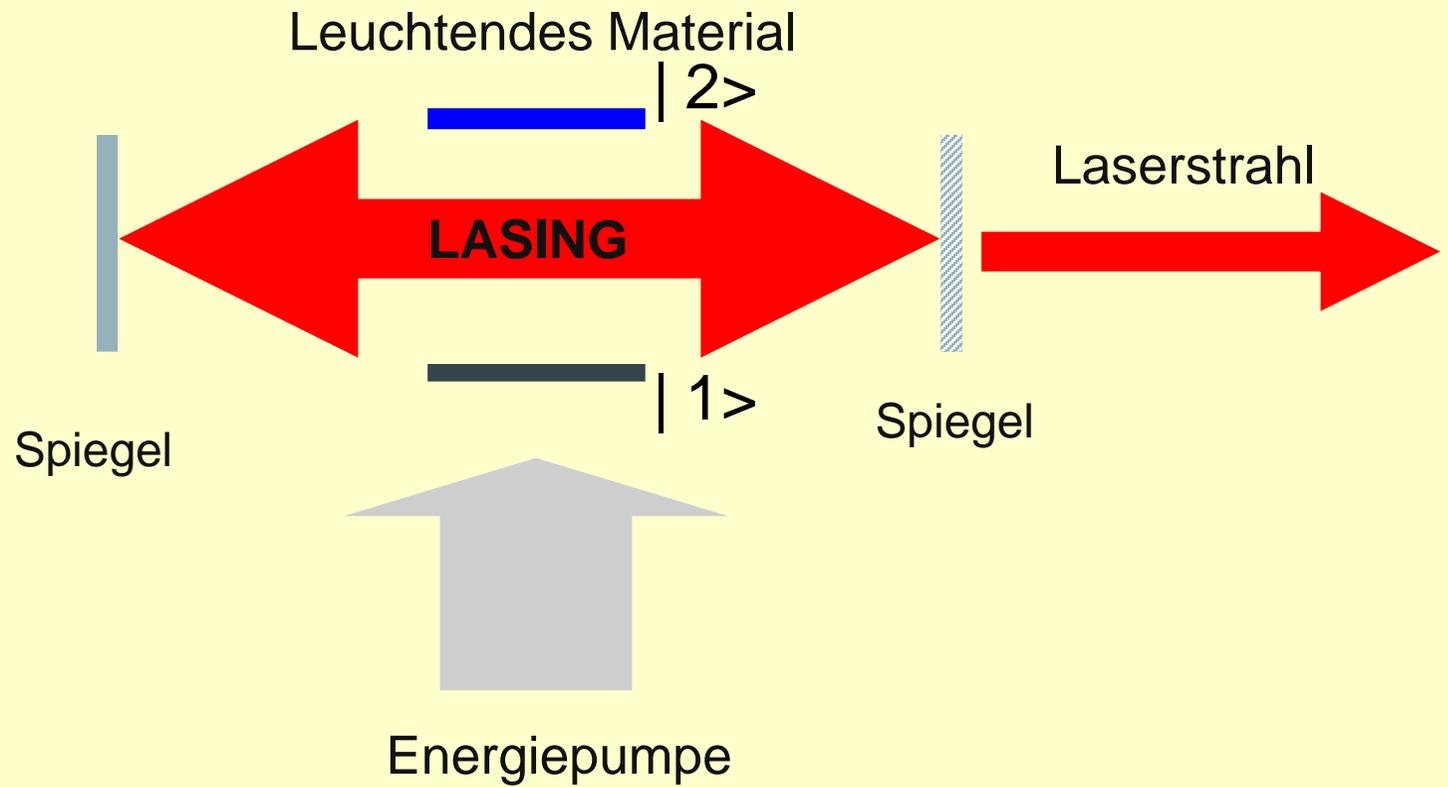
# Übersicht über die Vorlesung

---

- I. Einleitung
- II. Optik in Halbleiterbauelementen
- III. Herstellungstechnologien
- IV. Halbleiterleuchtdioden
- V. Quantenmechanische Grundlagen der Optoelektronik
- VI. Laserdioden
  - VI.0 Einleitung
  - VI.1 Lasergleichungen
  - VI.2 Halbleiterlaserdioden
  - VI.3 Laser mit verteilter Rückkopplung (VCSEL, DBR, DFB)
  - VI.4 Wellenlängenabstimmung
  - VI.5 AC-Betrieb von Laserdioden
- VII. Modulatoren
- VIII. Weitere Quantenbauelemente

8. Foliensatz  
SS 2016  
29.06.2016

# Laser



# Übersicht über die Vorlesung

---

- I. Einleitung
- II. Optik in Halbleiterbauelementen
- III. Herstellungstechnologien
- IV. Halbleiterleuchtdioden
- V. Quantenmechanische Grundlagen der Optoelektronik
- VI. Laserdioden
  - VI.0 Einleitung
  - VI.1 Lasergleichungen
  - VI.2 Halbleiterlaserdioden
  - VI.3 Laser mit verteilter Rückkopplung (VCSEL, DBR, DFB)
  - VI.4 Wellenlängenabstimmung
  - VI.5 AC-Betrieb von Laserdioden
- VII. Modulatoren
- VIII. Weitere Quantenbauelemente

# Lasergleichungen I

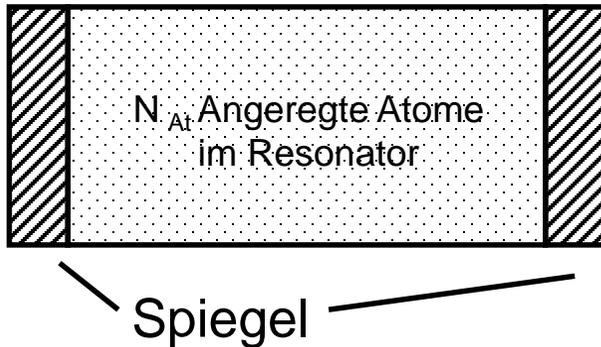


Abb.: Schema zu den Laserbilanzgleichungen

Einfachste Beschreibung von Lasern durch **Laserbilanzgleichungen:**

$N_{At}$  angeregte Zustände zwischen zwei Spiegeln

Licht: Photonenzahl  $N_{Ph}$

Vernachlässigung spontaner Emission

Für die Photonenzahl gilt:

$$\frac{dN_{Ph}}{dt} = \underbrace{B_{21} N_{Ph} N_{At}}_{\text{Stim. Emiss.}} - \underbrace{\gamma_{Ph} N_{Ph}}_{\text{Verluste über Spiegel}} \quad (1)$$

Anzahl der angeregten Zustände:

$$\frac{dN_{At}}{dt} = \underbrace{-B_{21} N_{Ph} N_{At}}_{\text{Stim. Emiss.}} - \underbrace{\gamma_{At} N_{At}}_{\text{Nichtstrahlend. Zerfall von angeregten Atomen}} + \underbrace{R}_{\text{Pump-Rate}} \quad (2)$$

