

# Übersicht über die Vorlesung

---

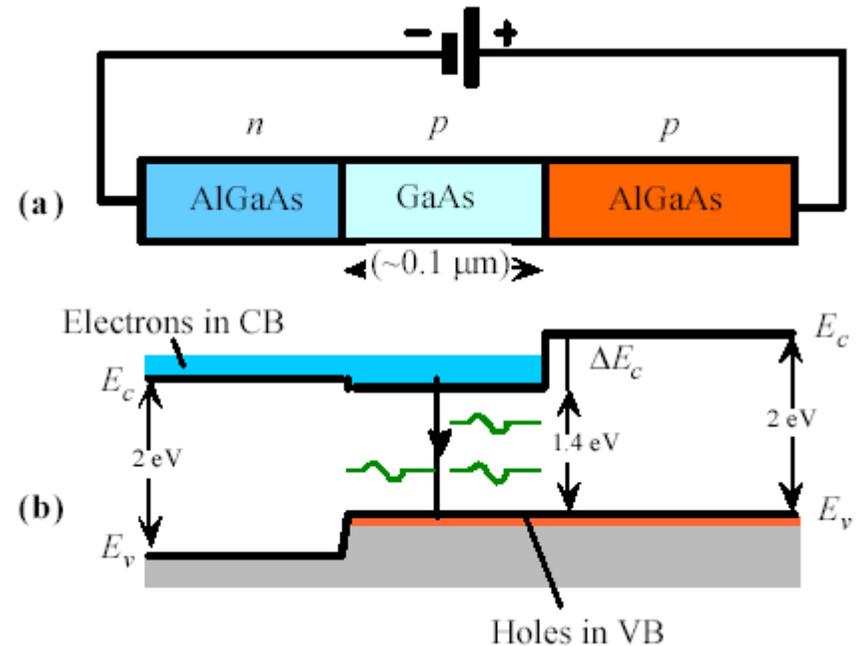
- I. Einleitung
- II. Optik in Halbleiterbauelementen
- III. Herstellungstechnologien
- IV. Halbleiterleuchtdioden
- V. Quantenmechanische Grundlagen der Optoelektronik
- VI. Laserdioden
  - VI.0 Einleitung
  - VI.1 Lasergleichungen
  - VI.2 Halbleiterlaserdioden
  - VI.3 Laser mit verteilter Rückkopplung (VCSEL, DBR, DFB)
  - VI.4 Wellenlängenabstimmung
  - VI.5 AC-Betrieb von Laserdioden
  - VI.6 Diodengepumpte Festkörperlaser
- VII. Modulatoren
- VIII. Weitere Quantenbauelemente

# Halbleiterlaserratengleichungen

DGL Ladungsträgerdichte:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{eV} - R(N) - \frac{G}{V\tau_s} S$$

Ladungsträgerinjektion



Ladungsträgerdichte:  $N$   
 Photonenzahl in Lasermode:  $S$   
 Strom:  $I$   
 $V$ : Rekombinationsvolumen

(nach M.C. Amann in  
 Optische Kommunikationstechnik,  
 E. Voges, K. Petermann (Hrsg.),  
 S. 696)

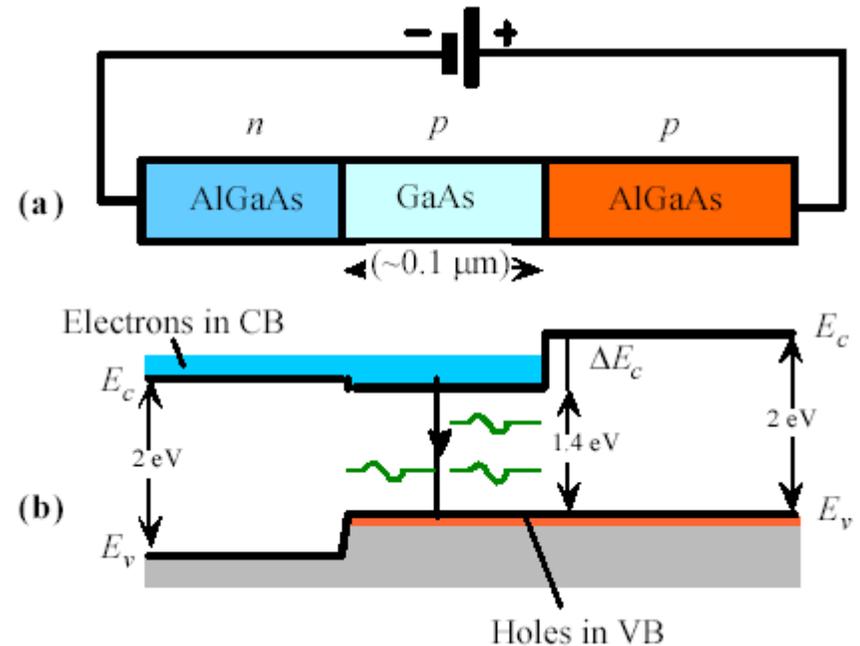
# Halbleiterlaserratengleichungen

DGL Ladungsträgerdichte:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{eV} - R(N) - \frac{G}{V\tau_s} S$$

Rekombination

$$R(N) = AN + BN^2 + CN^3$$



Ladungsträgerdichte:  $N$   
 Photonenzahl in Lasermode:  $S$   
 Strom:  $I$   
 $V$ : Rekombinationsvolumen

# Halbleiterlaserratengleichungen

DGL Ladungsträgerdichte:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{eV} - R(N) - \frac{G}{V\tau_s} S$$

stim. Emiss.

Ladungsträgerdichte:  $N$   
 Photonenzahl in Lasermode:  $S$   
 Strom:  $I$   
 $V$ : Rekombinationsvolumen

Normierte Verstärkung

$$G = \Gamma v_g \tau_s g$$

$v_g$ : Gruppengeschwindigkeit  
 der Photonen

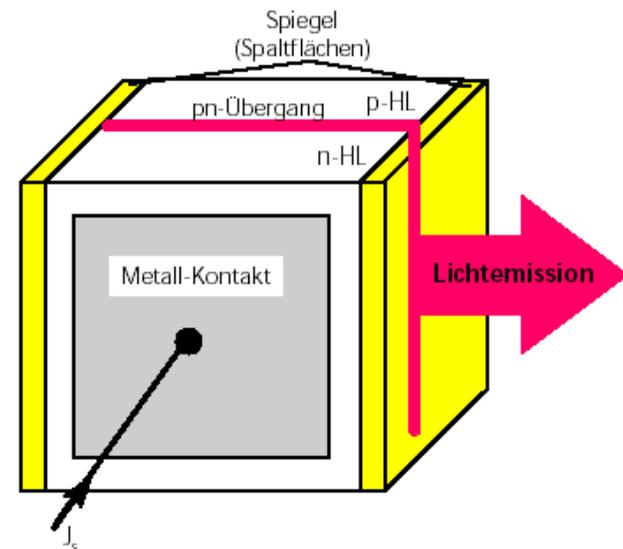
$\tau_s$ : Photonenlebensdauer

$g$ : Materialgewinn (in  $\text{cm}^{-1}$ )

$$g \approx (N - N_{tr}) \frac{\partial g}{\partial N}, \text{ wobei } N_{tr} \text{ die}$$

Transparenzdichte ist, bei der die

Absorption verschwindet



# Halbleiterlaserratengleichungen

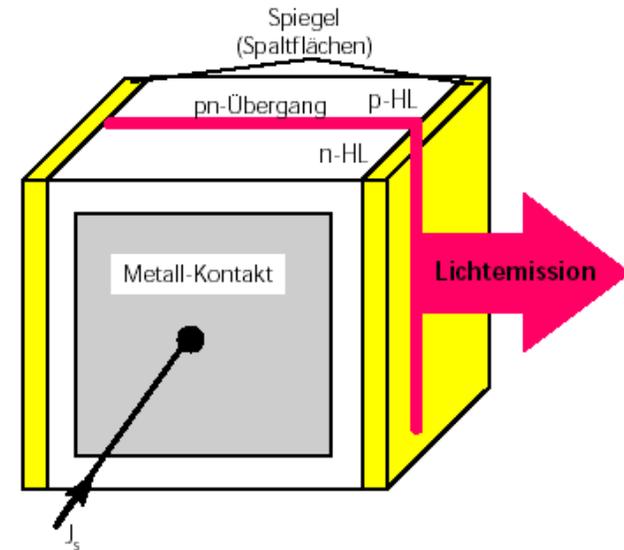
DGL Ladungsträgerdichte:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{eV} - R(N) - \frac{G}{V\tau_s} S$$

DGL Photonenzahl:

$$\frac{dS}{dt} = (G - 1) \frac{S}{\tau_s} + R_{sp}$$

$R_{sp}$ : spontane Emissionsrate  
in Lasermode



Ladungsträgerdichte:  $N$   
Photonenzahl in Lasermode:  $S$   
Strom:  $I$   
 $V$ : Rekombinationsvolumen

# Schwellenverhalten

Stationärer Fall:

Strom:

$$I_{th} = eVR(N_{th})$$

Optische Leistung pro Spiegel:

$$P \propto S = \frac{\tau_s}{e} (I - I_{th})$$

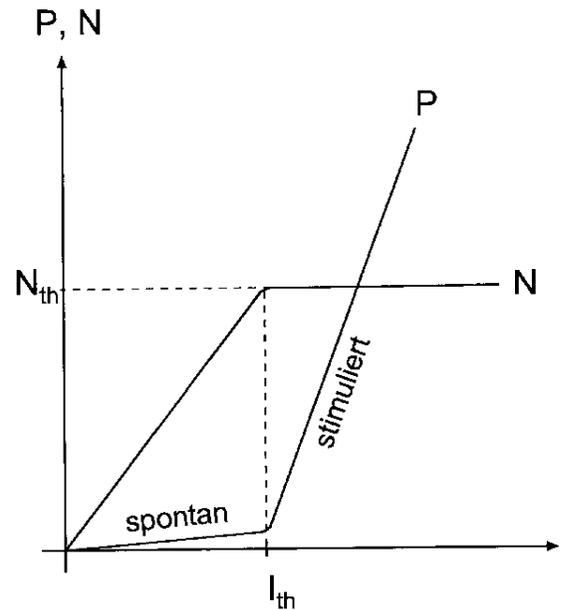
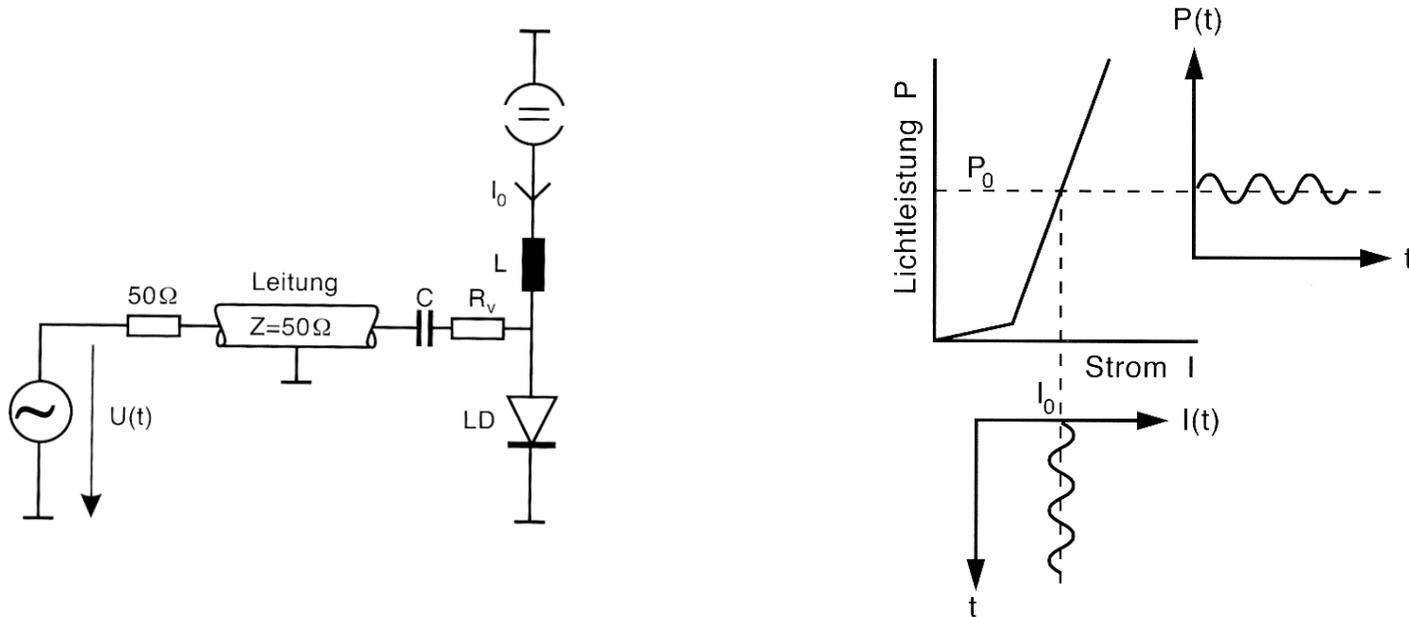


Abb. 19.10. Abhängigkeit der Ausgangsleistung  $P$  und der Ladungsträgerdichte  $N$  vom injizierten Strom  $I$

# Kleinsignalmodulation



Linearisierung der Ratengleichungen:

$$I(t) = I_0 + i(t)$$

$$S(t) = S_0 + s(t)$$

$$N(t) = N_0 + n(t)$$

$$i(t) = \text{Re}[i(\omega)e^{j\omega t}]$$

$$s(t) = \text{Re}[s(\omega)e^{j\omega t}]$$

$$n(t) = \text{Re}[n(\omega)e^{j\omega t}]$$

# Kleinsignalmodulation

Linearisierte Ratengleichungen:

LT-Dichte: 
$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{i(t)}{eV} - \frac{n(t)}{\tau_d} - \frac{G_0}{V\tau_s} s(t) - \frac{S_0}{V\tau_s} \left( n(t) \frac{\partial G}{\partial N} + s(t) \frac{\partial G}{\partial S} \right)$$

wobei

$$G(n, s) = G_0 + n \frac{\partial G}{\partial N} + s \frac{\partial G}{\partial S}$$

und

$$\tau_d^{-1} = \left. \frac{dR(N)}{dN} \right|_{N=N_{th}}$$

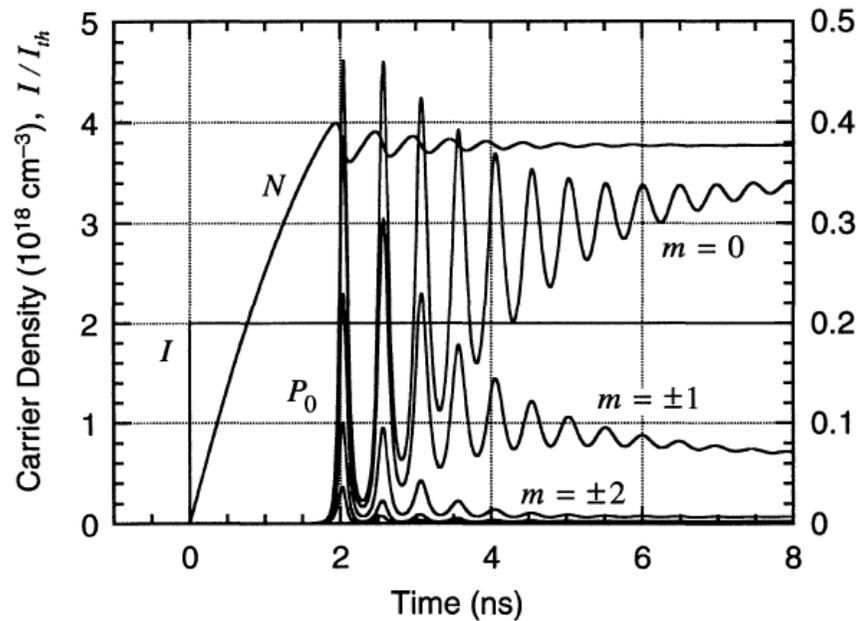
(differentielle Ladungsträgerlebensdauer)

Photonenzahl:

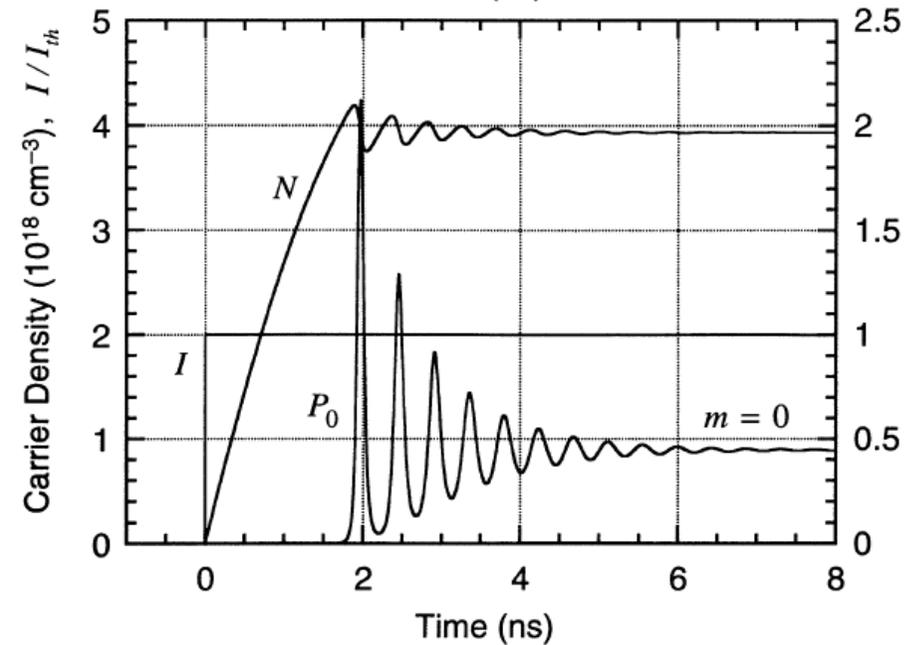
$$\frac{ds(t)}{dt} = (G_0 - 1) \frac{s(t)}{\tau_s} - \frac{S_0 + n_{sp}}{\tau_s} \left( n(t) \frac{\partial G}{\partial N} + s(t) \frac{\partial G}{\partial S} \right)$$



