

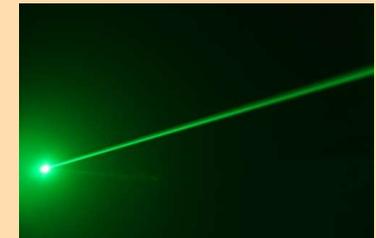
# Lasertechnik VL-5

**Mechatronik 4.tes Semester**

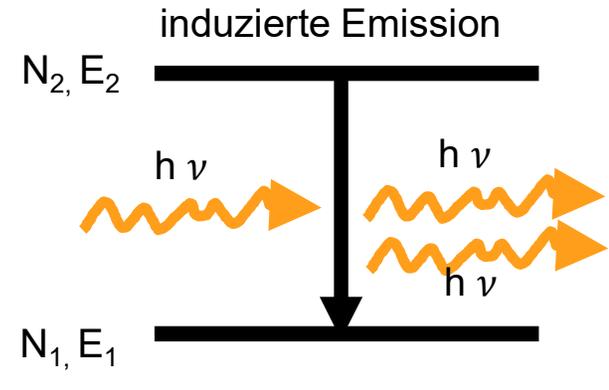
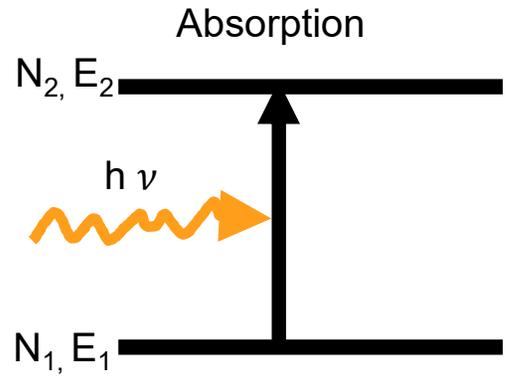
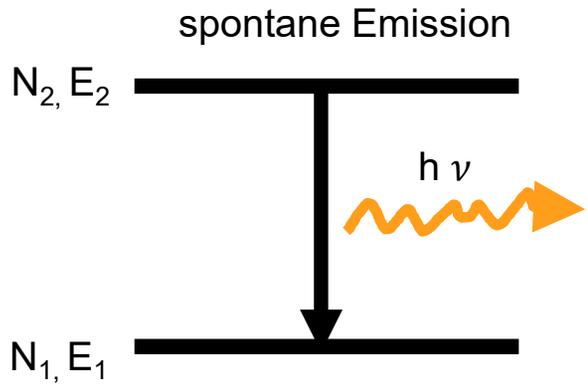
**Vorlesung Sommersemester 2023**

**VL: Prof. Dr. Thomas Hebert ([thebert@fb2.fra-uas.de](mailto:thebert@fb2.fra-uas.de))**

**Labor: Hans-Peter Tögel, Lutz Zimmermann, Prof. Kurt Jansen**



# Die Basisprozesse (spontane Emission, Absorption, induzierte Emission) und ihre Ratengleichungen



Ratengleichung  $\left. \frac{dN_2}{dt} \right|_{sp} = -\frac{N_2}{\tau}$

$\left. \frac{dN_1}{dt} \right|_a = -\sigma_{12} N_1 \phi$

$\left. \frac{dN_2}{dt} \right|_i = -\sigma_{21} N_2 \phi$

Integriert  $N_2(t) = N_0 * e^{-t/\tau}$

$\phi(x) = \phi_0 * e^{-\sigma_{12} N_1 x}$

Wirkungsquerschnitt Einsteinkoeffizient  $B_{12}$   $\sigma_{12} = B_{12} h f_{12} / c$

Zerfallsrate (Einsteinkoeffizient)  $A_{21} = 1/\tau$   
Lebensdauer

Absorptionsgesetz  $I(x) = I_0 \exp(-\alpha x)$

Absorptionskoeffizient  $\alpha = \sigma_{12} N_1$

$I(x) = I_0 \exp(g x)$   
g = inkrementelle Verstärkung  
G = exp(g x) = Verstärkung

$B_{12} = B_{21}$

$A_{21} = \tau^{-1} = \frac{4 * h * f^3}{c^3} B_{21}$

# Einfache Bilanzgleichung für alle drei Prozesse (Absorption, stimulierte Emission, spontane Emission)

$$\frac{dN_1}{dt} = -B_{12} N_1 \Phi + B_{21} N_2 \Phi + A_{21} N_2$$

Mit  $B_{12} = B_{21}$

Absor

Stimu

Spont

$$\frac{dN_1}{dt} = B_{12} \Phi (N_2 - N_1) + A_{21} N_2$$

$$\frac{dN_1}{dt} = B_{12} \Phi (N_2 - N_1) + A_{21} N_2$$

Analog Herleitung zum Absorptionsgesetz + hier spontane Emission

vernachlässigt  $\rightarrow \Phi(x) = \Phi_0 * e^{B_{12}(N_2 - N_1)*x}$

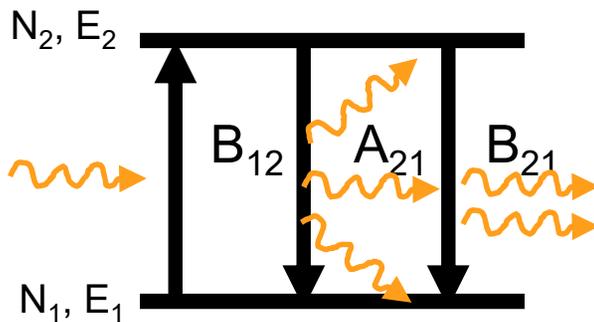
$N_2 - N_1 < 0$  Abschwächung der Photonenanzahl

$N_2 - N_1 > 0$  **Besetzungsinversion, Verstärkung**

**Verstärkungsfaktor  $G = e^{gx}$**

**differentielle Verstärkung  $g = B_{12}(N_2 - N_1)$**

Lasertechnik, Prof. Dr. T. Hebert, SoSe 2023



## Besetzungsinversion

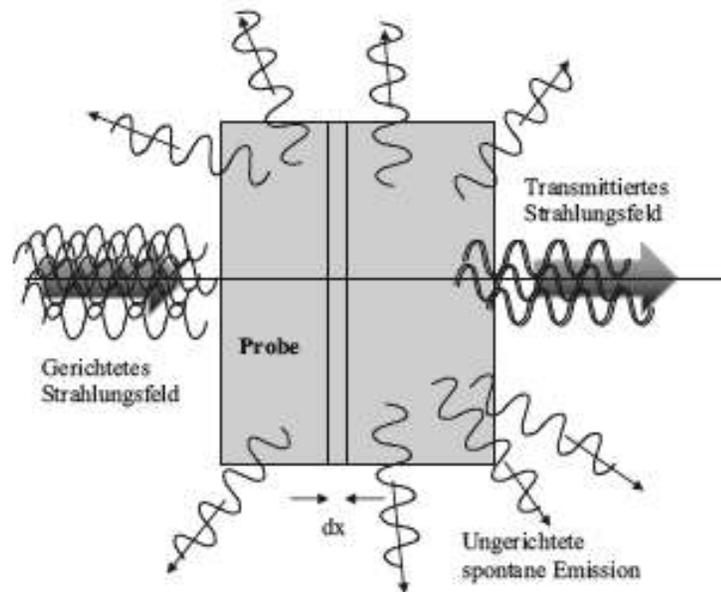
ist eine Kern-Voraussetzung für Laseraktivität.

Offene FRAGE: wie kann man die Besetzungsinversion erreichen?

# Unterschied zw. spontaner und induzierter Emission

## Spontane Emission

- Entsteht durch „statistischen“ Prozess
- Ungerichtet
- Keine feste Phasenbeziehung zwischen den Photonen



## induzierte Emission

- Ist getriggert durch „induzierendes“ Photon
- **Richtung & Phase entsprechend der des induzierenden Photons**  
→ **kohärentes Licht**

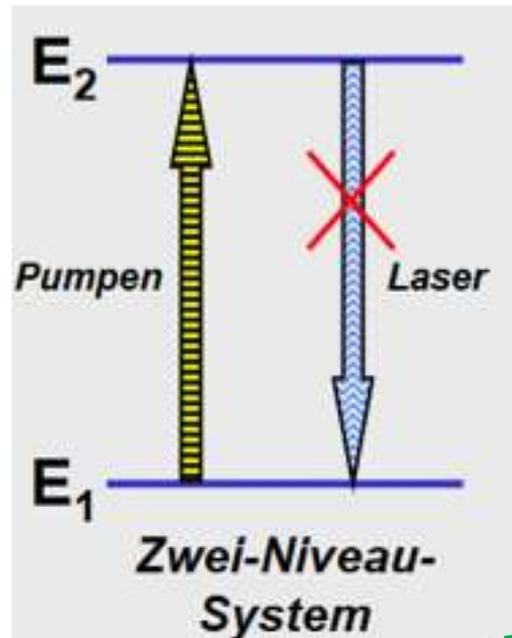
Wenn wir über Absorption oder induzierte Emission sprechen, geht es i.d.R. um eine bestimmte definierte Richtung der Strahlung.