# Lasergleichungen I

---

Aus diesen einfachen Gleichungen können bereits wesentliche Charakteristiken eines Lasers hergeleitet werden. Hierzu wird angenommen, dass sich der Laser bereits im eingeschwungenen, d. h. stationären Zustand befindet. Die zeitlichen Ableitungen müssen also gleich Null gesetzt werden. Damit folgt:

$$\text{aus (1): } 0 = B_{21} N_{Ph} N_{At} - \gamma_{Ph} N_{Ph} = N_{Ph} (B_{21} N_{At} - \gamma_{Ph}) \quad (3)$$

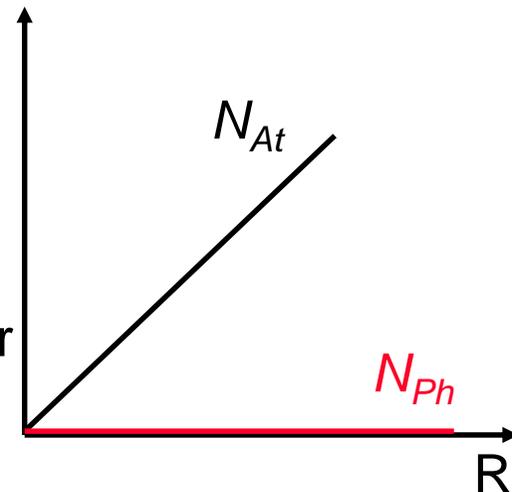
$$\text{aus (2): } 0 = -B_{21} N_{Ph} N_{At} - \gamma_{At} N_{At} + R \quad (4)$$

Aus (3) ergeben sich zwei Lösungen:

1. Lösung:  $N_{Ph} = 0$

Aus (4) folgt dann: 
$$N_{At} = \frac{R}{\gamma_{At}}$$

Bei dieser Lösung wird kein Photon ausgesendet, der Laser ist nicht „angesprungen“.



# Lasergleichungen I

---

## 2. Lösung:

Für die zweite Lösung muss der geklammerte Ausdruck in (3) verschwinden. Es muss also gelten:

$$N_{At} = \frac{\gamma_{Ph}}{B_{21}}$$

Einsetzen in (4) ergibt:  $0 = -B_{21}N_{Ph} \frac{\gamma_{Ph}}{B_{21}} - \gamma_{At} \frac{\gamma_{Ph}}{B_{21}} + R = -N_{Ph}\gamma_{Ph} - \gamma_{At} \frac{\gamma_{Ph}}{B_{21}} + R$

Damit folgt für die Anzahl der Photonen:  $N_{Ph} = \left( \frac{R}{\gamma_{Ph}} - \frac{\gamma_{At}}{B_{21}} \right)$

Für physikalisch sinnvolle Lösungen muss die Photonenzahl positiv sein. Es muss also eine bestimmte Pumprate  $R_{Th}$  überschritten werden. Der Laser muss über die „Schwelle“ gebracht werden. Für die Pumprate an der Laserschwelle  $R_{Th}$  gilt:

$$R_{Th} = \frac{\gamma_{At}\gamma_{Ph}}{B_{21}}$$

# Lasergleichungen I

Gleichungen beschreiben

- Schwellenverhalten von Lasern
- den Phasenübergang beim Erreichen der Pumprate
- stationäre Lösung mit positiver Photonenzahl erst ab Schwellenpumprate  $R_{th}$

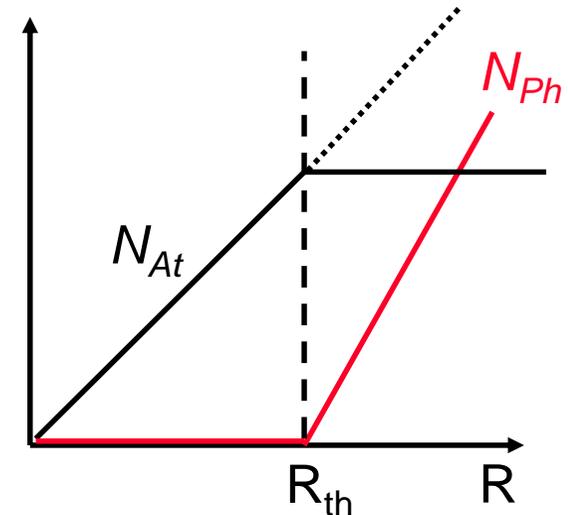


Abb.: Schematische Lösung der Laserbilanzgleichungen.

Die zeitabhängigen Lösungen der Laserratengleichungen beschreiben auch

- **Relaxationsoszillationen**
- Einschwingverhalten des Lasers.

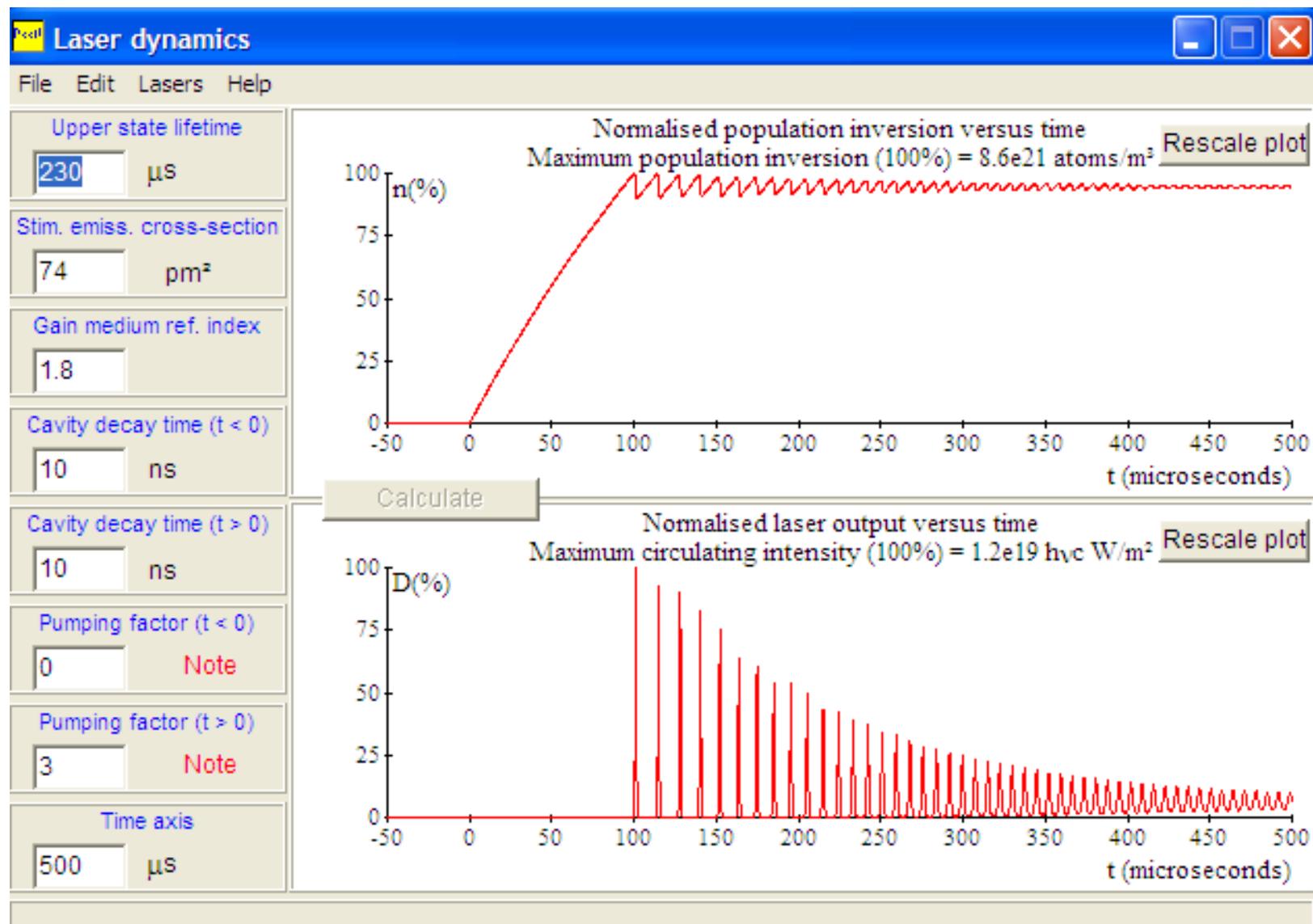
(Simulationssoftware erhältlich unter:

<http://www.st-andrews.ac.uk/~psst/>

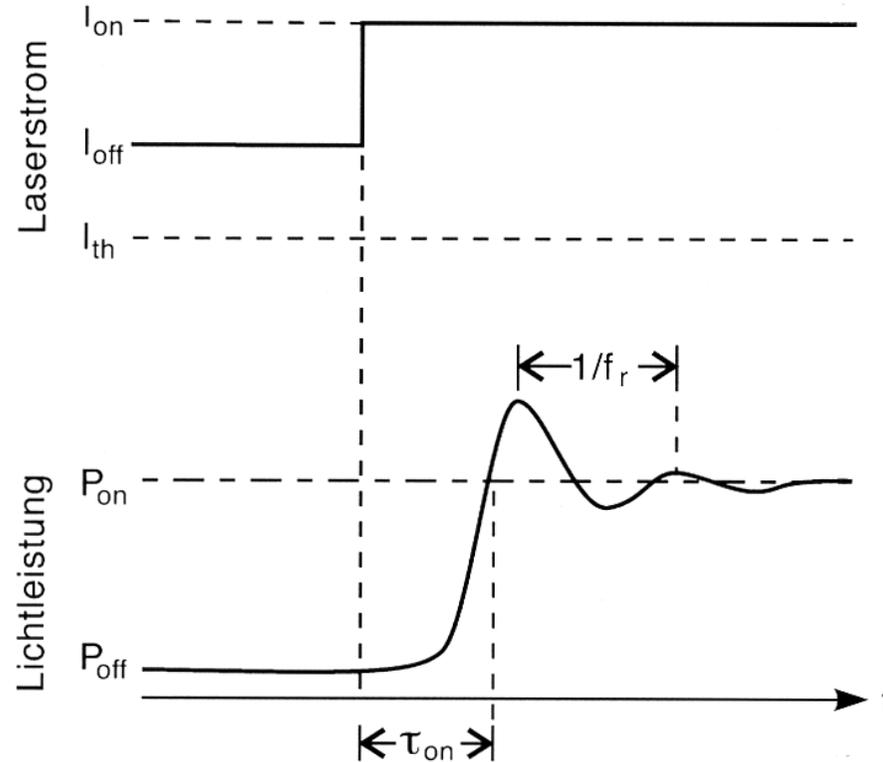
...leider unter 64 bit Windows 7 nicht mehr lauffähig )

Alternative bei Wolfram.com: <http://demonstrations.wolfram.com/TransientResponseOfASemiconductorLaser/>

# Simulation von Lasern



# Großsignalmodulation



Relaxationsoszillationen bei Großsignalmodulation mit

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \omega_r$$

# Lasergleichungen II

---

- Laserbilanzgleichungen geben keine Aussage
- über die Spektraleigenschaften des ausgesendeten Laserlichtes
- Rolle der Geometrie des Resonators

## Lasermmodell:

- Resonator der Länge  $L$ ,
- zwei Spiegel mit den (reellen) Feldreflektivitäten  $r_1$  und  $r_2$ , optische Konstanten  $n$  und  $\alpha$ .

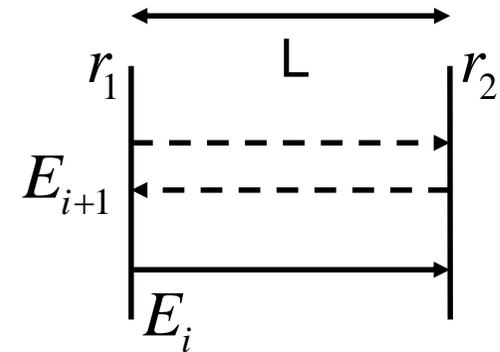


Abb.: Laserresonator

Für eine Welle, die sich im Resonator ausbreitet gilt:

$$E(x, t) = E_0 e^{j\omega t} e^{-\Gamma x}$$

mit  $\Gamma = j(\beta - j\frac{\alpha}{2})$  und  $\beta = \frac{n 2\pi}{\lambda} = n k_0$

# Lasergleichungen II

---

An der Laserschwelle kann die Welle ungeschwächt und phasenrichtig einen kompletten Umlauf ausführen. ( $E_{i+1}=E_i$ )

$$E_{i+1} = \underbrace{r_1}_{\text{Reflektion 1. Spiegel}} \cdot \underbrace{r_2}_{\text{Reflektion 2. Spiegel}} \cdot \underbrace{E_i e^{-2\Gamma L}}_{\text{Propagation durch Kavität}} \Rightarrow r_1 r_2 = e^{2\Gamma L}$$

Ohne Beschränkung der Allgemeinheit werden  $r_1$  und  $r_2$  als reell und positiv angesetzt (evtl. Phasenverschiebungen bei der Reflektion werden in die effektive Resonatorlänge hineingepackt). Damit ergibt sich jeweils eine Gleichung für die Phase und die Amplitude:

1. Phasenbedingung:  $r_1 r_2 = e^{2\Gamma L} \quad \Gamma = j\left(\beta - j\frac{\alpha}{2}\right)$

$\text{Im}\{\exp(2\Gamma L)\} = 0, \quad 2L\beta = m2\pi \Rightarrow L = m\left(\frac{\lambda}{2n}\right)$  Lasing nur für gewisse Wellenlängen

$$\left(\beta = \frac{n2\pi}{\lambda}\right)$$

Ausbreitung von stehenden Wellen (Moden)

# Lasergleichungen II

2. Amplitude soll erhalten bleiben (Realteile gleich):

Mit  $\Gamma = j(\beta - j\frac{\alpha}{2})$  folgt

$$\ln(r_1 r_2) = -j\frac{\alpha}{2} 2L = \alpha L \quad \text{also} \quad g = -\alpha = \frac{1}{L} \ln \frac{1}{r_1 r_2}$$

$$r_1 r_2 = e^{2\Gamma L}$$

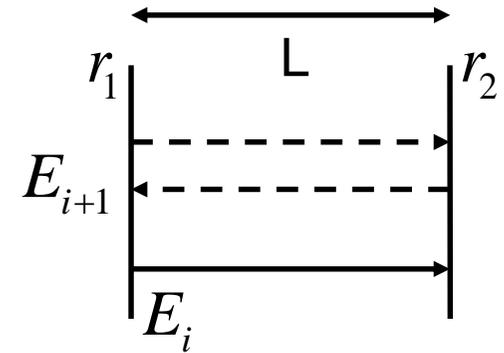


Abb.: Laserresonator

Damit ergibt sich die Schwellenverstärkung zu:  $g_{th} = \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R}$  (mit  $r_1^2 = r_2^2 = R$ )