# Großsignalmodulation: Simulierte Beispiele



Fabry-Perot-Laser



VCSEL

# Kleinsignalmodulation

Stromabhängige  
Modulationsbandbreite

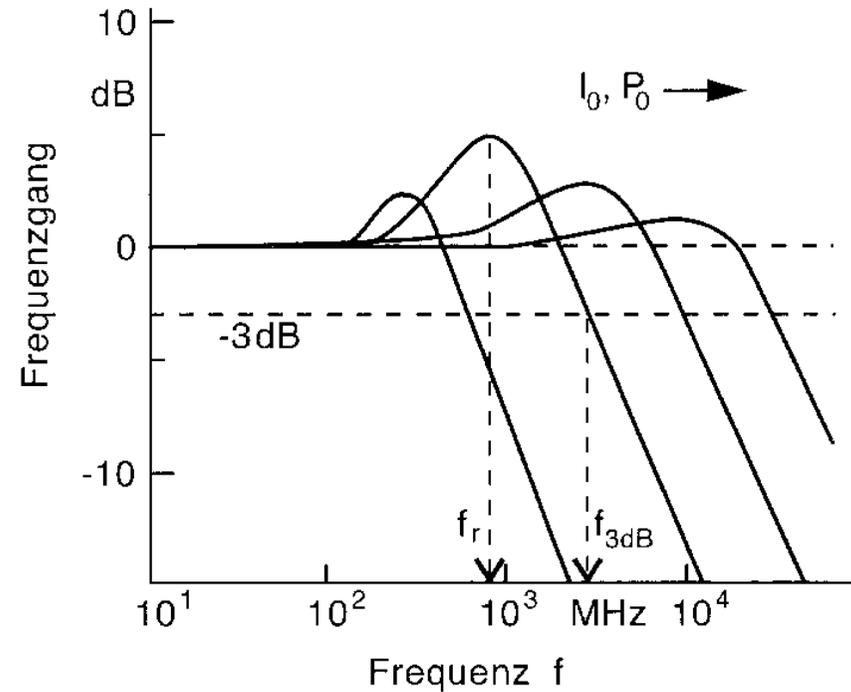


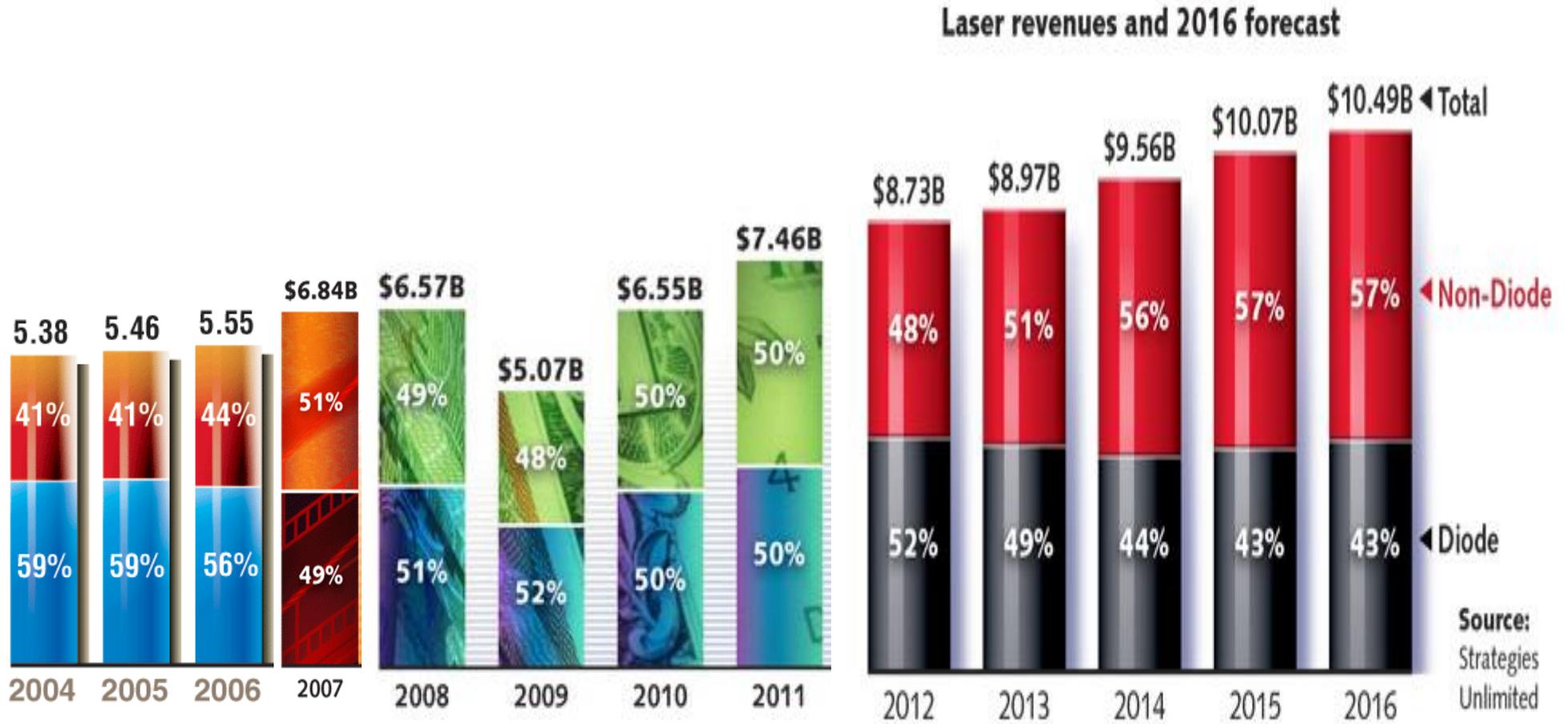
Abb. 21.5. Frequenzgang der Kleinsignal-Modulation einer typischen InGaAsP-Laserdiode bei 1,5  $\mu\text{m}$  Wellenlänge

# 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
  - VI.6 Diodengepumpte Festkörperlaser
- VII. Modulatoren
- VIII. Weitere Quantenbauelemente

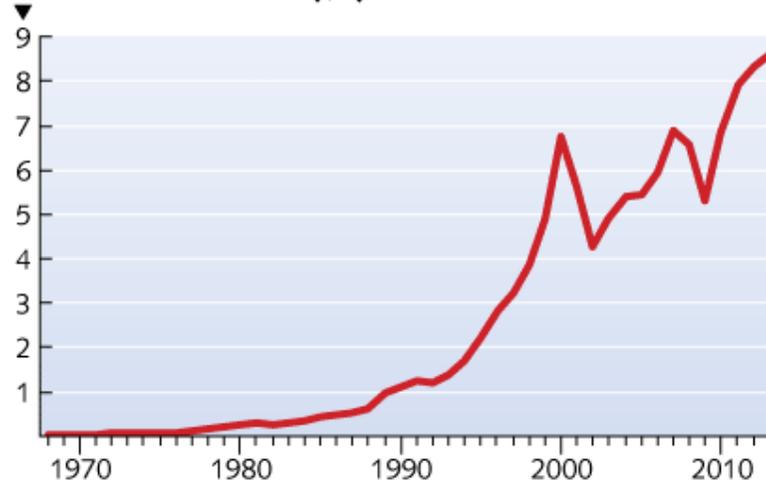
# Weltweiter Umsatz mit Lasern 2004-2016 (10<sup>9</sup> \$)



Quelle: Laser Focus World 2008,2010, 2012, 2014, 2015, 2016

# Übersicht über die Weltmärkte in der Lasertechnologie

Historic laser revenue (\$B)



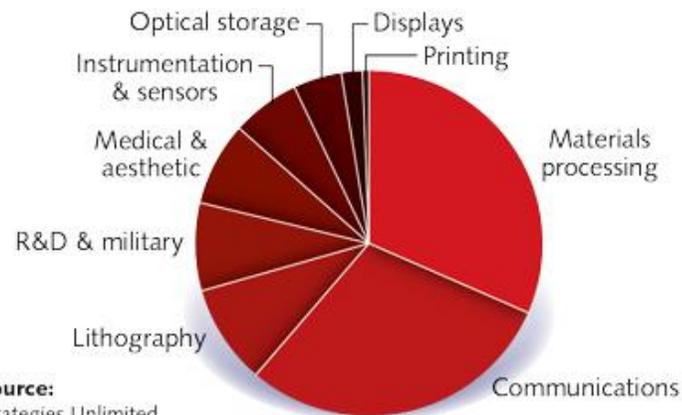
Source: Strategies Unlimited

Industrial laser revenues (US\$M)

Laser Type	2013	2014	%	2015	%
CO <sub>2</sub>	863	884	2	877	1
Solid state	456	444	-3	431	-3
Fiber	841	960	14	1085	13
Other	327	343	5	366	7
<b>Total</b>	<b>2487</b>	<b>2631</b>	<b>6</b>	<b>2759</b>	<b>5</b>

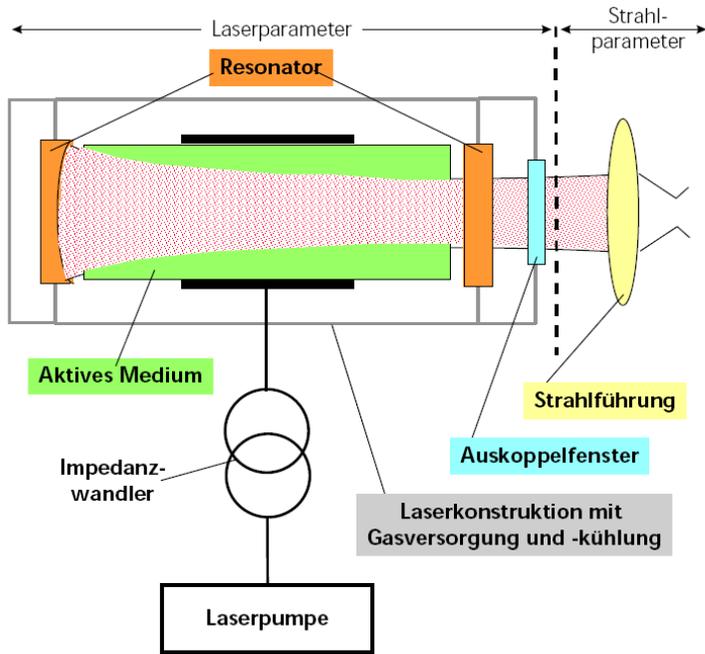
Source: Strategies Unlimited

Market segments

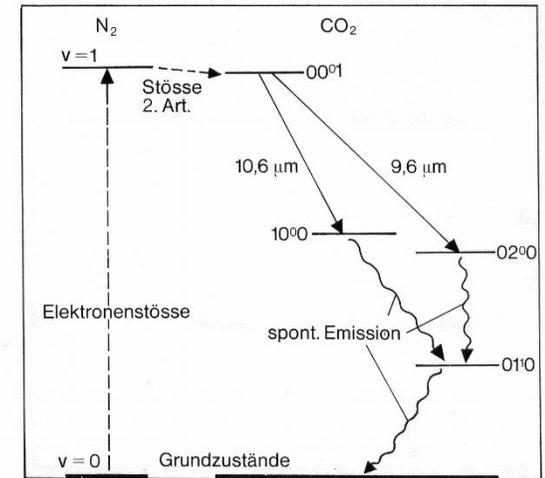
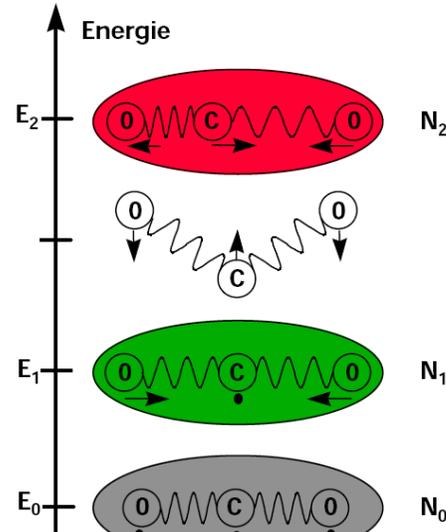