Spontane Emission ist ungerichtet und kann im Vergleich zu einem gerichteten Strahl vernachlässigt werden.

# Wie kann Besetzungsinversion erreicht werden?

Für Laser nötig:

- **Verstärkung durch stimulierte Emission**
- **Besetzungsinversion**  
( $N_2 > N_1$ )  
oder noch besser  
( $N_2 \gg N_1$ )



So nicht möglich

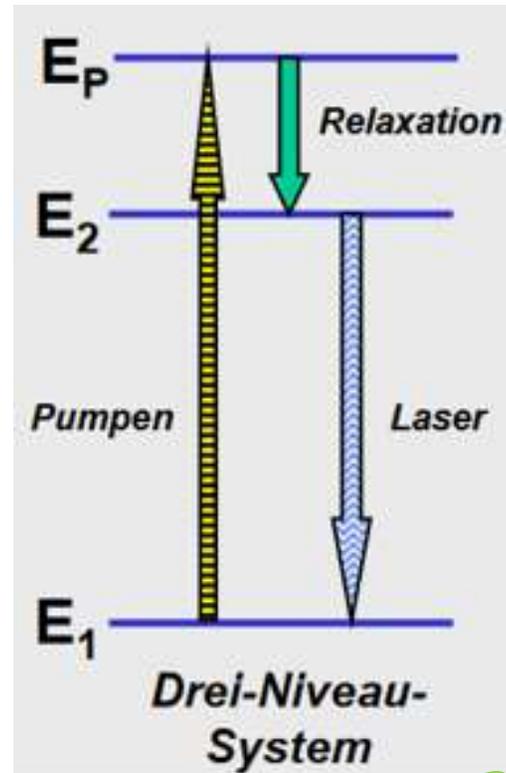
**Im reinen 2-Niveau-System kein Laser möglich**

- Keine Besetzungsinversion erreichbar, weil
- $B_{12} = B_{21}$ , d.h. Absorption und induzierte Emission gleichen sich gegenseitig aus
- Spontane Emission als zusätzlicher „Verlustfaktor“

## Wie kann Besetzungsinversion erreicht werden?

Für Laser nötig:

- **Verstärkung durch stimulierte Emission**
- **Besetzungsinversion**  
( $N_2 > N_1$ )  
oder noch besser  
( $N_2 \gg N_1$ )



Im 3-Niveau-System ist ein Laser möglich weil

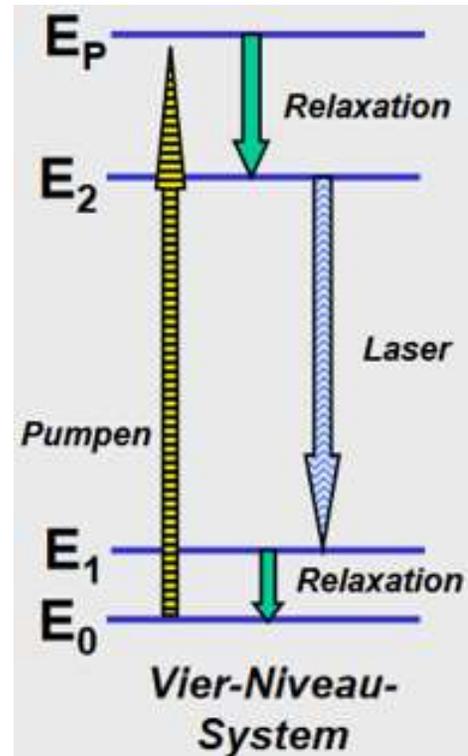
- Anregung erfolgt jetzt über  $E_1 \rightarrow E_p$  (Pumpen)  $\rightarrow$  Entkoppelt vom Übergang  $E_2 \leftrightarrow E_1$
- Durch schnelle Relaxation  $E_p \rightarrow E_2$  wird  $N_2$  stark besetzt
- (spontane Emission  $E_2-E_1$  und Absorption  $E_1-E_2$  sind trotzdem Verlustfaktoren, fallen aber nicht so stark ins Gewicht)
- Hilfreich: Oberes Laserniveau „metastabil“, d.h. Verluste durch spontane Emission nicht zu stark
- Besetzungsinversion  $N_2 > N_1$  ist erreichbar

Schon besser

## Wie kann Besetzungsinversion erreicht werden?

Laser

- **Ziel: Verstärkung durch stimulierte Emission**
- Voraussetzung: stimulierte Emission soll überwiegen
- **Besetzungsinversion** ( $N_2 > N_1$ )  
oder sogar ( $N_2 \gg N_1$ )



Im 4-Niveau-System ist Laser noch besser = mit weniger Energieaufwand möglich, weil

- $E_1$  wird durch die Relaxation  $E_1 \rightarrow E_0$  entleert
- Dadurch  $N_2$  immer  $> N_1$  und die Absorption  $E_1-E_2$  als Verlustfaktor ausgeschaltet
- Hilfreich: Oberes Laserniveau  $E_2$  „meta-stabil“, d.h. Entleerung von  $E_2$  durch spontane Emission gering
- Besetzungsinversion  $N_2 > N_1$  ist noch leichter erreichbar

Noch besser

# Kriterien für Laser-Materialien / Zusammengefasst

## Laser

- **Ziel: Verstärkung durch stimulierte Emission**
- **Besetzungsinversion** ( $N_2 > N_1$ ) oder sogar ( $N_2 \gg N_1$ )
- **Oberes Laser-Niveau „meta-stabil“**, dann Verluste durch spontane Emission gering

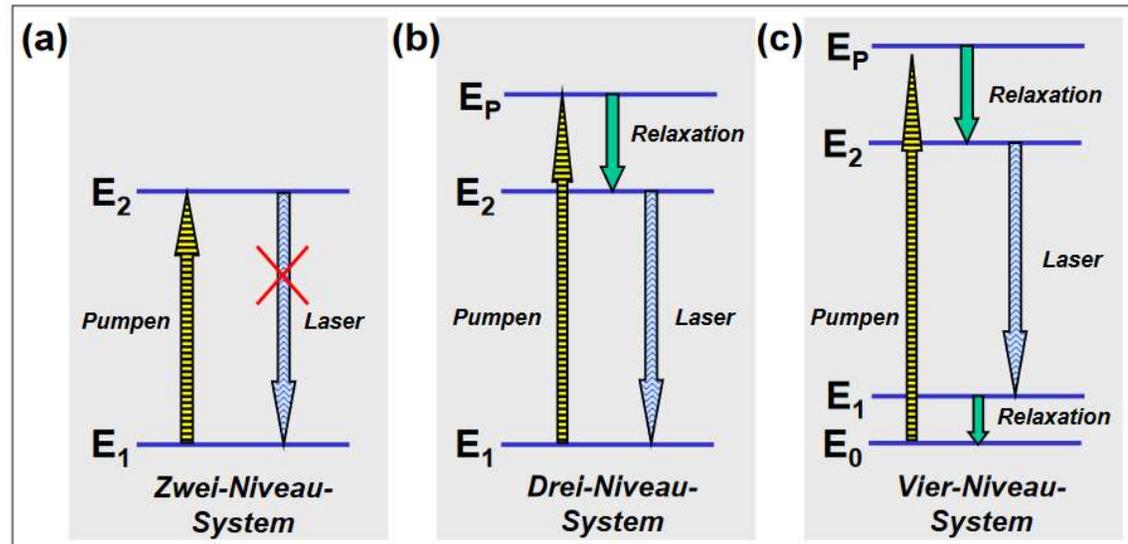
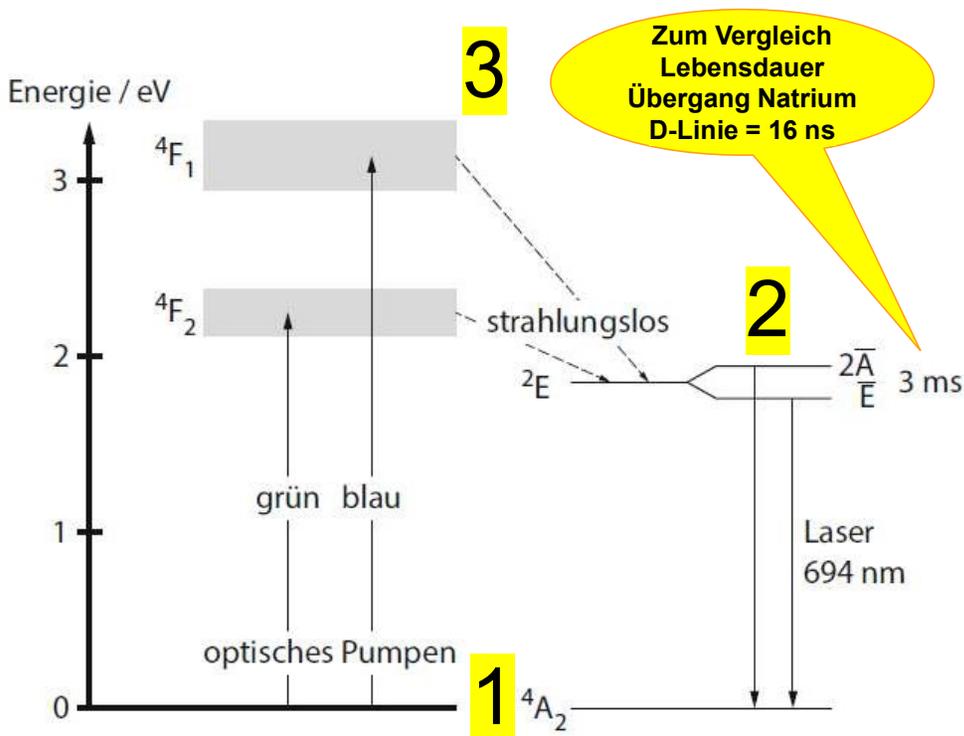