# Übersicht über die Vorlesung

---

- I. Einleitung
- II. Optik in Halbleiterbauelementen
- III. Herstellungstechnologien
- IV. Halbleiterleuchtdioden
- V. Quantenmechanische Grundlagen der Optoelektronik
- VI. Laserdioden
  - VI.0 Einleitung
  - VI.1 Lasergleichungen
  - VI.2 Halbleiterlaserdioden
  - VI.3 Laser mit verteilter Rückkopplung (VCSEL, DBR, DFB)
  - VI.4 Wellenlängenabstimmung
  - VI.5 AC-Betrieb von Laserdioden
- VII. Modulatoren
- VIII. Weitere Quantenbauelemente

# Halbleiterlaserdioden

---

- 1958: Theorie des Lasers (Schawlow & Townes et al., Bell Labs)
- 1960: Erste Realisierung mit Rubin ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  mit Cr)  
(Maiman et al., Hughes Research)
- 1960: Erster kontinuierlicher (continuous wave, cw) Laserstrahl  
aus HeNe Gaslaser (Ali Javan, Bell-Labs)
- 1962: Erster Halbleiterdiodenlaser (R. N. Hall (General Electric))

# Wirkungsweise der Halbleiterlaserdiode

Im Prinzip: anorganische Leuchtdiode mit Resonator

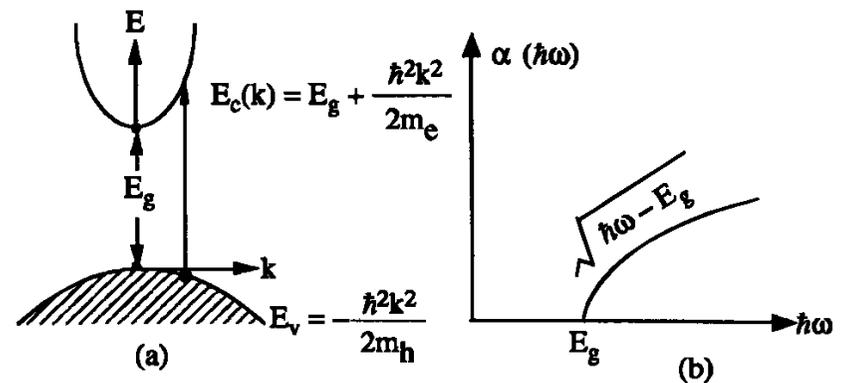
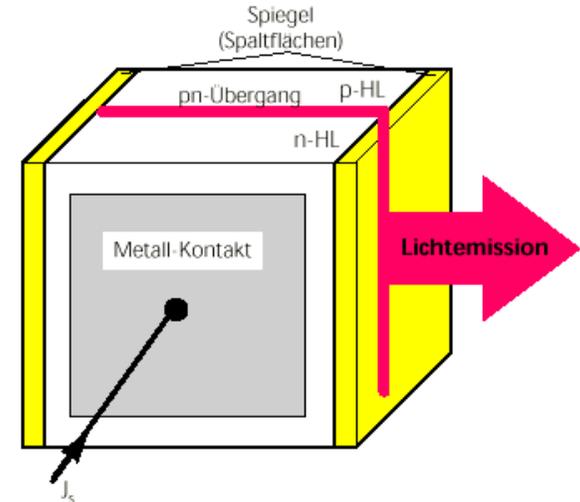
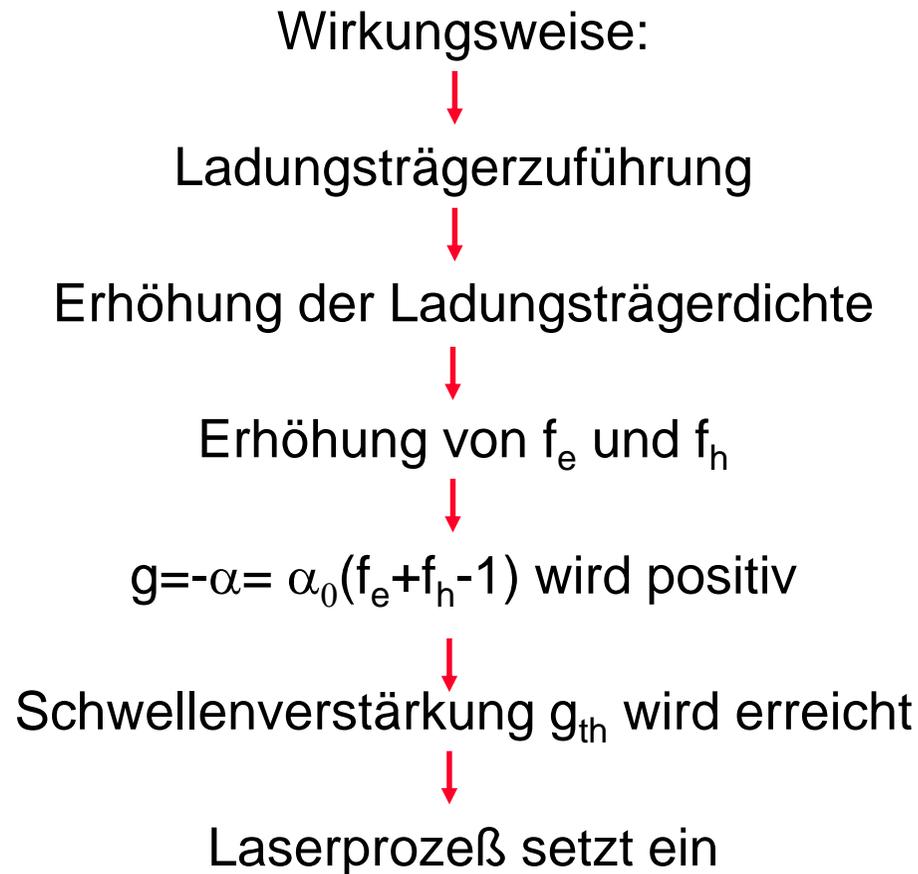
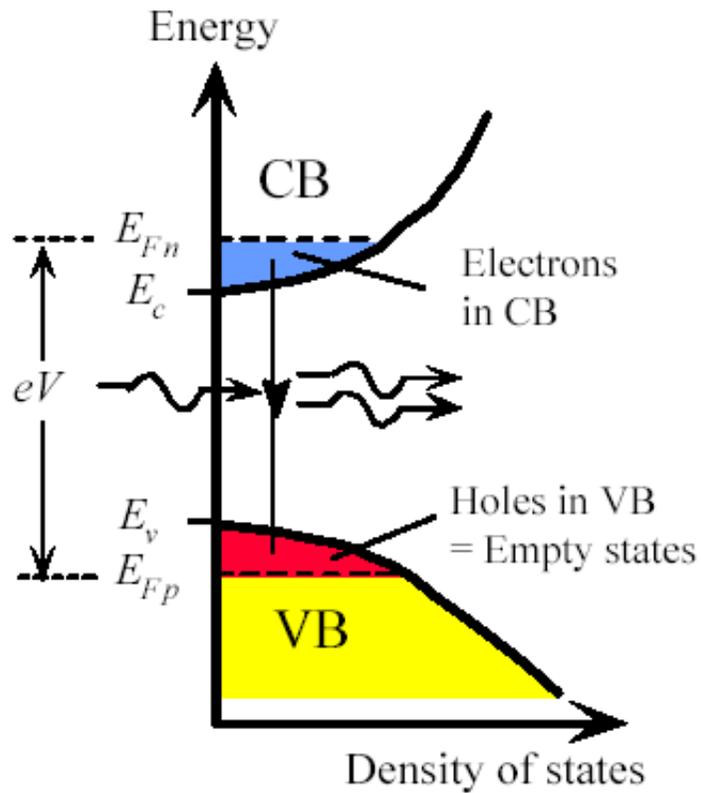
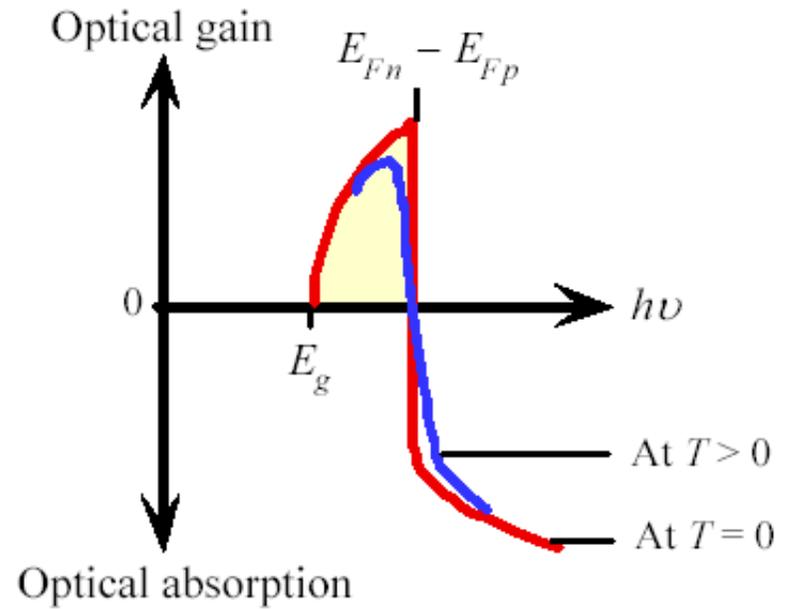