Source:  
Strategies Unlimited

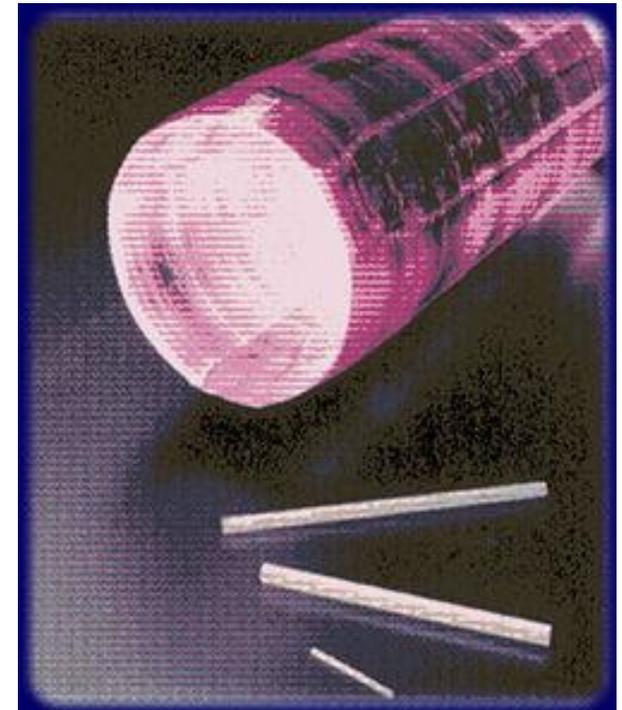
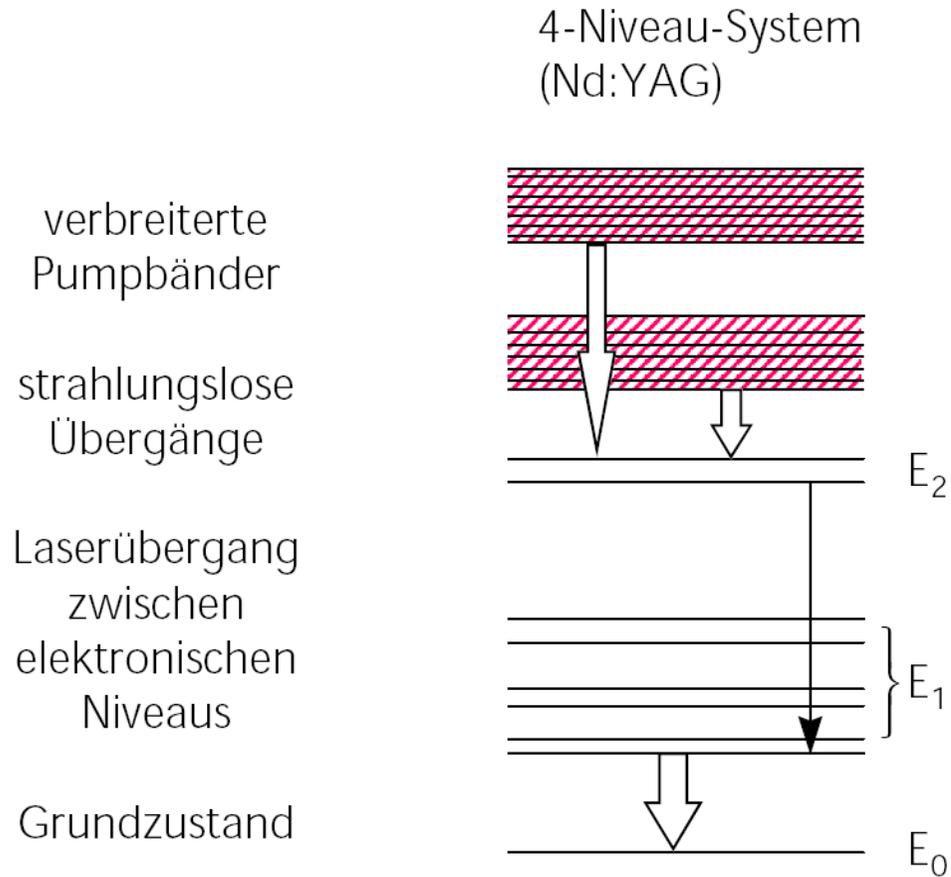
# Das Arbeitspferd der Materialbearbeitung: CO<sub>2</sub>-Laser