Abbildung 11.3: Verschiedene Energieniveauschemata zur Erklärung des Pumpvorganges in einem Laser: (a) Zwei-Niveau-System, bei dem eine Lasertätigkeit nicht möglich ist, (b) Drei-Niveau-System und (c) Vier-Niveau-System.

**Laser benötigen ein Material das ein 3- oder 4-Niveau System ermöglicht.**

Dort ist dann der Pump Übergang vom Laser Übergang verschieden und zusätzlich wird (beim 4-Niv-System) das untere Laserniveau  $E_1$  durch Relaxation entleert und das 4-Niveau-System ist effizienter als das 3-Niveau-System

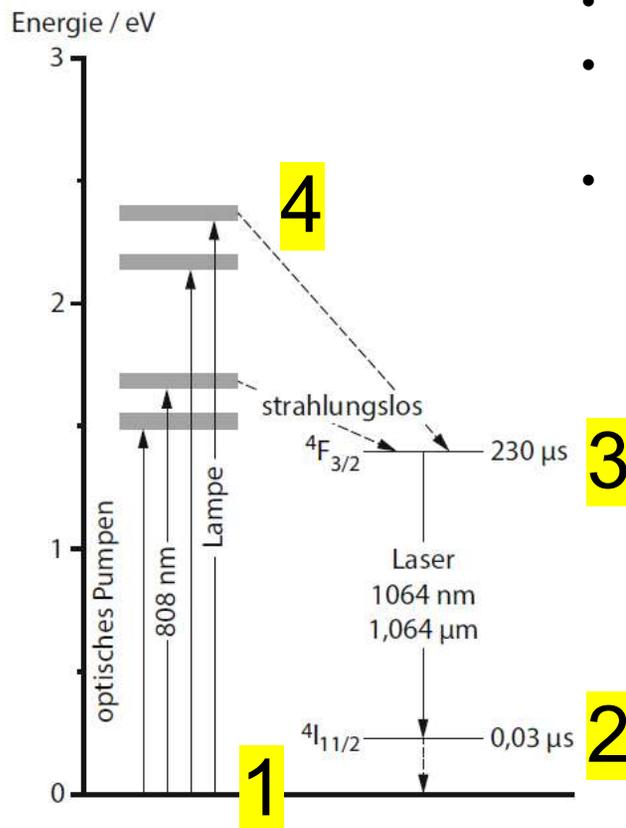
# Beispiel 1: Energieschema Rubinlaser



Typisches Merkmal 3-Niveau-Laser  
Unteres Laserniveau = Grundzustand

- Energieschema von  $\text{Cr}^{3+}$  im  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Gitter
- **Energiebänder** ergeben sich durch Einfluß von Kristallfeld und Gitterschwingungen
- **Grundzustand  $4A_2$**
- **3-Niveau-Laser (unteres Laserniveau = Grundzustand)** (>50% der  $\text{Cr}^{3+}$  müssen im oberen Laserniveau angeregt sein, damit Laser startet)
  - **Pumpen:** Optische Absorption in die  $4F_1$  und  $4F_2$  Bänder
  - **Relaxation:** (strahlungslos) in  $2E$  mit den beiden Unterniveaus  $2\bar{A}$  und  $\underline{E}$
  - **Laserübergänge:**  $2E / \underline{E} \rightarrow 4A_2$  (694,3nm) und  $2E / 2\bar{A} \rightarrow 4A_2$  (692,8 nm)

## Beispiel 2: Energieschema Nd:YAG Laser



- Energieschema von **Nd<sup>3+</sup>** im Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> Gitter
- **Energiebänder** ergeben sich durch Einfluß von Kristallfeld und Gitterschwingungen
- **4-Niveau-Laser:**
  - Pumpen: Optische Absorption in verschiedene Bänder zw. 1.5 und 2.5 eV

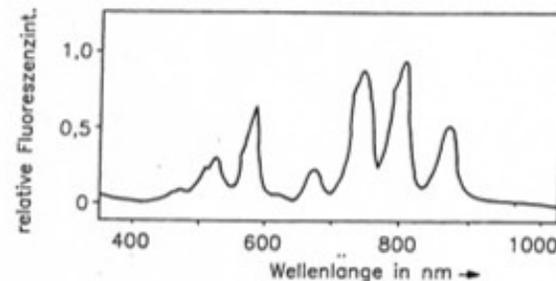


Bild 8.5.  
Intensität der Fluoreszenz von Nd:YAG bei 1,06  $\mu$ m als Funktion der Wellenlänge des Pumplichts. 808 und 940 nm sind geeignete Wellenlängen zum Pumpen mit Laserdioden

- Relaxation: (strahlungslos) in das metastabile nach  $4F_{3/2}$  Niveau mit einer Lebensdauer von  $230 \cdot 10^{-6}$ s
- Laserübergang:  $4F_{3/2} \rightarrow 4I_{11/2}$  (1064nm)