Abb. : Allgemeines Schema  
Halbleiterlaser

# Wirkungsweise der Halbleiterlaserdiode



(a)

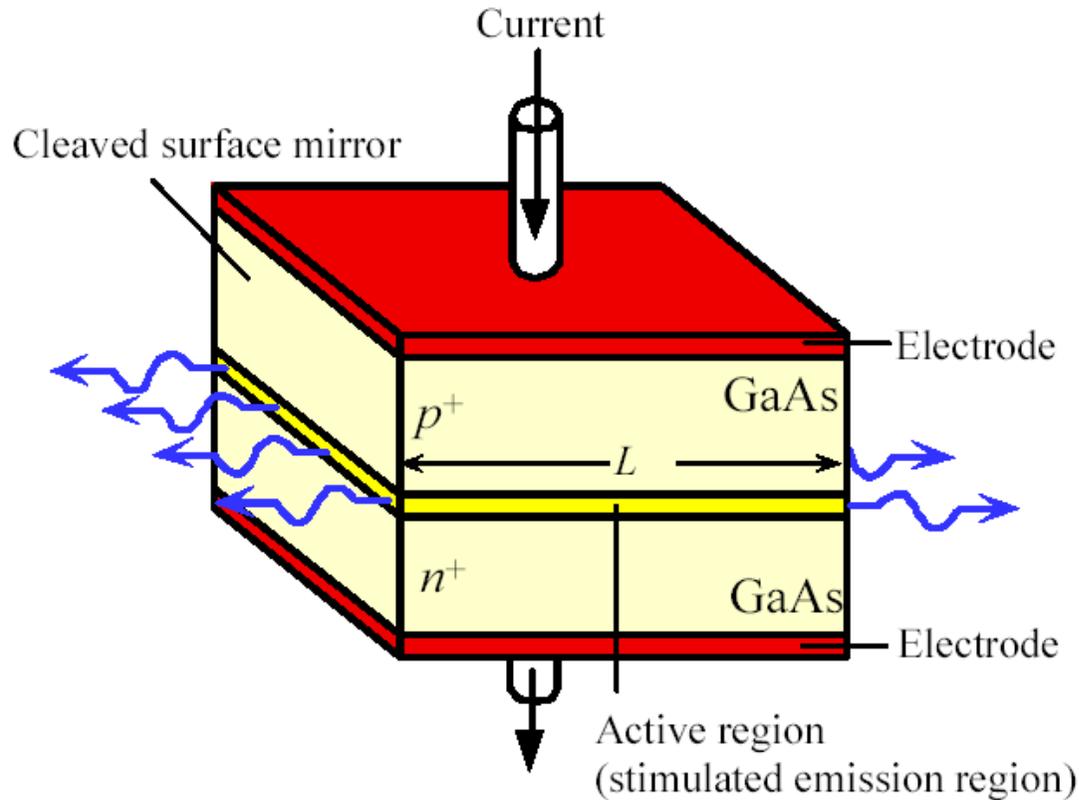


(b)