Aktives Medium: CO<sub>2</sub>-Molekül

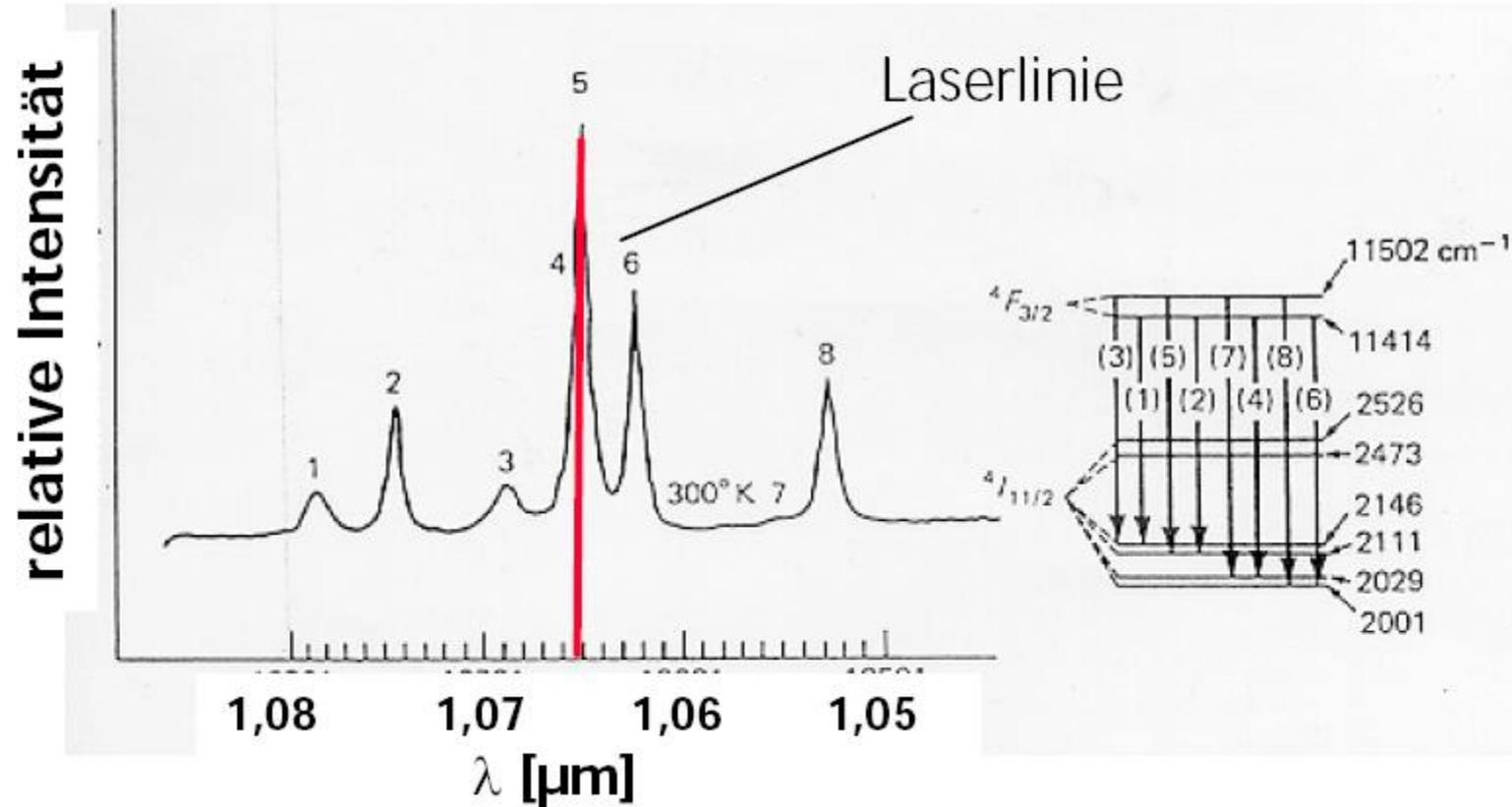


# Pumpschema Nd:YAG-Laser



Ein Nd:YAG-Kristall

# — Fluoreszenzspektrum $\text{Nd}^{3+}$ in YAG (300 K)

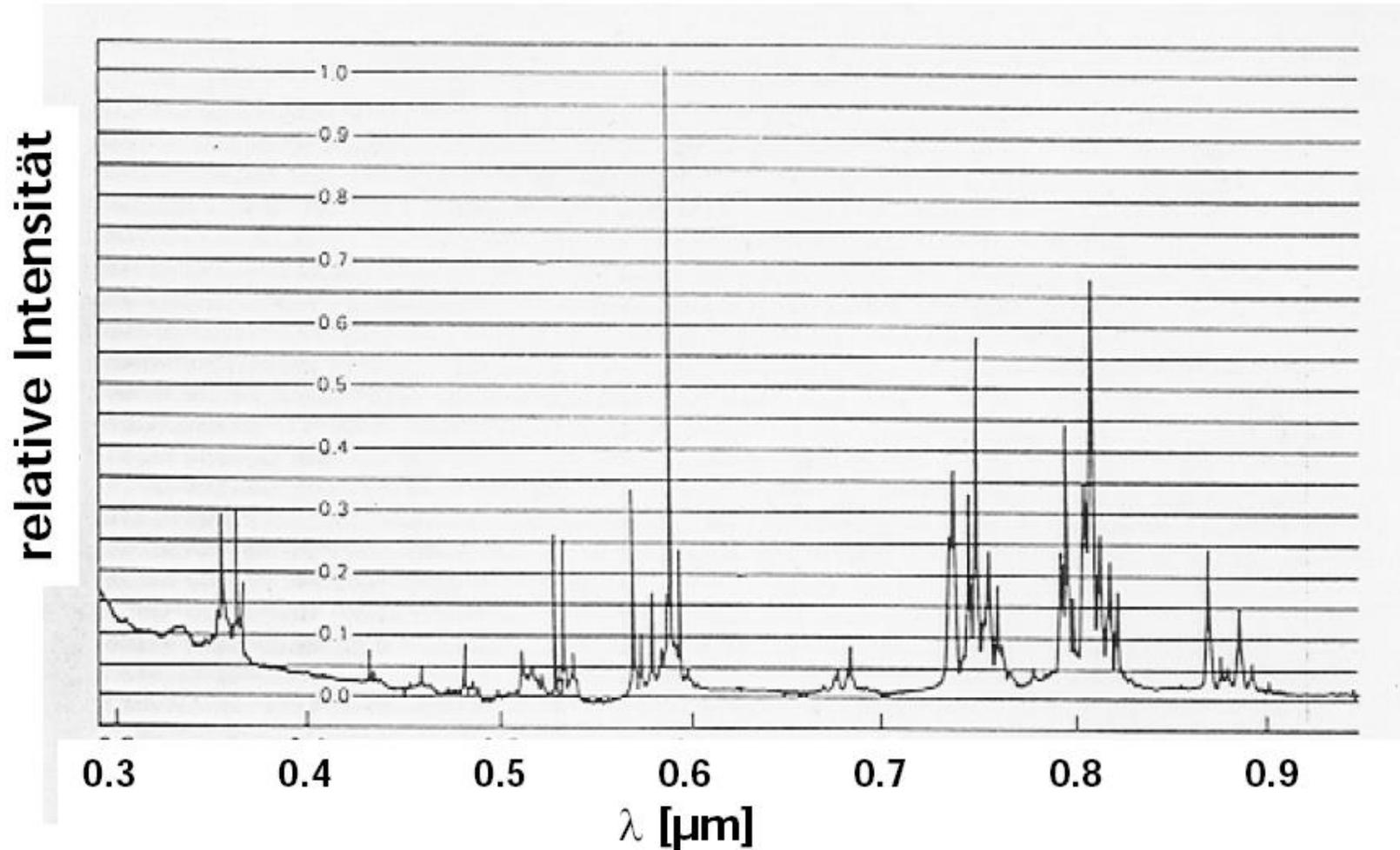


...starke Emission im IR

Nd: Neodym

YAG: Yttrium-Aluminium-Garnet

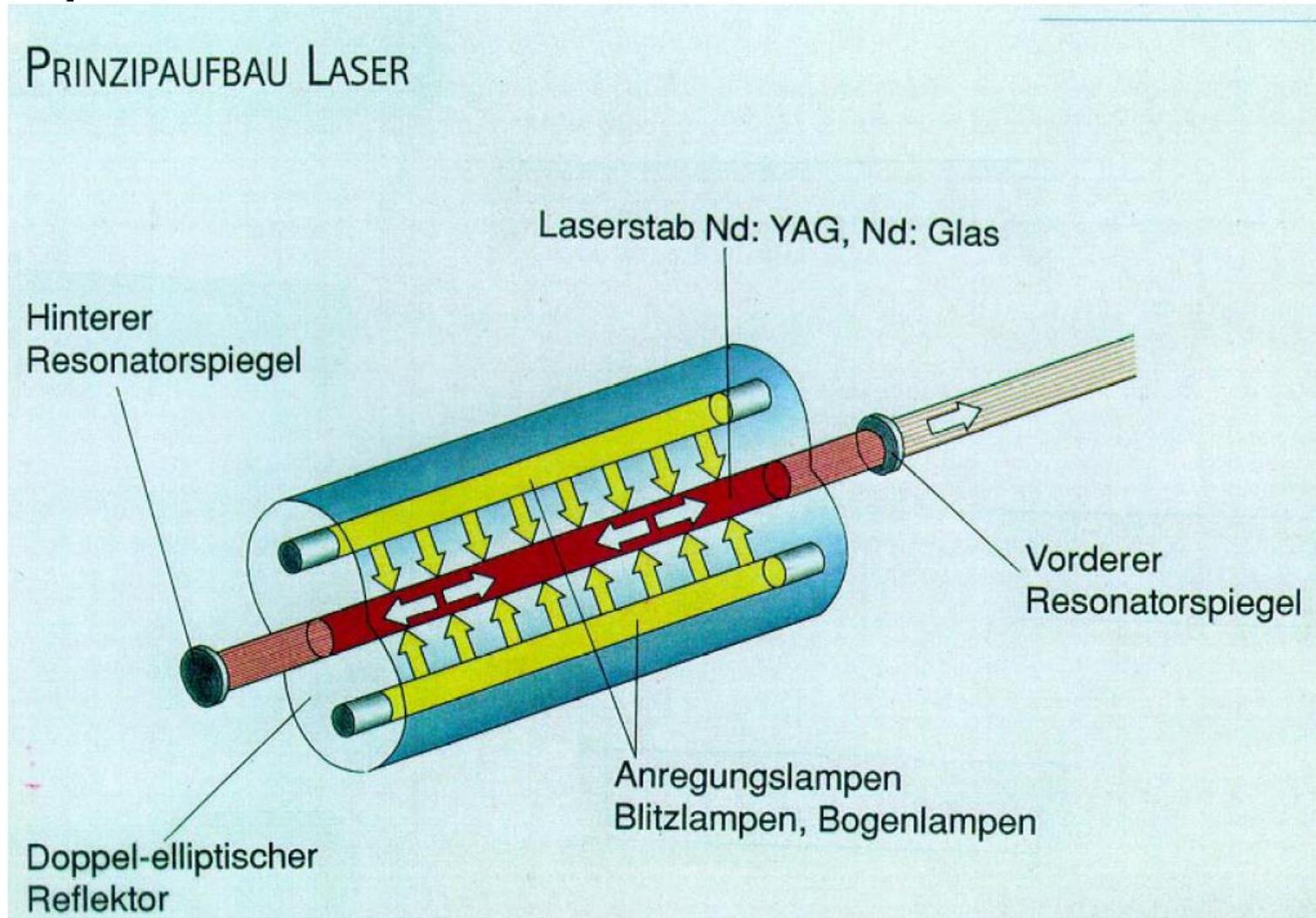
# — Absorptionsspektrum Nd:YAG (300 K)



...starke Absorption im sichtbaren: optisches Pumpen im sichtbaren Spektralbereich möglich

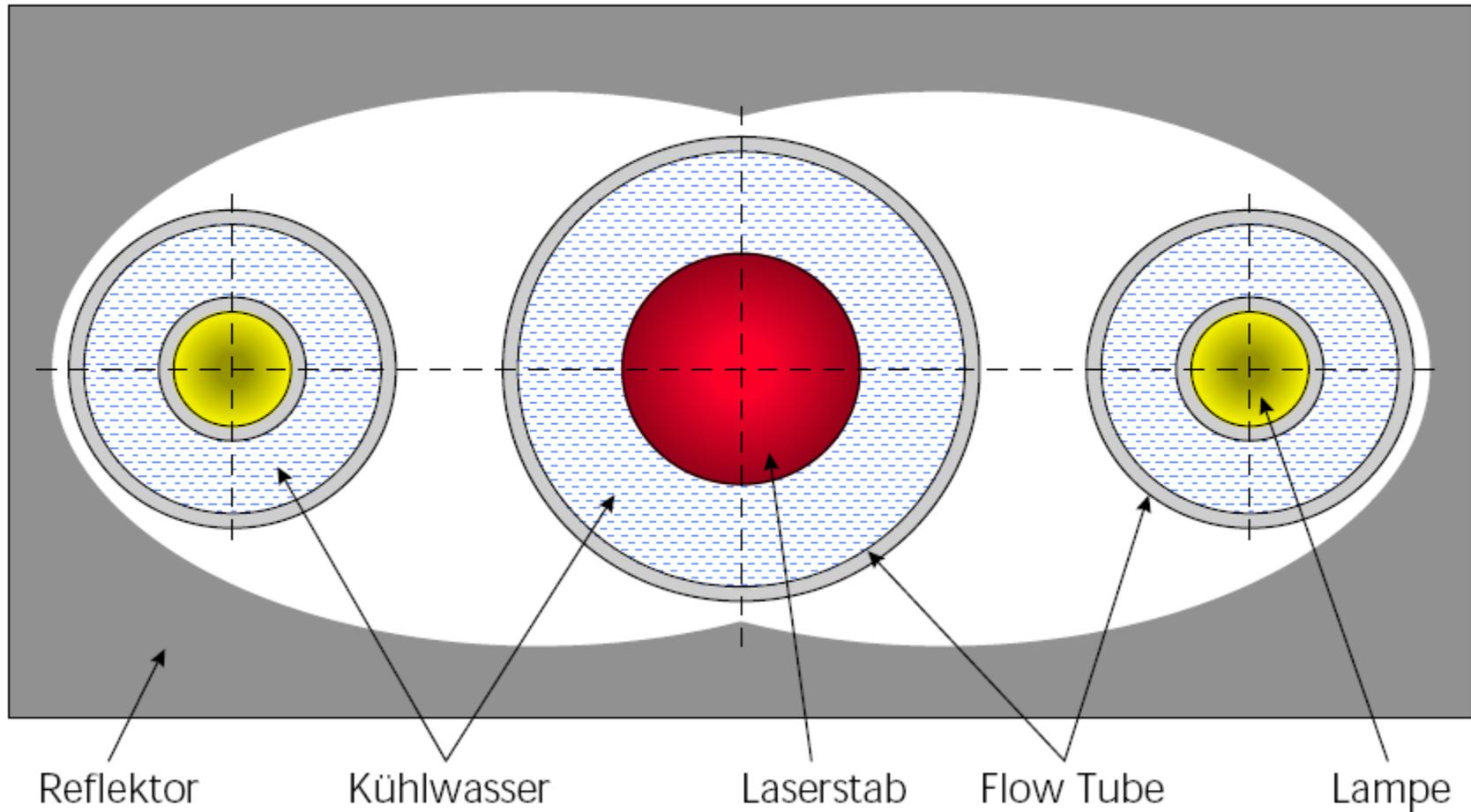
# Lampengepumpte Nd:YAG-Laser

## Festkörperlaser



# Lampengepumpte Nd:YAG-Laser

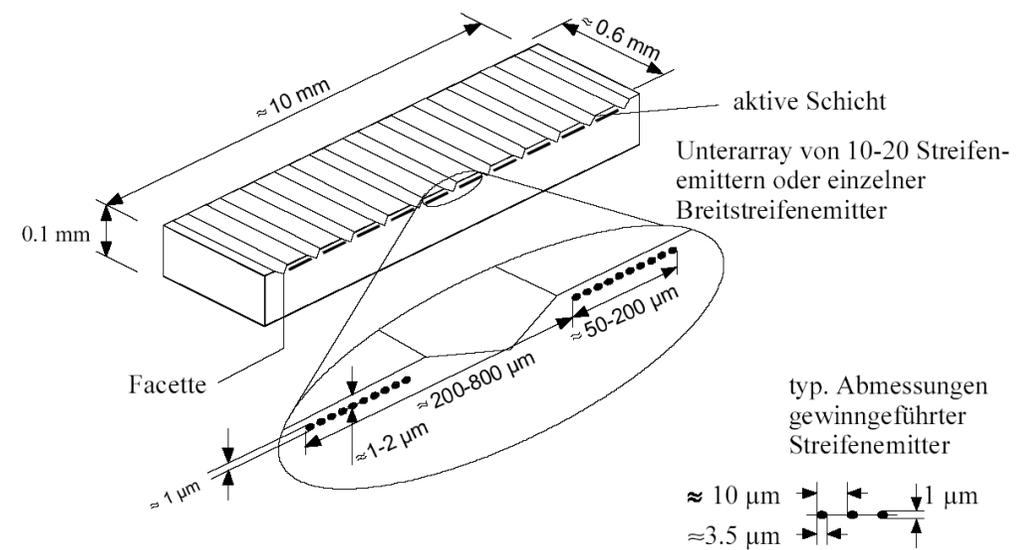
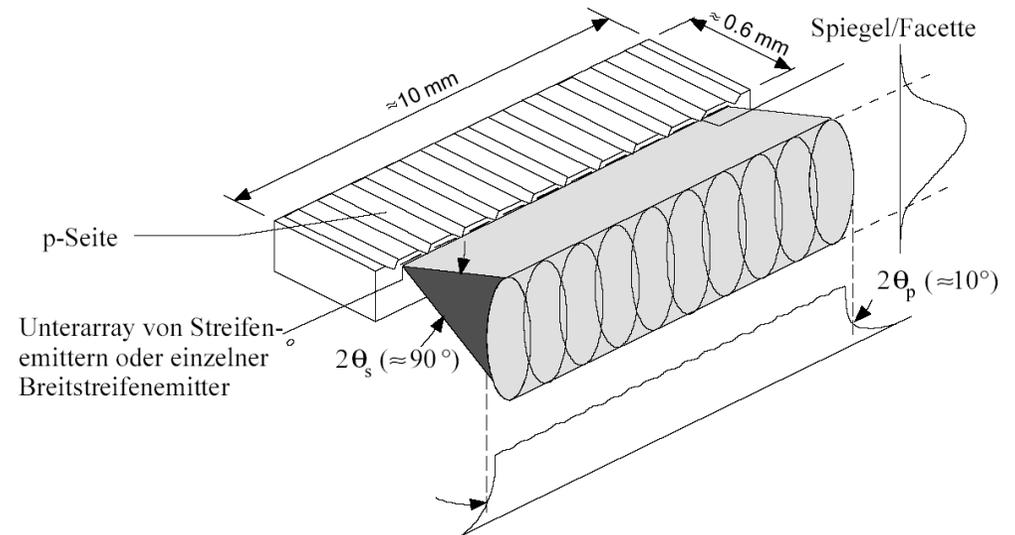
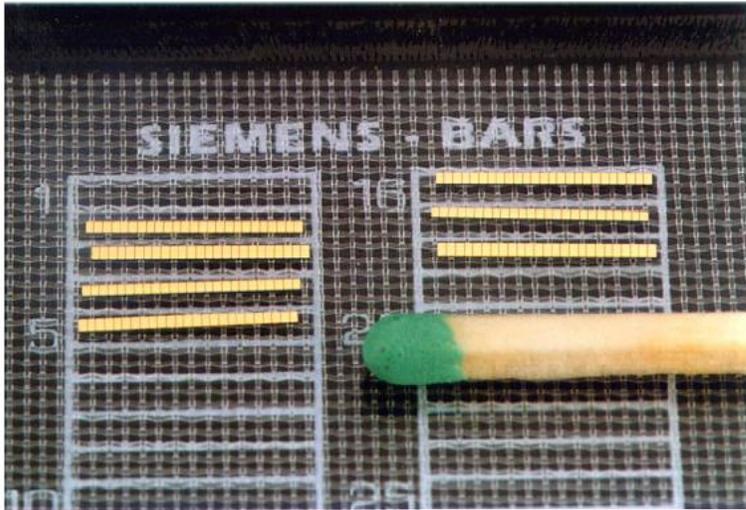
Querschnitt durch eine Pumpkavität in Doppellellipsenform