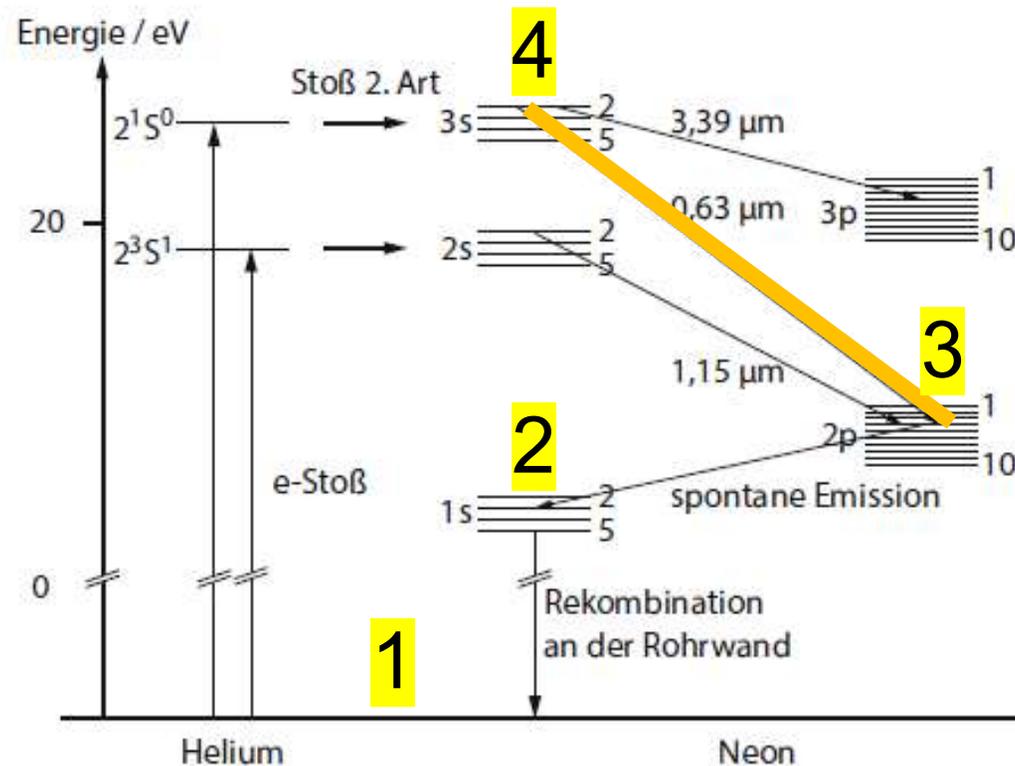
Typisches Merkmal 4-Niveau-Laser

Unteres Laserniveau = ist nicht Grundzustand

## Beispiel 3: He-Ne-Laser, Laserübergang im Neon Atom für 633nm $E_3 \rightarrow E_2$

**Abb. 4.1** Termschema des He-Ne-Lasers. Beim Neon sind Termbezeichnungen nach Paschen angenommen, z. B.  $3s_2, 3s_3, 3s_4, 3s_5$  und  $2p_1, 2p_2, 2p_3, 2p_4$  bis  $2p_{10}$ . In einer Gasentladung werden durch Elektronenstöße metastabile He-Atome angeregt. Diese übertragen ihre Energie durch „Stöße 2. Art“ auf Ne-Atome, die Licht im Sichtbaren und Infrarot emittieren

Mögliche Laserübergänge im Neon  
633 nm, 1150 nm, 3390 nm



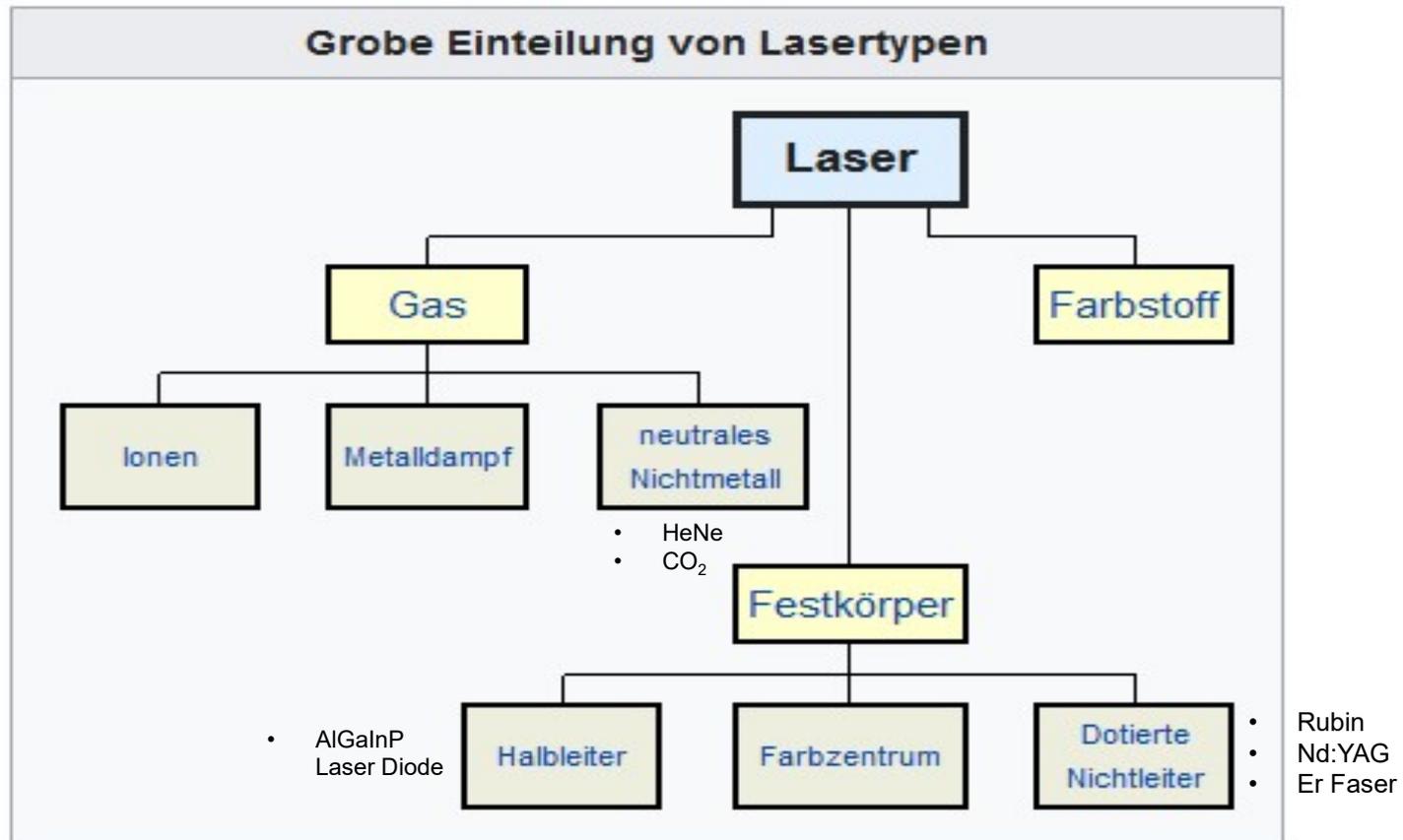
**Stand heute sind ca. 10.000 Laserübergänge bekannt im Wellenlängenbereich  
10nm – 30  $\mu$ m**

Auf den folgenden Folien sind exemplarisch einige Lasertypen aufgeführt. Es soll hier nicht auf die Details je Laser eingegangen werden, vielmehr sollen die Gemeinsamkeiten gezeigt werden.

- Es gibt immer einen Pumpprozess
- Man findet immer ein 3- oder 4-Niveau-Schema
- Es gibt in aller Regel einen Resonator
- Es werden nicht nur diskrete Laserübergänge (atomare oder molekulare Spektrallinien) sondern auch breitere Laser Spektralbereiche (z.B. von Farbstoffmolekülen, Festkörpern) ausgenutzt
- In diesen Fällen werden im Resonator optische Elemente zur Wellenlängen Selektion eingesetzt

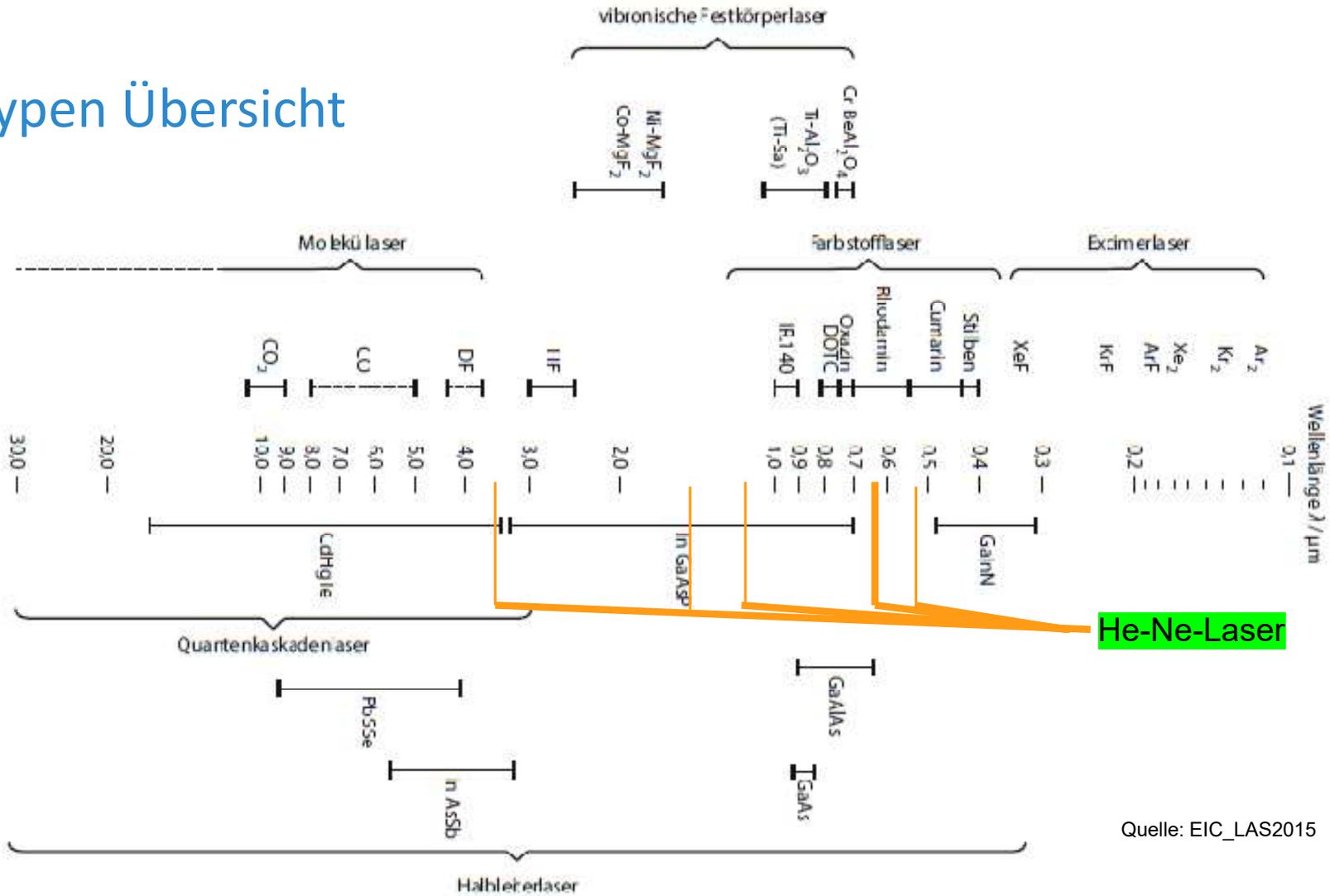
Es ist hier nur eine kleine Auswahl von Lasertypen gezeigt.