Abb.: Optische Verstärkung im Halbleiter

# Halbleiterlaserdioden: Der Kantenemitter (Fabry-Perot-Laser)

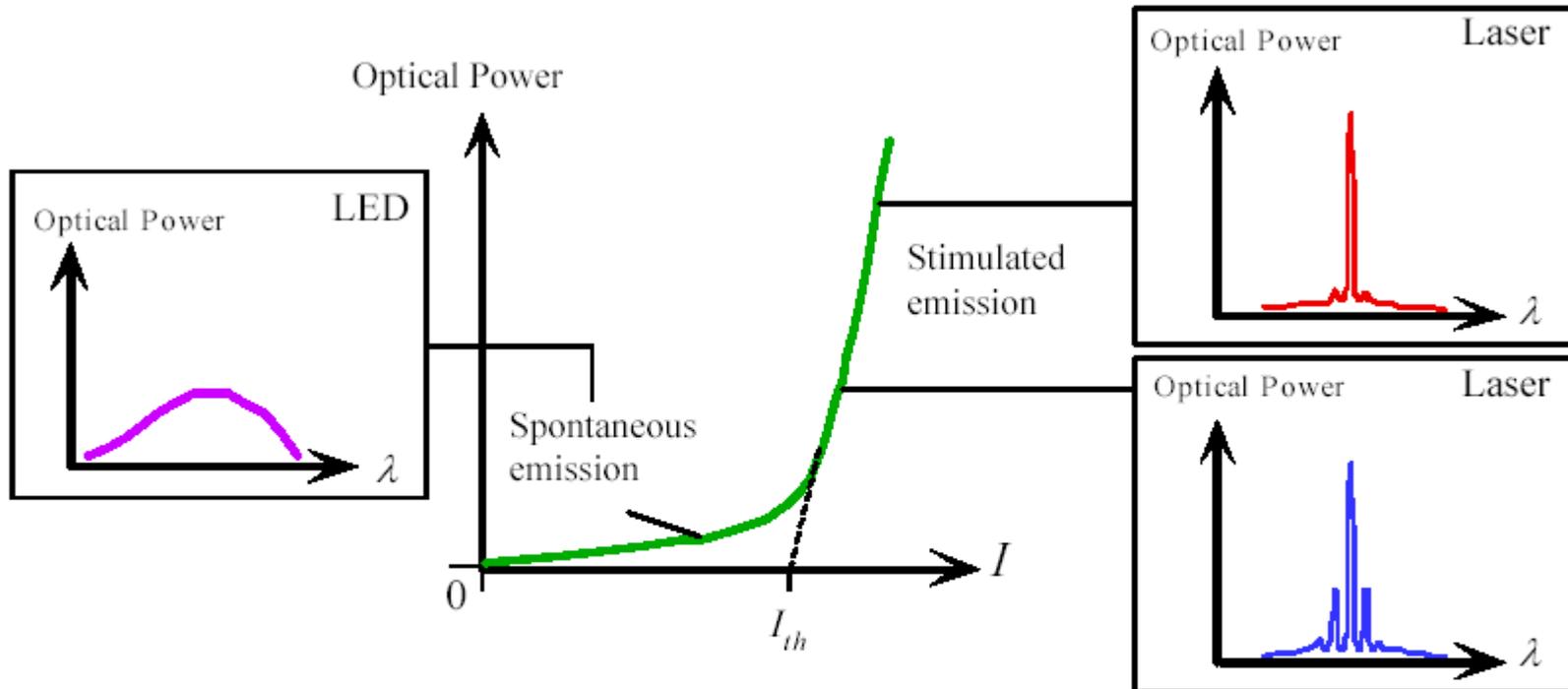
---



*Abb. : Schema eines kantenemittierenden GaAs-Halbleiterlasers*

A schematic illustration of a GaAs homojunction laser diode. The cleaved surfaces act as reflecting mirrors.

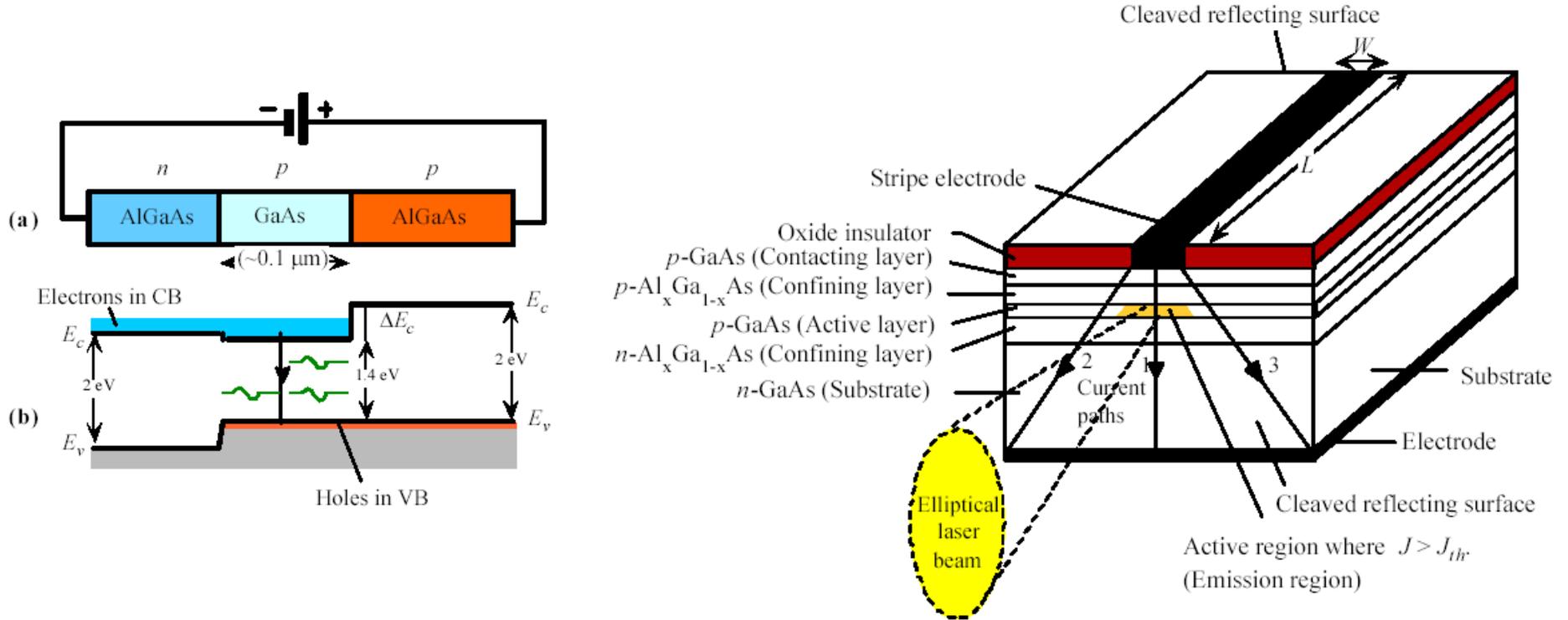
# Halbleiterlaserdiode: Ausgangsleistung, Ausgangsspektrum



Typical output optical power vs. diode current ( $I$ ) characteristics and the corresponding output spectrum of a laser diode.

Abb. : Schema zum Betrieb eines Halbleiterlasers

# Halbleiterlaserdiode: Doppelheterostrukturlaserdiode



Schematic illustration of the structure of a double heterojunction stripe contact laser diode

Abb. Schema eines Doppelheterostrukturlasers

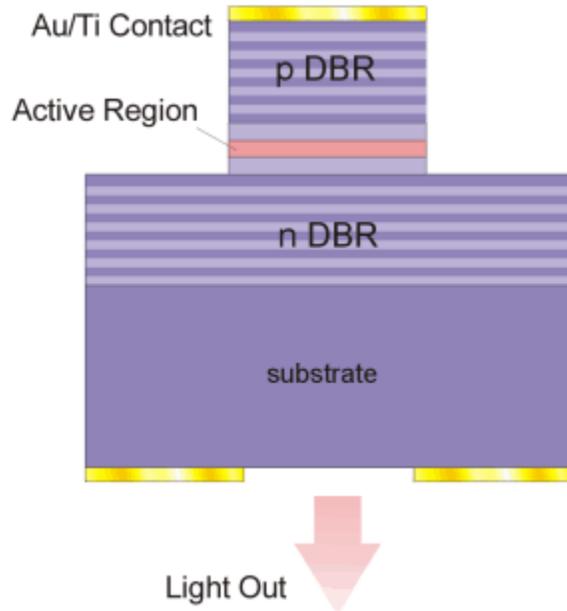
# Übersicht über die Vorlesung

---

- I. Einleitung
- II. Optik in Halbleiterbauelementen
- III. Herstellungstechnologien
- IV. Halbleiterleuchtdioden
- V. Quantenmechanische Grundlagen der Optoelektronik
- VI. Laserdioden
  - VI.0 Einleitung
  - VI.1 Lasergleichungen
  - VI.2 Halbleiterlaserdioden
  - VI.3 Laser mit verteilter Rückkopplung (VCSEL, DBR, DFB)
  - VI.4 Wellenlängenabstimmung
  - VI.5 AC-Betrieb von Laserdioden
- VII. Modulatoren
- VIII. Weitere Quantenbauelemente