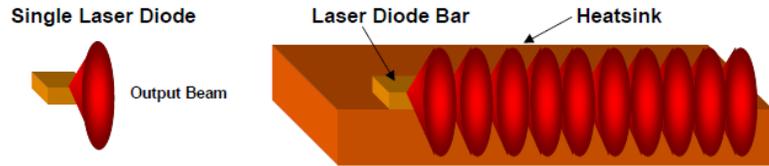
# Diodenlaserbarren

## Materialbearbeitung mit Diodenlasern

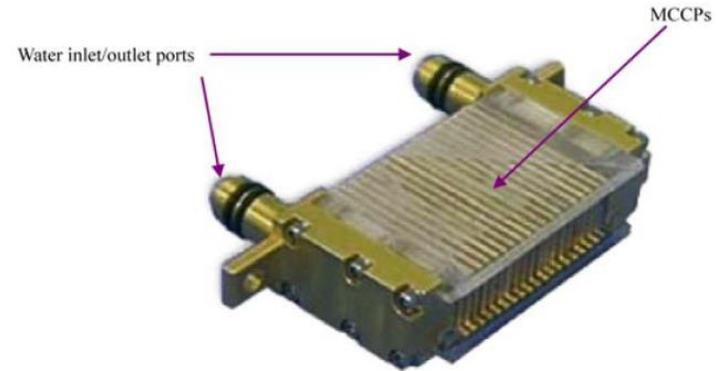
..vom einzelnen Laser zum Barren



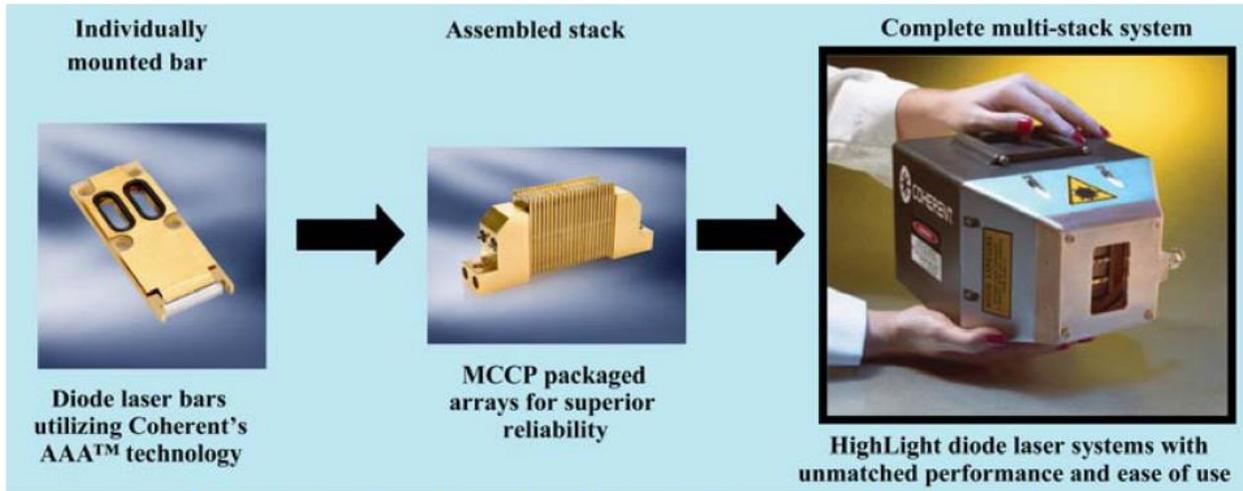
# Von der Diode zum Laser Bar zum Multistack-Laser



*Diode laser bars consist of multiple individual emitters on a single, monolithic substrate.*



*1.2 kW CW MCPP Diode Laser Stack*

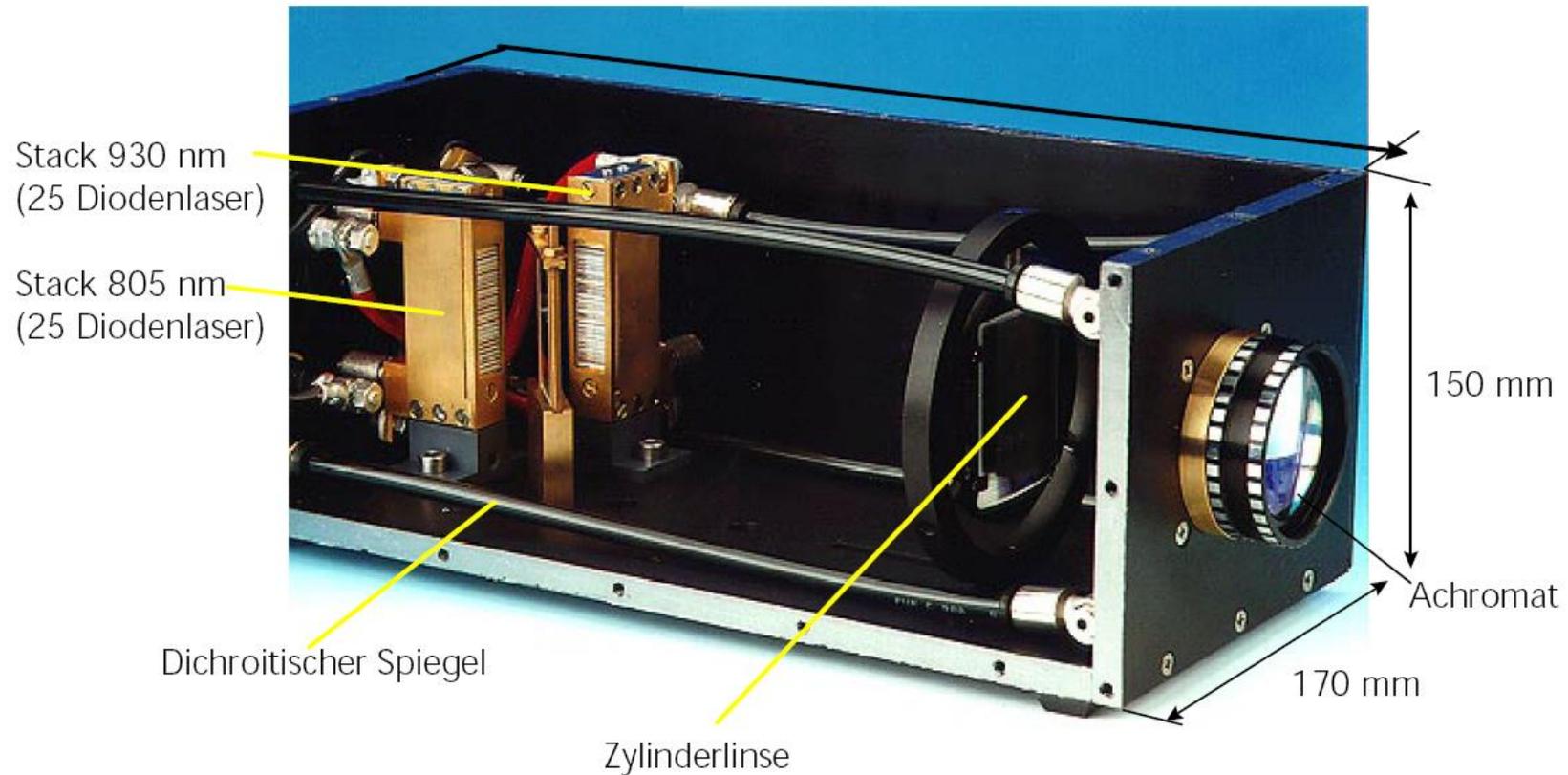


*The Coherent HighLight 1000F*

*Coherent is the only vertically integrated supplier of high power diode lasers, producing everything from the wafer level through to finished systems*

# Direkte Nutzung von Diodenlasern

## 1 kW Hochleistungs-Diodenlaser



...aber Strahlqualität ist ein Problem

# Vergleich verschiedener Laserkategorien

*Summary of materials processing lasers characteristics*

	Laser Type				
	Diode	DPSS	LPSS	Fiber	CO <sub>2</sub>
Wavelength (µm)	0.98	1.06	1.06	1.07	10.6
Power Range	10's of watts to 10 kW	100's of watts to a few kW	100's of watts to few kW	100's of watts to 10's of kW	100's of watts to 10's of kW
Size	<b>Very Small</b>	<b>Large</b>	<b>Large</b>	<b>Medium</b>	<b>Large</b>
Electrical Efficiency	<b>40%</b>	<b>15%</b>	<b>5%</b>	<b>25%</b>	<b>10%</b>
Maintenance Interval	<b>2 years</b>	<b>1 year</b>	<b>3 months</b>	<b>2 years</b>	<b>6 months</b>
Initial Capital Cost	<b>Low</b>	<b>High</b>	<b>Medium</b>	<b>High</b>	<b>Medium</b>
Cost of Ownership*	<b>\$23/hour</b>	<b>\$53/hour</b>	<b>\$51/hour</b>	<b>\$43/hour</b>	<b>\$49/hour</b>

\*includes capital and operating cost

# Laserparameter: Strahlqualität

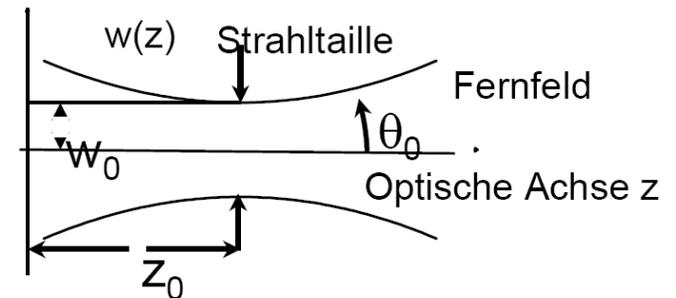
Die Strahlqualität der Laserstrahlung quantifiziert die Güte Ihrer Fokussierbarkeit, d.h. die Größen minimal erreichbarer Fokusbereich bei maximal erreichbaren Schärfentiefen. Es gibt 3 Kennzahlen zur Quantifizierung der Strahlqualität, denen als Maximal erreichbare Qualität der beugungsbegrenzte Strahl mit einer gaußförmigen Intensitätsverteilung zu Grunde liegt:

$$K = \frac{1}{M^2} = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \frac{1}{w_0 \theta_0}$$