# Grobe Einteilung von Lasertypen



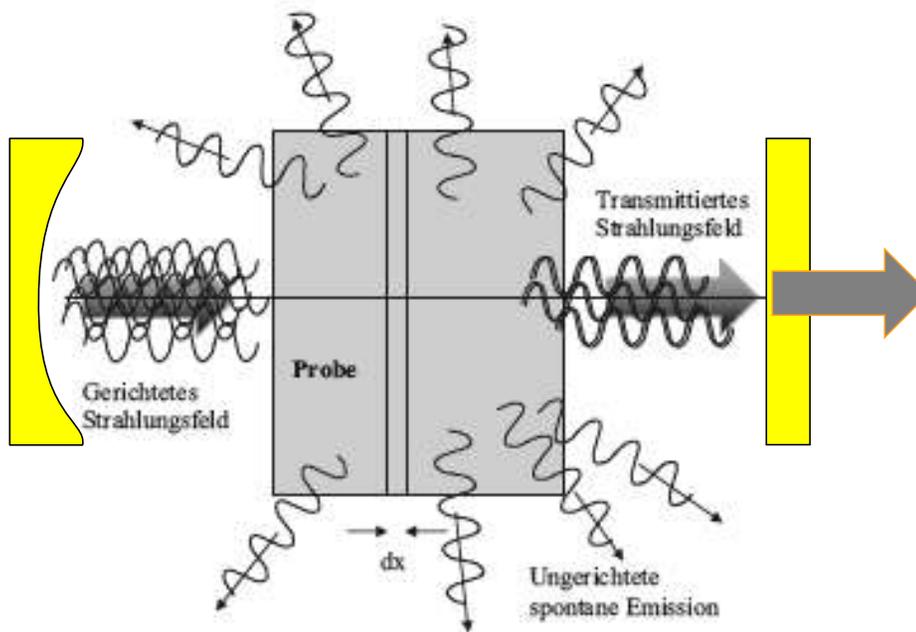
<https://de.wikipedia.org/wiki/Laser>

# Lasertypen Übersicht



Quelle: EIC\_LAS2015

# Das aktive Medium mit Besetzungsinversion allein macht noch keinen Laser – Weiteres Kriterium für Lasertätigkeit: Wir brauchen noch **den Resonator**



Resonator = zwei Spiegel

- Sp<sub>1</sub>: hoch reflektierend
- Sp<sub>2</sub>: teildurchlässig (zur Auskopplung)
- Soll eine bestimmte Richtung der induzierten Emission bevorzugen
- Verstärkung erhöhen: mehrmaliges Durchlaufen der Strahlung durch das aktive Medium

## Einfache Bilanzgleichungen für 4-Niveau Laser / Stationärer Fall

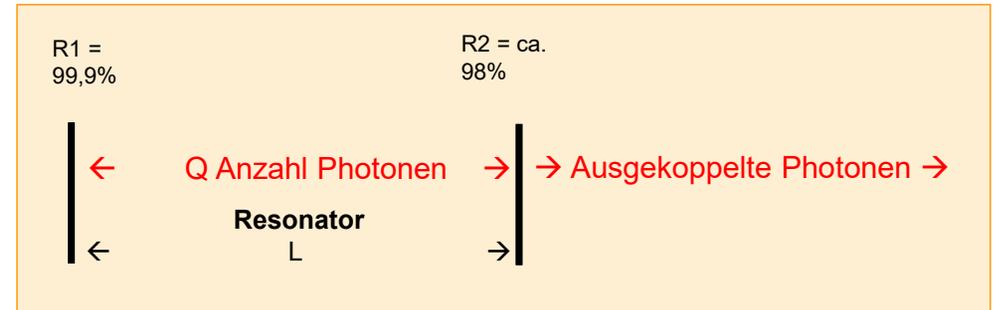
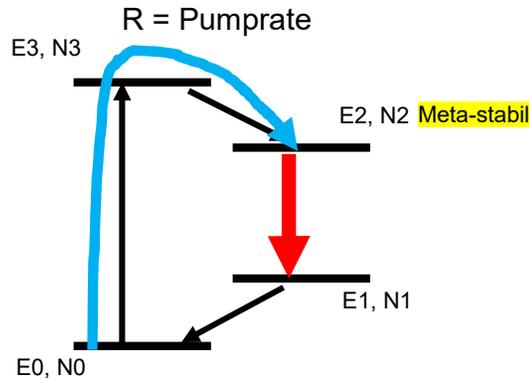
Wir möchten jetzt einfache Bilanzgleichungen für einen 4-Niveau Laser aufstellen, unter Berücksichtigung von

- a) der Energiezufuhr (Pumpen) und
- b) des Resonators

# Einfache Bilanzgleichungen für Laserniveaus und Photonen Anzahl - 1/2

## Annahmen:

- Die Übergänge  $E_3 \rightarrow E_2$  und  $E_1 \rightarrow E_0$  sind so schnell, dass  $N_3 = N_2$  und  $N_1 = N_0$  und daher  $N_3$ ,  $N_1$  und  $N_0$  nicht explizit in der Gleichung auftauchen



$N_2$ : Anzahl Elektronen im Niveau 2

$Q$ : Anzahl Laserphotonen im Resonator

$$\frac{dN_2}{dt} = R - B_{21} N_2 Q - A_{21} N_2$$

$$\frac{dQ}{dt} = B_{21} N_2 Q - \frac{Q}{\tau_R}$$

Pump-prozess

Stimulierte Emission

Spontane Emission

Stimulierte Emission

Resonator Auskopplung und sonstige Verluste

$R$  = Pumprate  
 $B_{21}$  = Einsteinkoeffizient stimulierte Emission  
 $Q$  = Photonenanzahl  
 $\tau_R$  = Verweildauer Photonen im Resonator  

$$= \frac{2L}{c (1 + \sqrt{R_1 R_2})(1 - \sqrt{R_1 R_2})}$$

Siehe auch:

Skript Kurt Jansen (Moodle) oder „Laser: Theorie, Typen und Anwendungen, M.W. Sigrist, Springer 8.Auflage 2018, S. 44 (Online in Uni-Bibliothek)

# Einfache Bilanzgleichungen für Laserniveaus und Photonenanzahl - 2/2

$$(1) \quad \frac{dN_2}{dt} = R - B_{21} N_2 Q - A_{21} N_2$$

$$(2) \quad \frac{dQ}{dt} = B_{21} N_2 Q - \frac{Q}{\tau_R}$$

Das sind gekoppelte Differentialgleichungen für  $N_2$  und  $Q$

Einfach zu lösen für den „stationären Fall“:

$$\frac{dN_2}{dt} = 0 \quad \text{und} \quad \frac{dQ}{dt} = 0$$

$$\text{Glg. (2)} \rightarrow 0 = Q \left( B_{21} N_2 - \frac{1}{\tau_R} \right)$$