# Laserdioden mit verteilter Rückkopplung

## VCSEL



Kombination von vertikal dielektrischen Spiegeln mit aktiver Schicht

Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL)

Selektion der Lasermoden durch schmalbandige dielektrische Spiegel

## DBR

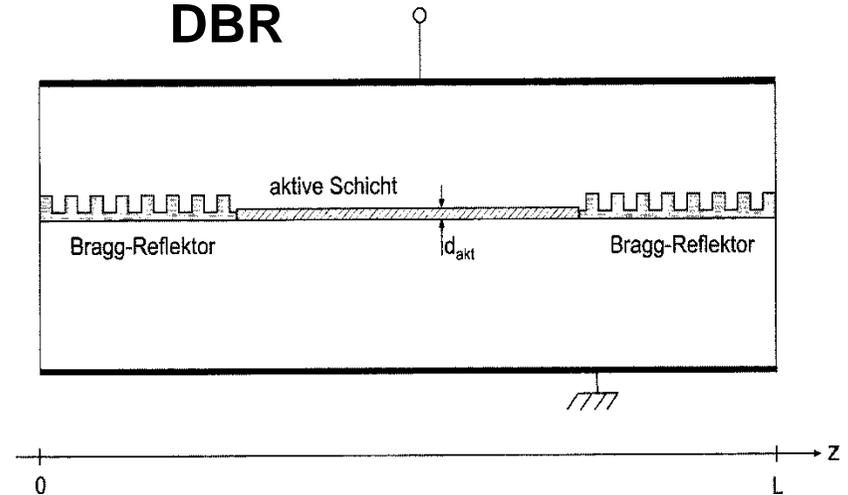


Abb. 19.18. Schematische Darstellung eines DBR-Lasers

Kombination von Wellenleitung und „lateralen dielektrischen Spiegeln“:

Distributed Bragg Reflektor (DBR)-  
Laser

# DFB-Laser

„Einbau“ des dielektrischen Spiegels in die aktive Zone

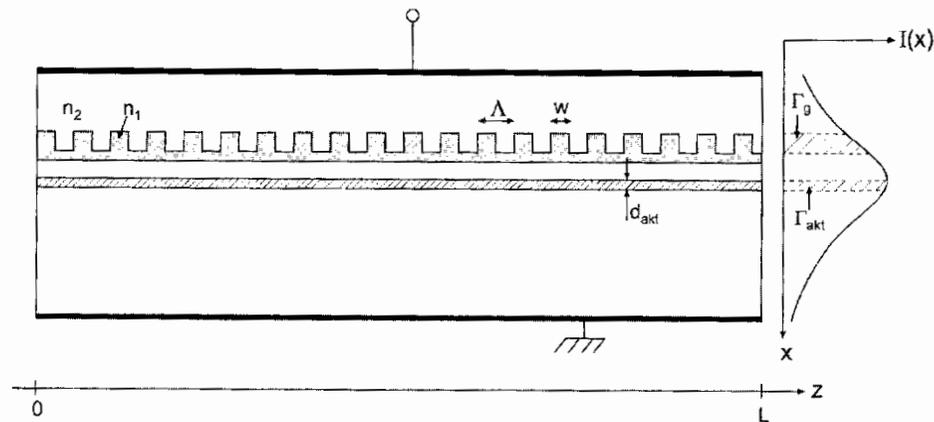


Abb. 19.12. Schematische Darstellung einer DFB-Laserstruktur und der transversalen Intensitätsverteilung der TE-Grundmode. Die Füllfaktoren für die aktive Schicht bzw. das Gitter sind mit  $\Gamma_{\text{akt}}$  bzw.  $\Gamma_{\text{g}}$  bezeichnet

Stärke der Rückkopplung wird bestimmt durch den Kopplungskoeffizienten  $\kappa$  bestimmt:

$$\kappa = \pi \frac{\Delta n}{\lambda} + j \frac{\Delta g}{4}$$

# DFB-Laser

---

Gitter führt zur Kopplung von kontradirektional laufenden Wellen:

Amplitude der  
nach rechts laufenden  
Welle:

$$\frac{\partial E_-}{\partial z} = \left( \frac{g_{\text{eff}}}{2} - j\delta \right) E_- - j\kappa E_+$$

Amplitude der  
nach links laufenden  
Welle:

$$\frac{\partial E_+}{\partial z} = - \left( \frac{g_{\text{eff}}}{2} - j\delta \right) E_+ - j\kappa E_-$$

mit

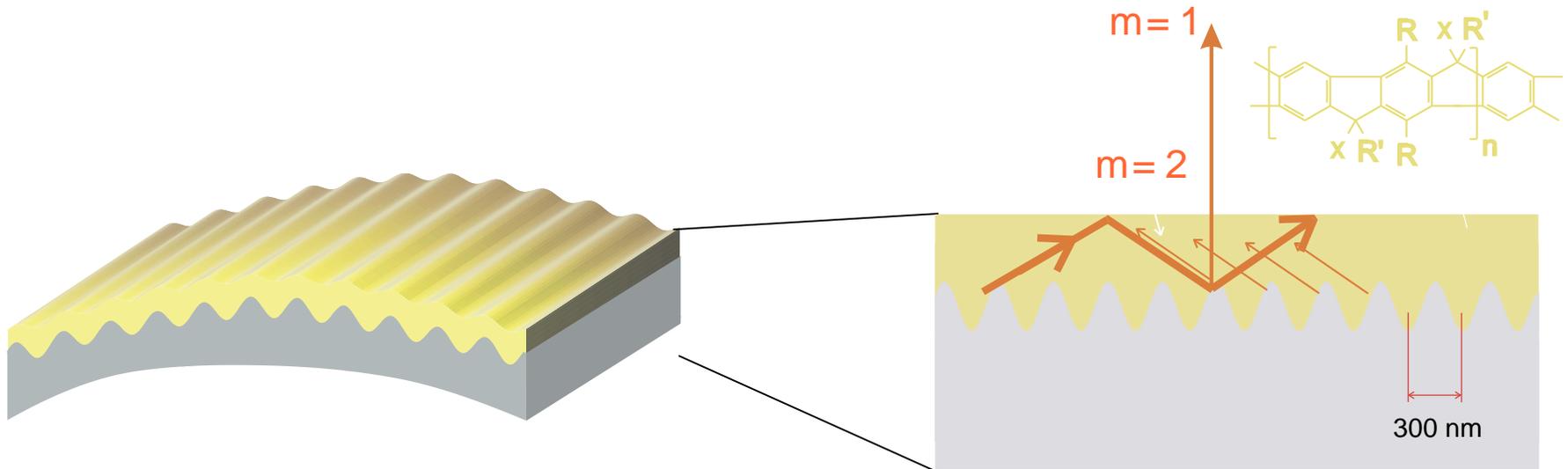
$$\delta = \beta - \beta_0; \quad \beta_0 = \frac{\pi}{\lambda}$$