**Strahlkennzahl** findet vorwiegend Verwendung im dt-sprachigen Raum zur Charakterisierung von CO<sub>2</sub>-Lasern  
 $K \leq 1$  (TEM00)

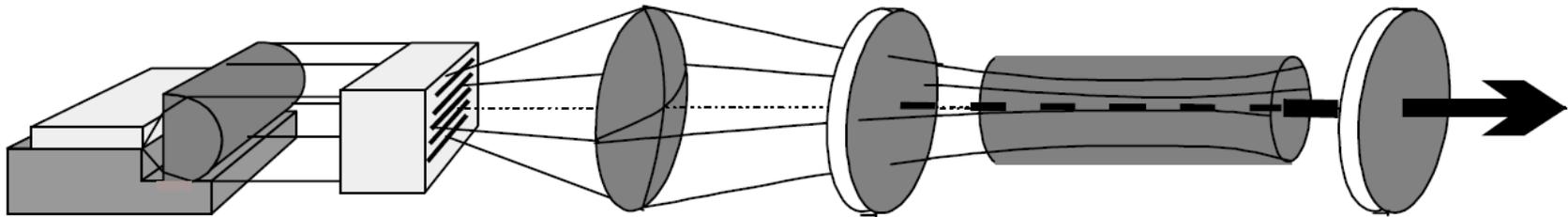
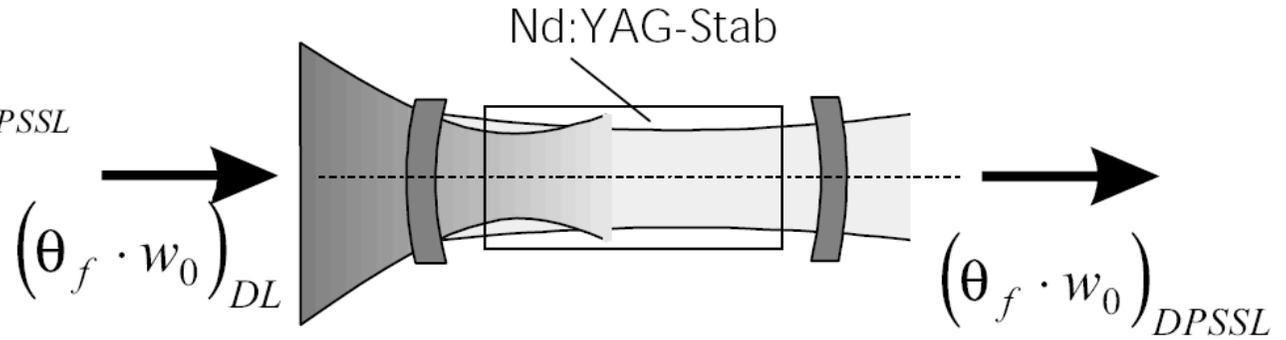
**Modenfaktor** findet vorwiegend Verwendung im englisch-sprachigen Raum zur Charakterisierung von CO<sub>2</sub>-Lasern  
 $M^2 > 1$  (TEM00)

**Strahlparameterprodukt** findet vorwiegend Verwendung zur Charakterisierung von FKL-Lasern.  $SPP \cong 0,1 - 1000$   
 Im englischsprachigen Raum wird häufig der Durchmesser statt des Radius und der volle Divergenzwinkel statt des halben verwendet. Bei dieser Betrachtung ist das SPP um den Faktor 4 höher.



## Diodengepumpter Festkörperlaser (endgepumpt)

$$(\theta_f \cdot w_0)_{DL} \geq 50 \cdot (\theta_f \cdot w_0)_{DPSSL}$$

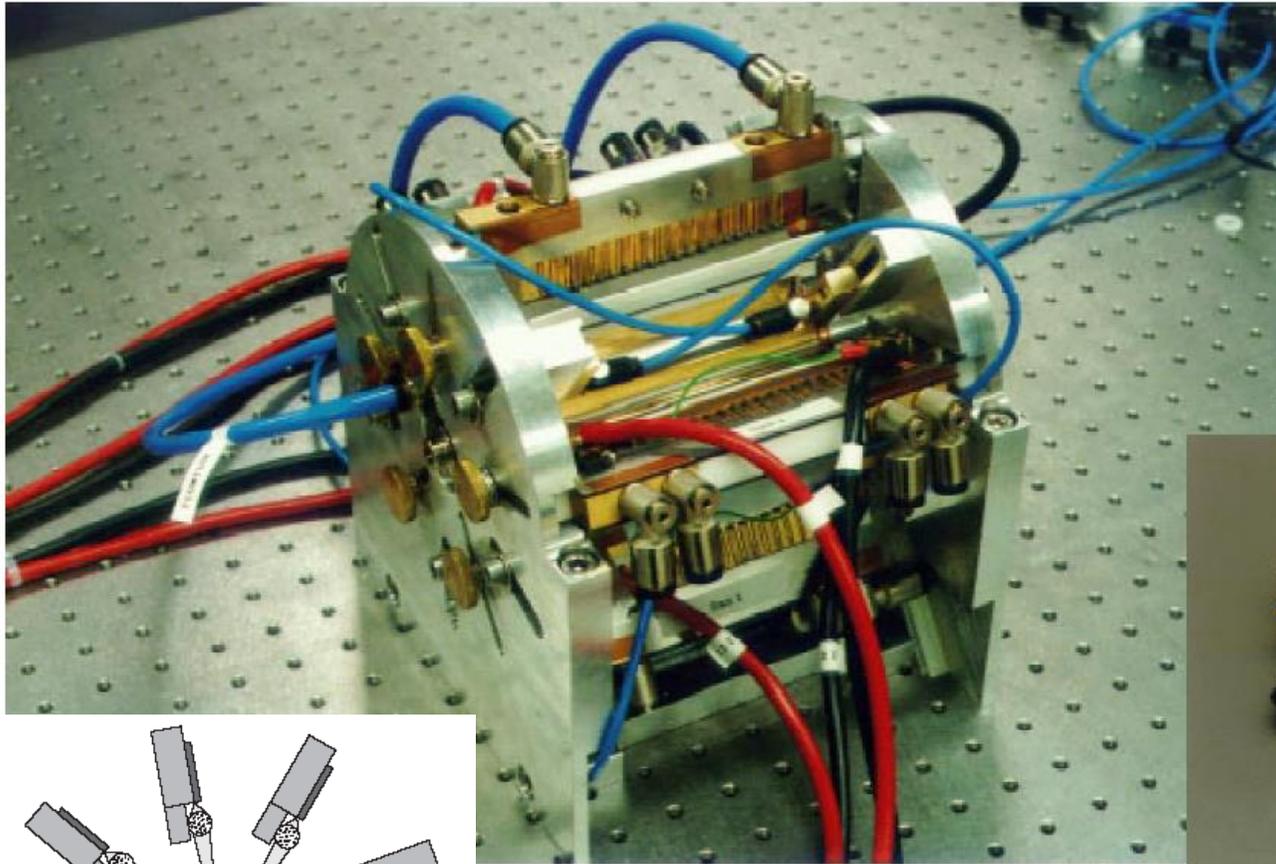


$$P_{\omega, Max} \approx 20W$$

DL: Diode Laser

DPSSL: Diode Pumped Solid State Laser

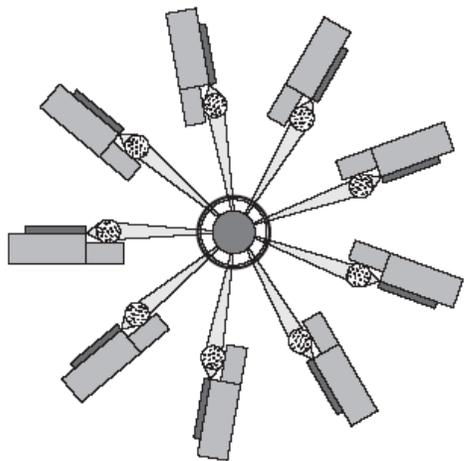
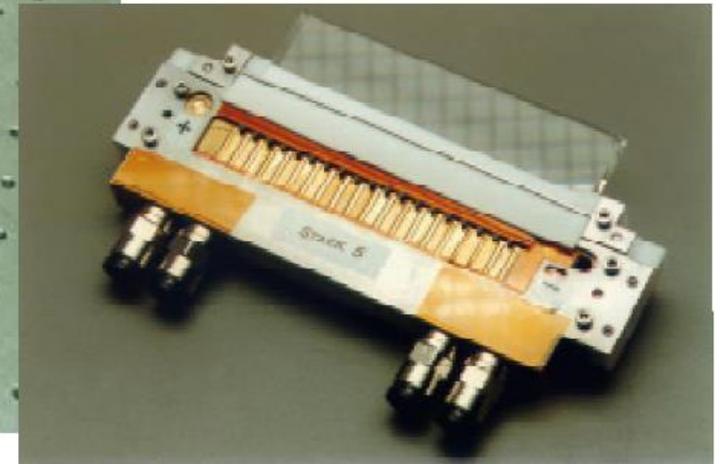
# 1 kW - Radial-Diodengepumpter Nd:YAG-Laser