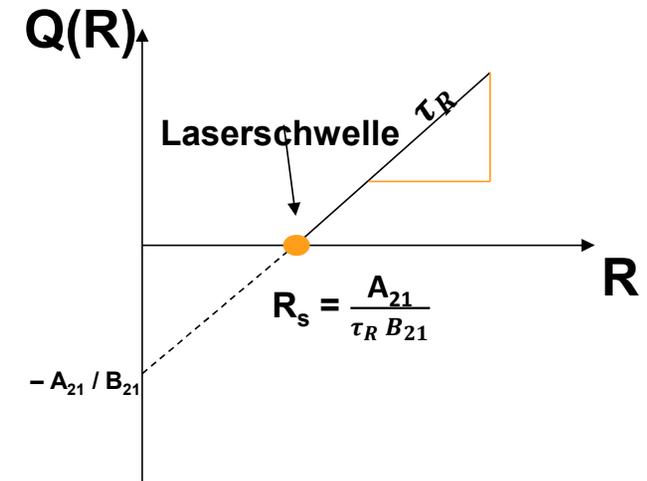
Lösung a)  $Q = 0 \rightarrow$  kein Laserbetrieb

$$\text{Lösung b) } 0 = \left( B_{21} N_2 - \frac{1}{\tau_R} \right) \rightarrow N_2 = \frac{1}{B_{21} \tau_R}$$

$$\text{Einsetzen in Glg. (1)} \rightarrow 0 = R - B_{21} \frac{1}{B_{21} \tau_R} Q - A_{21} \frac{1}{B_{21} \tau_R}$$

$$Q(R) = R \tau_R - \frac{A_{21}}{B_{21}} \quad (\text{aus (1)}) \rightarrow \text{Gradengleichung } y(x) = m x + b$$

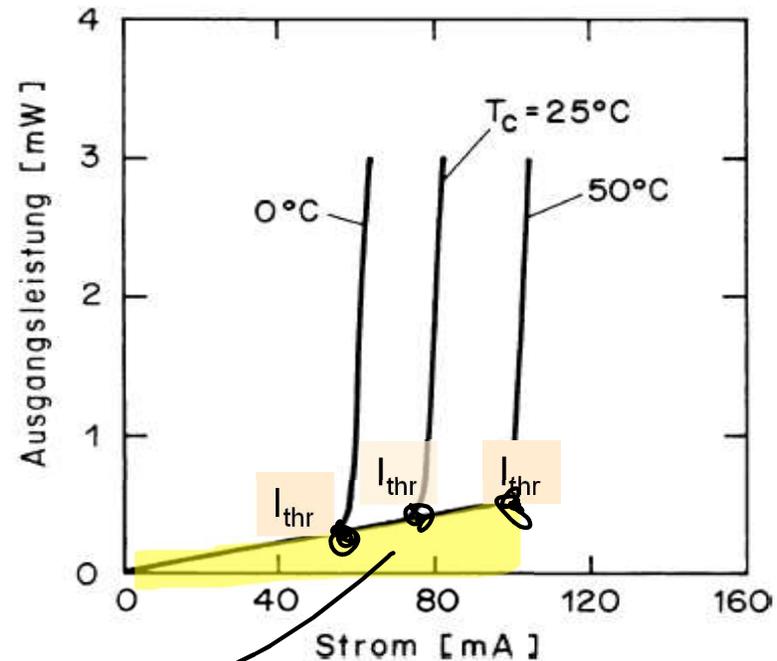
$$\text{Schwellbedingung: } Q(R_s) = 0 = R_s \tau_R - \frac{A_{21}}{B_{21}} \rightarrow R_s = \frac{A_{21}}{\tau_R B_{21}}$$



# Die Laserschwelle und der lineare Anstieg der Laserleistung mit der Pumpleistung kann in vielen Lasern gut beobachtet werden, z.B. im Halbleiterlaser

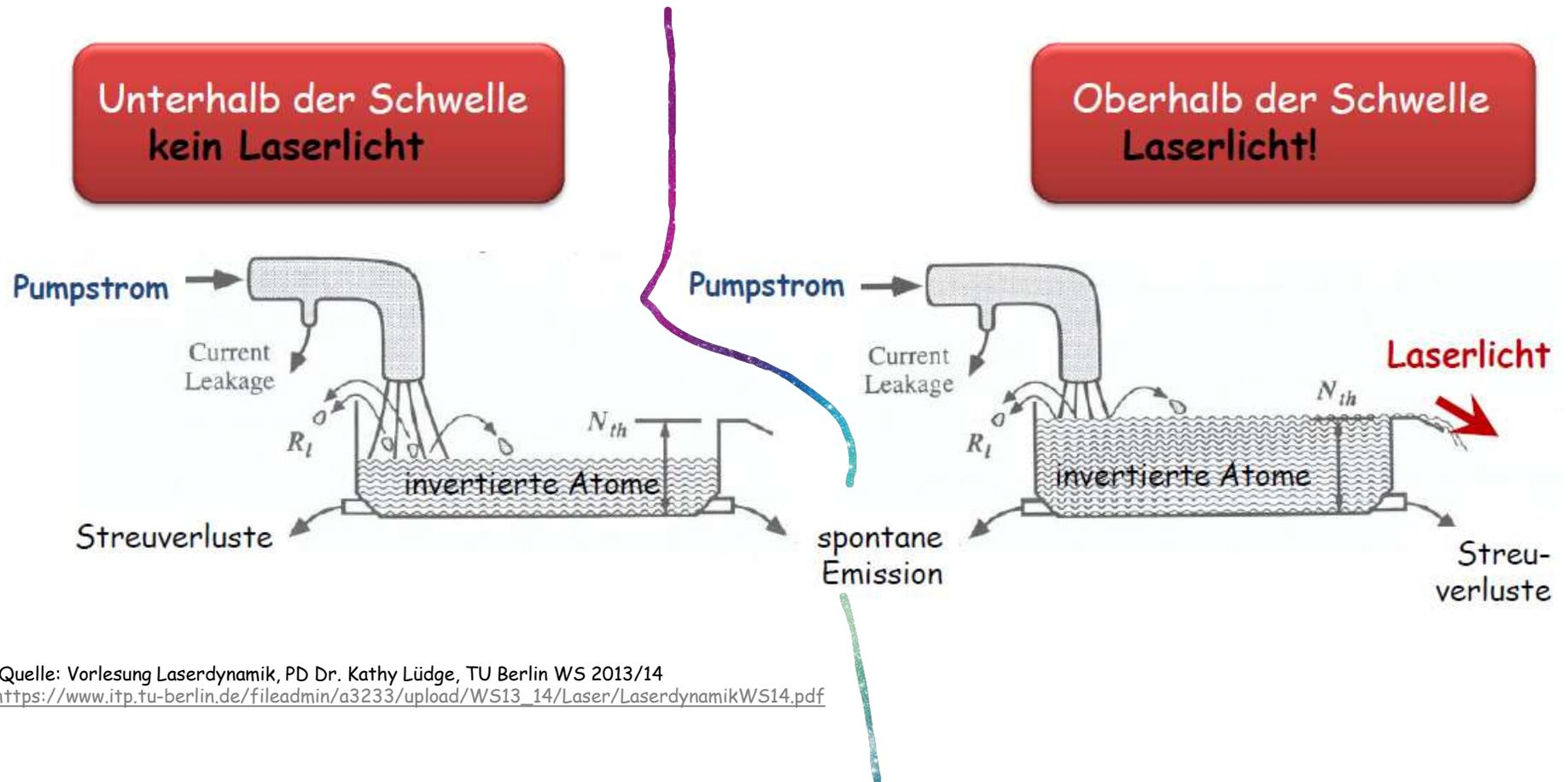
**Abb. 15.7** Abhängigkeit der Laserleistung vom Injektionsstrom und von der Temperatur für einen modernen Diodenlaser

Besonderheit beim Halbleiterlaser:  
Der recht hohe Untergrund durch Spontane Emission (LED Betrieb wenn  $I_{\text{Pump}} < I_{\text{Schwelle}}$ )



Übertrieben gezeichnet

# Laser Bilanzgleichung – anschaulich dargestellt

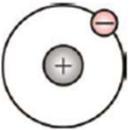
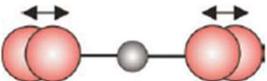
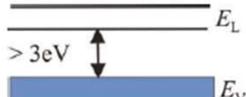


Quelle: Vorlesung Laserdynamik, PD Dr. Kathy Lüdge, TU Berlin WS 2013/14  
[https://www.itp.tu-berlin.de/fileadmin/a3233/upload/WS13\\_14/Laser/LaserdynamikWS14.pdf](https://www.itp.tu-berlin.de/fileadmin/a3233/upload/WS13_14/Laser/LaserdynamikWS14.pdf)