# DFB-Laser

---

Durch DFB-Gitter ist auch Auskopplung aus dem Wellenleiter möglich:



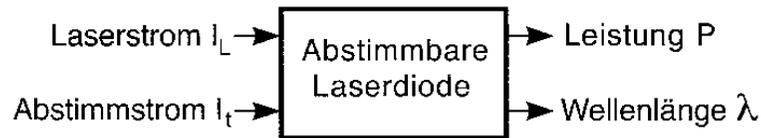
# Übersicht über die Vorlesung

---

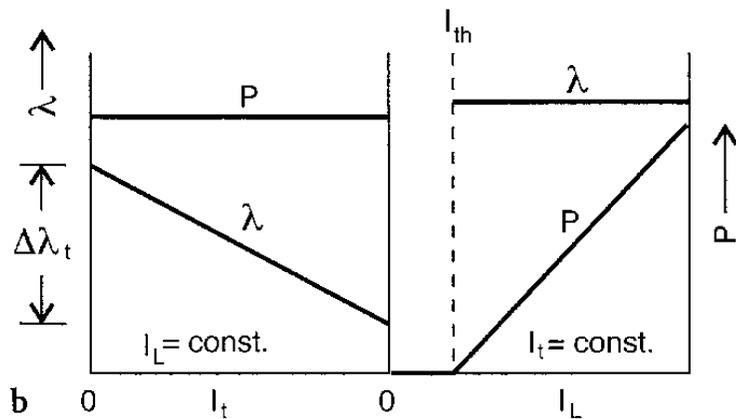
- I. Einleitung
- II. Optik in Halbleiterbauelementen
- III. Herstellungstechnologien
- IV. Halbleiterleuchtdioden
- V. Quantenmechanische Grundlagen der Optoelektronik
- VI. Laserdioden
  - VI.0 Einleitung
  - VI.1 Lasergleichungen
  - VI.2 Halbleiterlaserdioden
  - VI.3 Laser mit verteilter Rückkopplung (VCSEL, DBR, DFB)
  - VI.4 Wellenlängenabstimmung
  - VI.5 AC-Betrieb von Laserdioden
- VII. Modulatoren
- VIII. Weitere Quantenbauelemente

# Wellenlängenabstimmung

Idee: Aktive Kontrolle der Emissionswellenlänge durch Steuerstrom  $I_t$



a



b

Steuerstrom  $I_t$  (-spannung) variiert Brechungsindex direkt und indirekt durch Temperaturänderung

**Abb. 21.16.** **a** Schematische Darstellung einer idealisierten abstimmbaren Laserdiode, **b** mit zwei Steuerströmen lassen sich Lichtleistung und Wellenlänge einstellen, wobei beide Laserparameter unabhängig voneinander sind

# Wellenlängenabstimmung

Bsp.: Tunable Twin-Guide (TTG) Laser

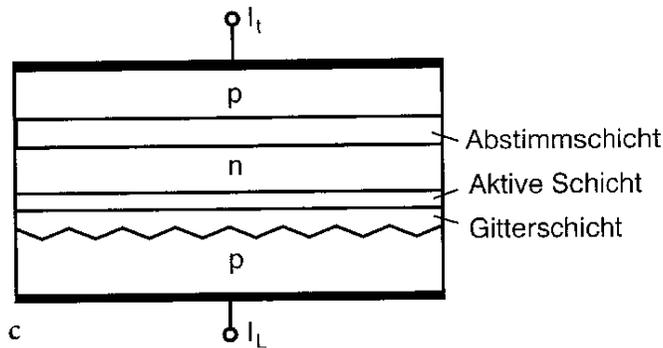


Abb. 21.19 a-c. Schematische Längsschnitte durch monolithisch integrierte abstimmbare Laserdioden. a Mehrsektions DFB-Laser, b Drei-Sektions DBR-Laser und c TTG Laser

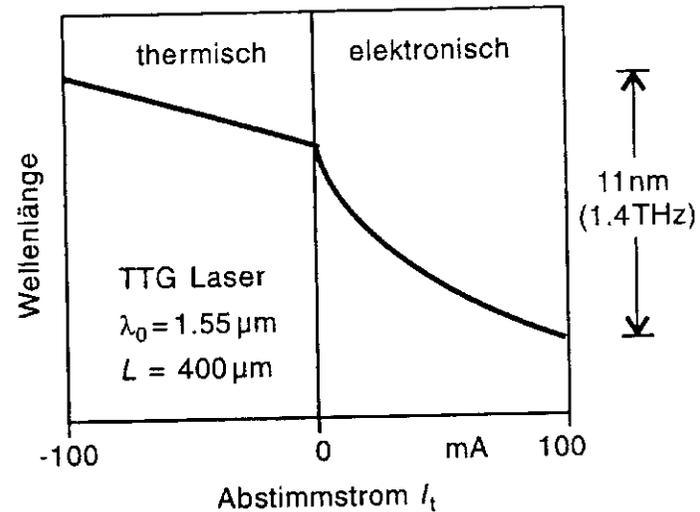


Abb. 21.20. Abstimmscharakteristik eines kontinuierlich abstimmbaren InGaAsP TTG Lasers bei 1,55  $\mu\text{m}$  Wellenlänge

- Änderung von  $n_{eff}$

-kann verwendet werden zur Abstimmung und zur Stabilisierung

# Wellenlängenabstimmung extern

---

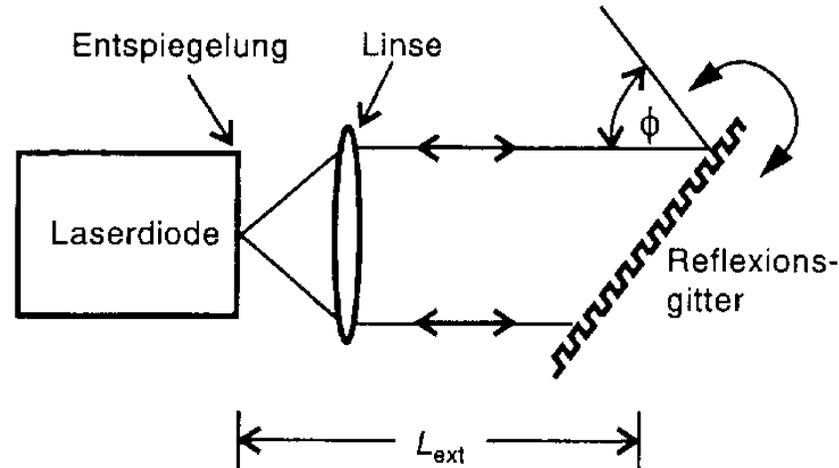


Abb. 21.22. Schematischer Aufbau einer abstimmbaren Laserdiode mit externem Resonator

- Reflexionsgitter als wellenlängenselektiver externer Spiegel
- Entspiegelung der Laserfacette erforderlich
- z.B. für die chemische Analytik