Laserleistung: 1,1 kW  
Effizienz: 28%  
Strahlqualität: 20 mm mrad

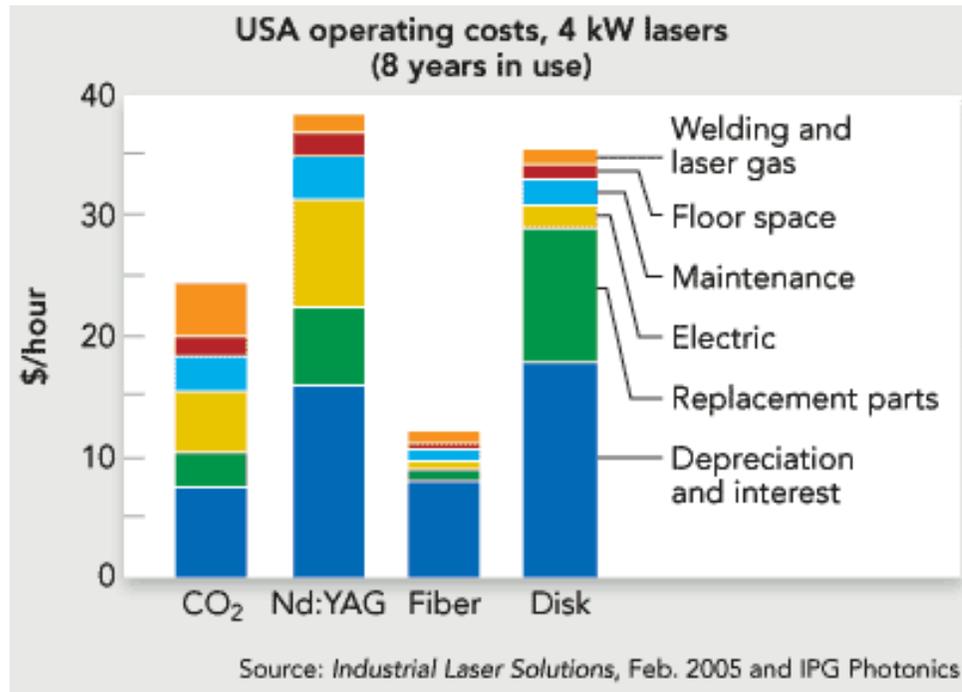
## **Pumpmodul:**

20 Diodenbarren  
Ausgangsleistung: 640W



Pumpgeometrie

# Vergleich verschiedener Technologien

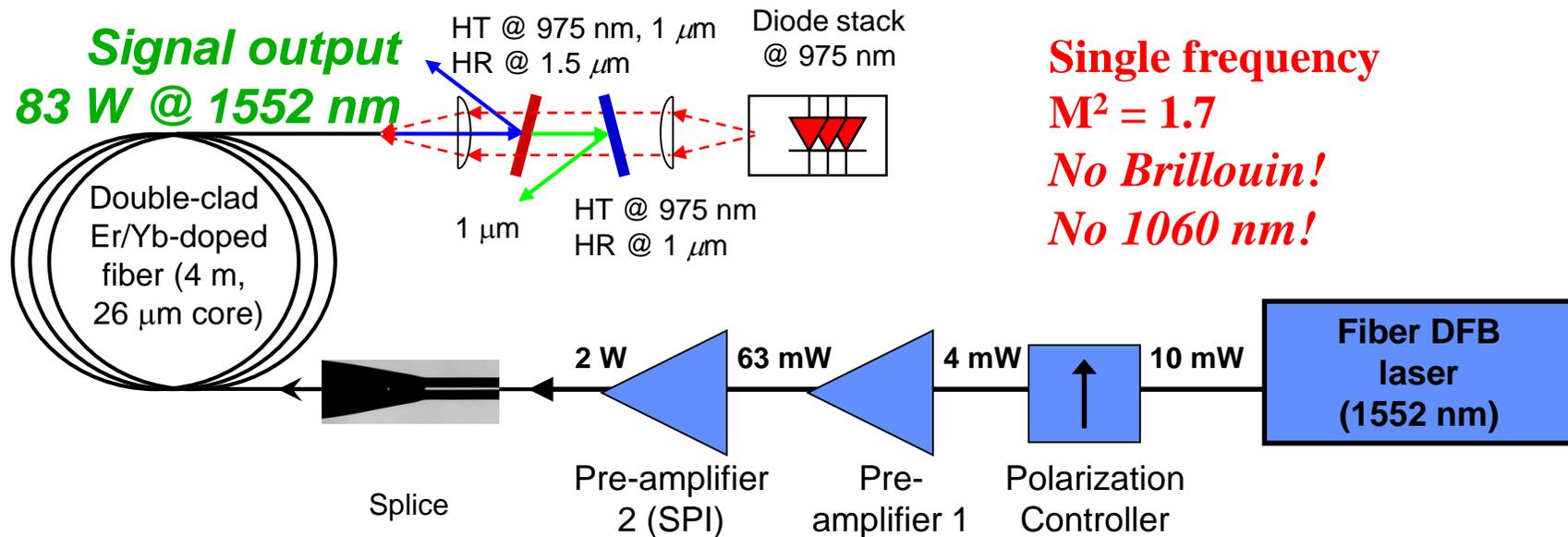
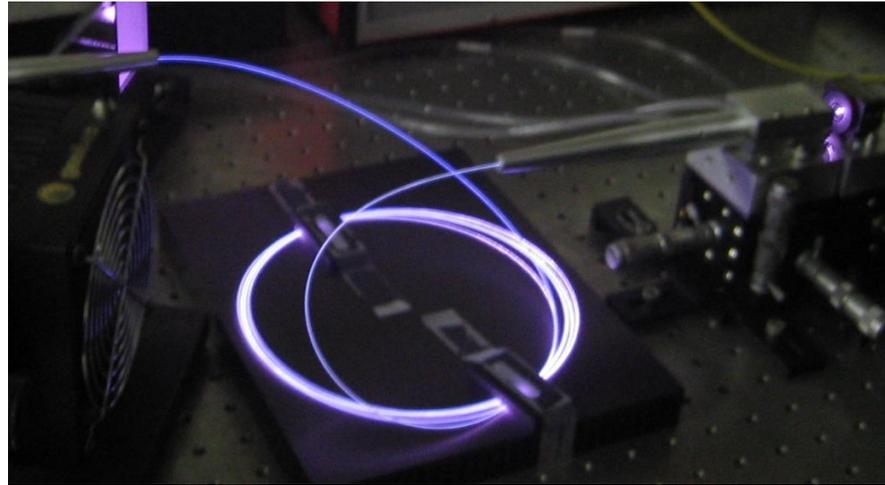


*Faserlaser* stellen eine neue Technologie mit potentiell besseren Eigenschaften dar.

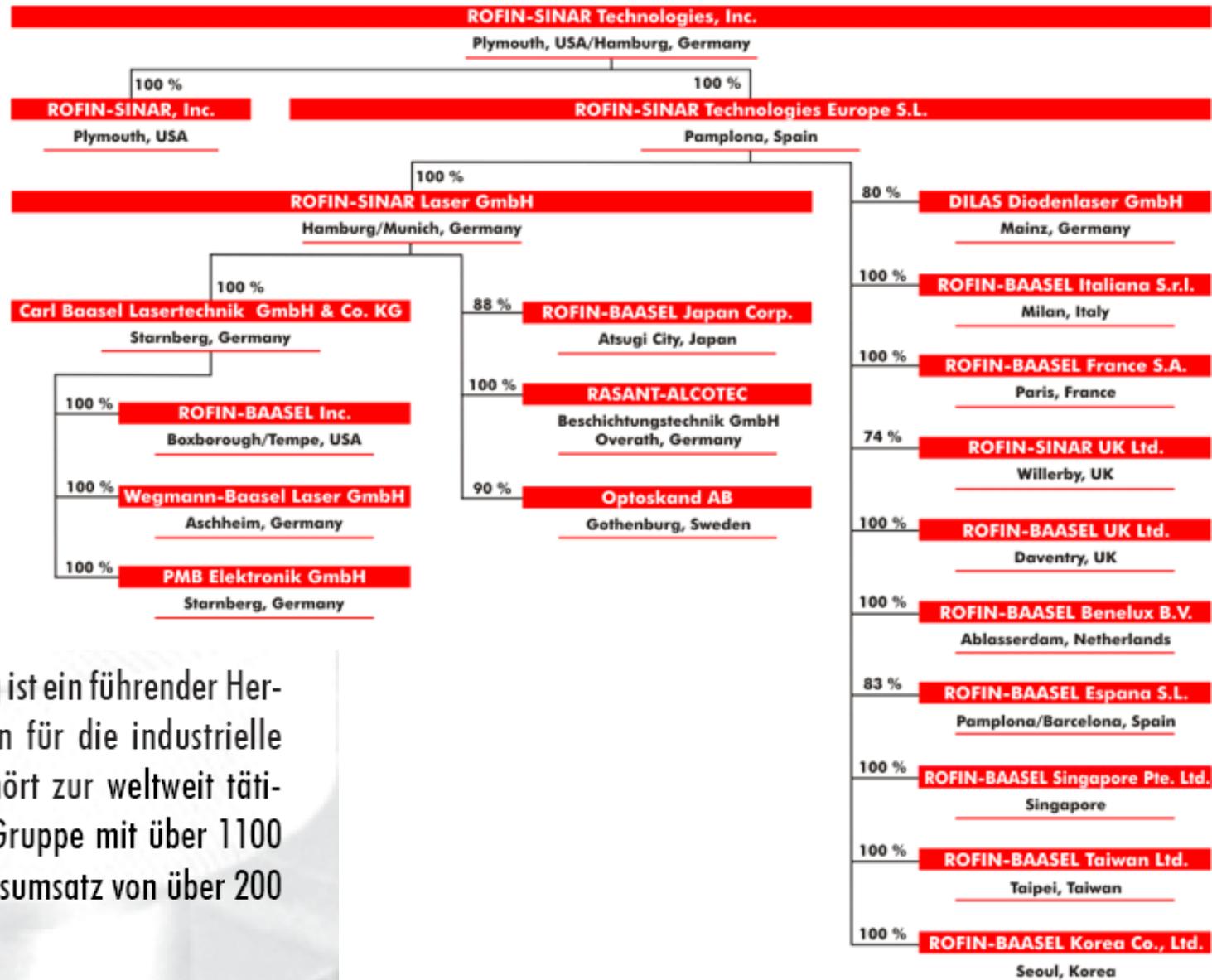
● Best ○ Worst

	Power	Beam quality	Wavelength	Maintenance	Footprint	Ownership costs
Fiber laser	●	●	●	●	●	●
CO <sub>2</sub> (gas)	◐	◐	◐	◐	○	◐
Lamp-pumped Nd:YAG (solid-state)	◐	◐	◐	◐	◐	◐
Diode-pumped Nd:YAG (solid-state)	◐	◐	◐	◐	◐	◐
Disk lasers Yb:YAG (solid-state)	◐	◐	◐	◐	◐	◐

# Faserlaser



# Lasertechnik ist auch ein deutsches Geschäft: z.B. Roфин Sinar



ROFIN-SINAR Laser, Hamburg ist ein führender Hersteller von Laserstrahlquellen für die industrielle Materialbearbeitung und gehört zur weltweit tätigen, börsennotierten ROFIN Gruppe mit über 1100 Mitarbeitern und einem Jahresumsatz von über 200 Millionen US Dollar.

# z.B. Trumpf Lasertechnik



TRUMPF Geschäftsbereich Lasertechnik  
www.trumpf-laser.com – Globale Website

Home

Unternehmen

Zahlen und Fakten

Headquarters Laser

Standorte weltweit

Qualitätsmanagement

Geschichte

Karriere

Presse

CO<sub>2</sub>-Laser

Festkörperlaser

Beschriftungslaser

Lasersysteme

Lösungen

Services

Sitemap

## Headquarters Laser

Übersicht der Hauptstandorte in Deutschland und der Schweiz



CO<sub>2</sub>-Laser

» [Ditzingen](#)

Festkörperlaser

» [Schramberg](#)

Laser Marking

» [Grösch](#)