# Wie können die verschiedenen Lasertypen angeregt werden?

„Anregungsarten“  
„Pumpmethoden“

**Tabelle 2.2** Ausgewählte Arten der Anregung nach /Popr1998/

Laseraktives Medium	Anregungsart		Laser	
  	Atome Ionen	Elektronenstoß	Elektronen	He-Ne Ar-Ionen
Moleküle	Stoßanregung	Vibration Rotation		CO <sub>2</sub>
Isolator mit Fremdatomen	Optisches Pumpen	Elektronen (Pumpband)		Nd:YAG Faserlaser Scheibenlaser
Halbleiter	Stromdurchgang in einem pn-Übergang	Elektronen im Leitungsband		GaAs

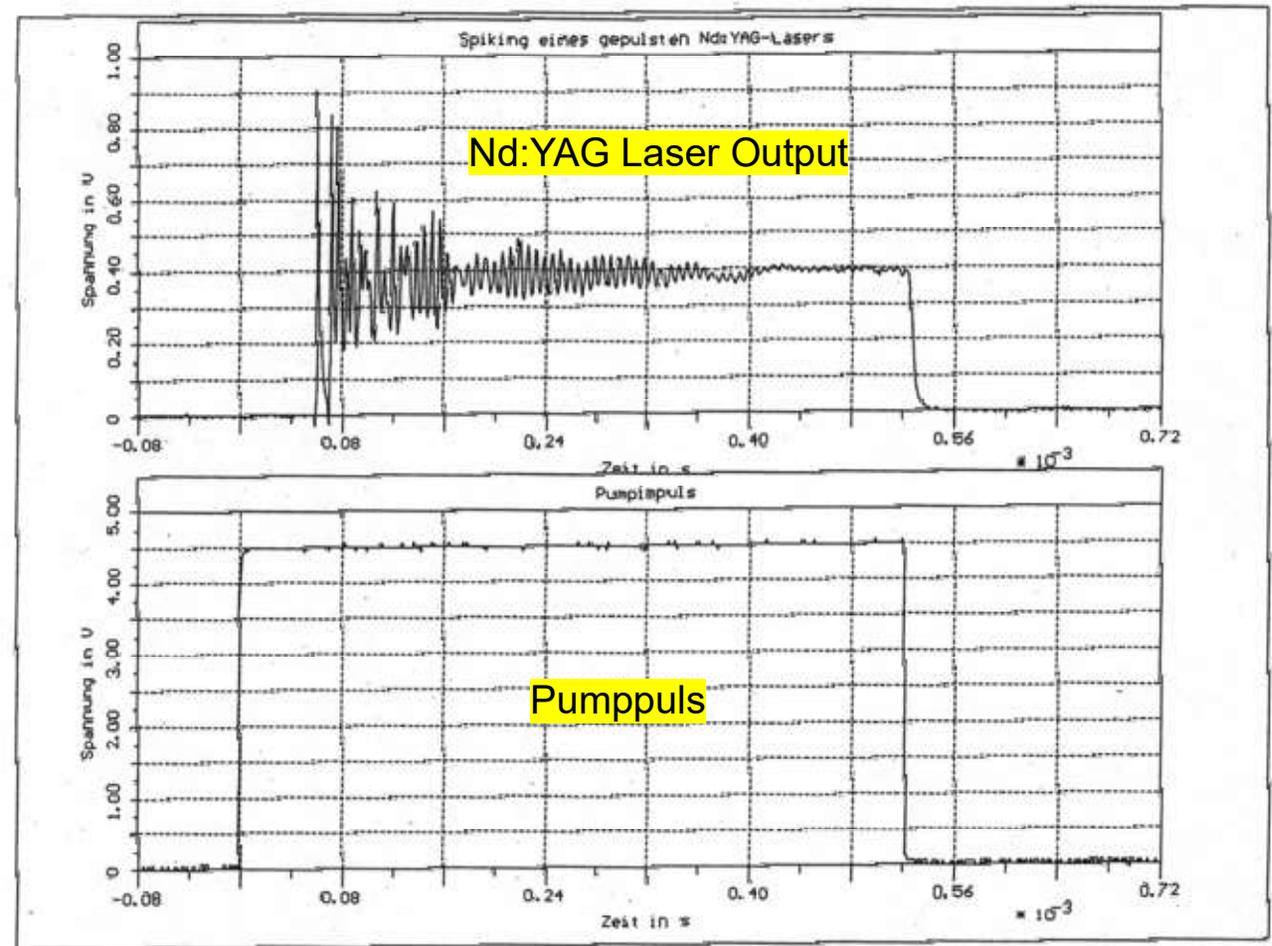
**Tabelle 2.3** Methoden zur Erzeugung einer Besetzungsinversion

Methode zur Erzeugung der Besetzungsinversion	Laserarten
Optisches Pumpen	Lampengepumpte Festkörperlaser
	Diodengepumpte Festkörperlaser
	Festkörpergepumpter Laser
Stoßanregung	Stöße 1. Art (Elektronenstoß), z. B. durch Gasentladung - Gaslaser
	Stöße 2. Art, z. B. Gaslaser
Stromdurchgang durch einen pn-Übergang	Anregung durch die Injektion von Ladungsträgern - Halbleiterlaser
Anregung durch chemische Prozesse	Chemisch (exotherme) Reaktion führt zur Anregung eines Reaktionspartners - Gaslaser

# SPIKING

Einige Laser zeigen beim Einschalten eine Folge von „Spikes“ (Pulsen) → das Spiking

# Laserpulse / Spiking eines Nd:YAG Lasers aus dem Laserlabor



# Spiking mit Er:Faserlaser

Spiking im Er:Faserlaser besonders gleichmässig ausgeprägt

Periode des Spikings wird kleiner mit steigender Pumpleistung

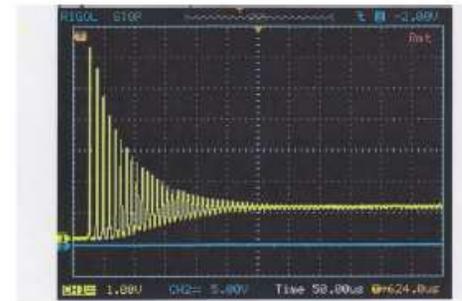


Abb. 4.8

Pumpstrom

>600 mA

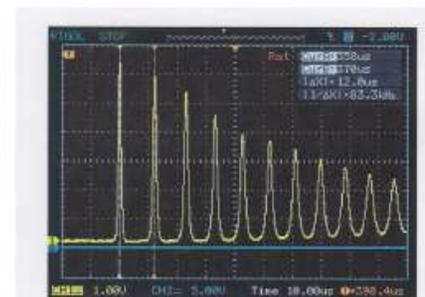


Fig. 60: Spiking at 600 mA injection current

600 mA

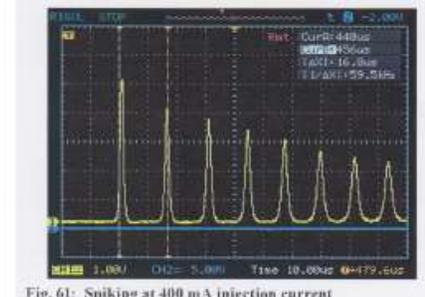


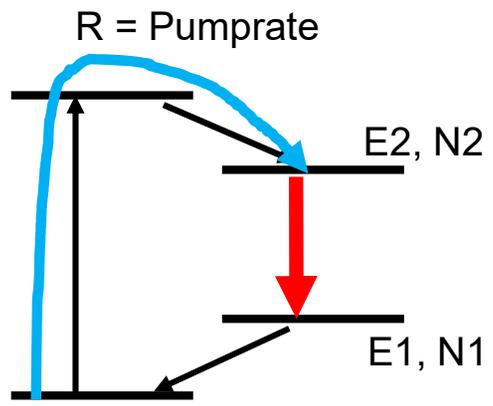
Fig. 61: Spiking at 400 mA injection current

400 mA

Abb. 4.9 und 4.10

# Wie läßt sich das Spiking erklären ?

# Nochmal zurück zu den Bilanzgleichungen für die Laserniveaus und die Photonenanzahl



Induzierte Emission  
Absorption Emission  
Spontane Emission

$$\frac{dN_1}{dt} = -R + B_{21}u_\nu g(\nu) \left[ N_2 - \frac{g_2}{g_1}N_1 \right] + A_{21}N_2, \quad (4.31)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = +R - B_{21}u_\nu g(\nu) \left[ N_2 - \frac{g_2}{g_1}N_1 \right] - A_{21}N_2, \quad (4.32)$$

$$\frac{d\tilde{n}}{dt} = -\kappa\tilde{n} + B_{21}u_\nu g(\nu) \left[ N_2 - \frac{g_2}{g_1}N_1 \right]. \quad (4.33)$$

- R = Pumprate
- $B_{21}$  = Einsteinkoeffizient ind. Emission
- $\tilde{n}$  = Photonenanzahl
- $u_\nu$  = Photonenenergie \* Photonenanzahl ( $h \nu \tilde{n}$ )
- $g(\nu)$  = Linienprofil
- $\kappa$  = Resonatorverluste =  $2 \pi f_{\text{hwb\_resonator}}$

Siehe auch: „Laser: Theorie, Typen und Anwendungen, M.W. Sigrist, Springer 8.Auflage 2018, S. 44 (Online in Uni-Bibliothek)

## Jetzt möchten wir den zeitabhängigen Fall betrachten

- Start: Einschalten der Pumpleistung  $R$  zum Zeitpunkt  $t_0$
- D.h. das Setzen vor  $\frac{d\tilde{n}}{dt} = 0$ ;  $\frac{d\sigma}{dt} = 0$ . ist jetzt nicht mehr erlaubt

- Gekoppelte DGLn können numerisch gelöst werden

$\sigma(t) \rightarrow N_i$  (Besetzung Laser Niveau)

$\tilde{n} \rightarrow n_i$  (Photonenanzahl)

$\tau_{sp}$  Lebensdauer Laserniveau

$B$  Rate induz. Emission

$R$  Pumprate

$\kappa$  Resonator Verluste

$$\frac{d\sigma}{dt} = -2\tau_{sp}^{-1}\sigma - 2B\tilde{n}\sigma + 2R,$$

$$\frac{d\tilde{n}}{dt} = -\kappa\tilde{n} + B\tilde{n}\sigma.$$

Gekoppelte DGLn

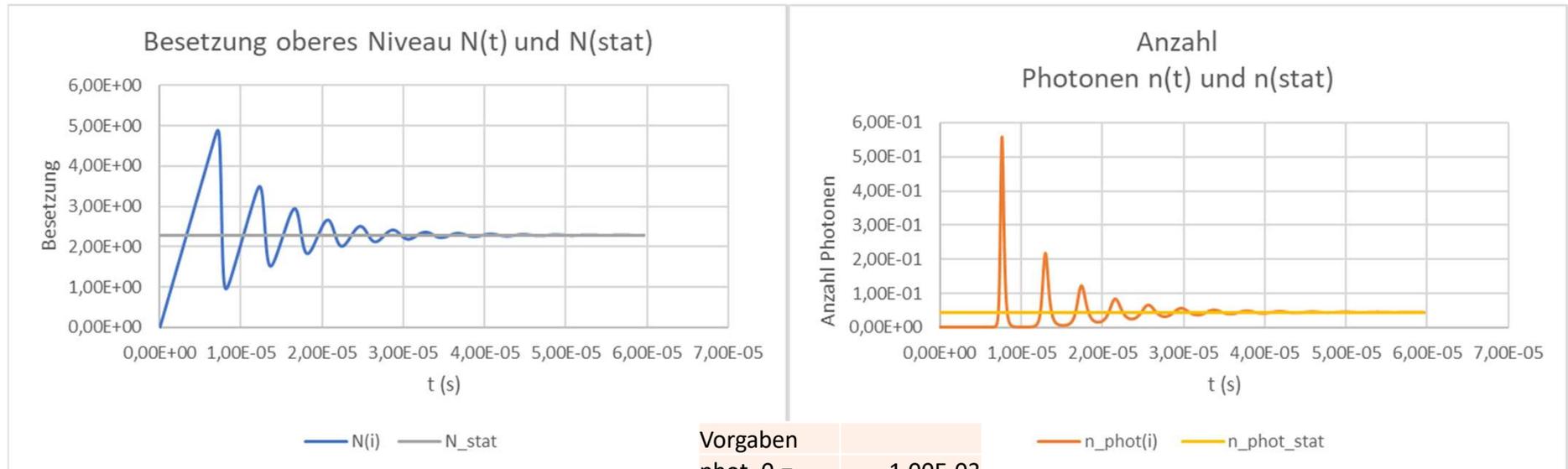
Können numerisch gelöst werden

Numerische Lösung (Programm)

- **Besetzung**  $N_i = (-2 * N_{i-1} / \tau_{sp} - 2 * B * N_{i-1} * n_{i-1} + 2 R) * \Delta t + N_{i-1}$
- **Photonen**  $n_i = (- \kappa * n_{i-1} + B * N_{i-1} * n_{i-1}) * \Delta t + n_{i-1}$

Nötige Startparameter:  $N_0, n_0$  und die Konstanten  $\tau_{sp}, B, R, \kappa$

# Ergebnis: Einschwing Oszillation der Besetzung $N(t)$ und der Photonenanzahl $n(t)$ , die sich schließlich bei den Werten für den stationären Fall $N_{stat}$ und $n_{stat}$ einpendeln



$$N_i = dt * (2R - 2*B*n_{i-1}*N_{i-1} - 2*N_{i-1}/t_{sp}) + N_{i-1}$$

$$n_i = dt * (-k*n_{i-1} + B*n_{i-1}*N_{i-1}) + n_{i-1}$$

Vorgaben	
phot_0 =	1,00E-03
N_0 =	0,00E+00
R_Pump	3,50E+05
B_ind =	3,50E+06
k_reso =	8,00E+06
t_spt_emi	5,00E-03

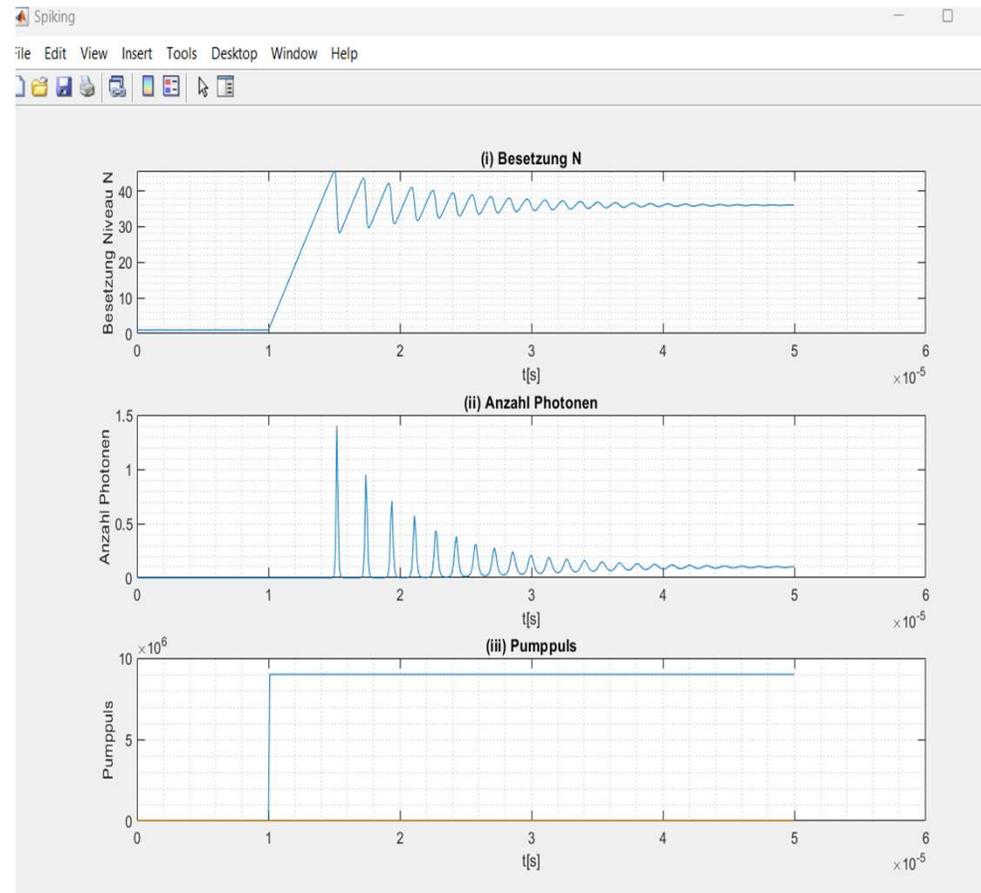
# Simulation Spiking mit Matlab (ode23)

```

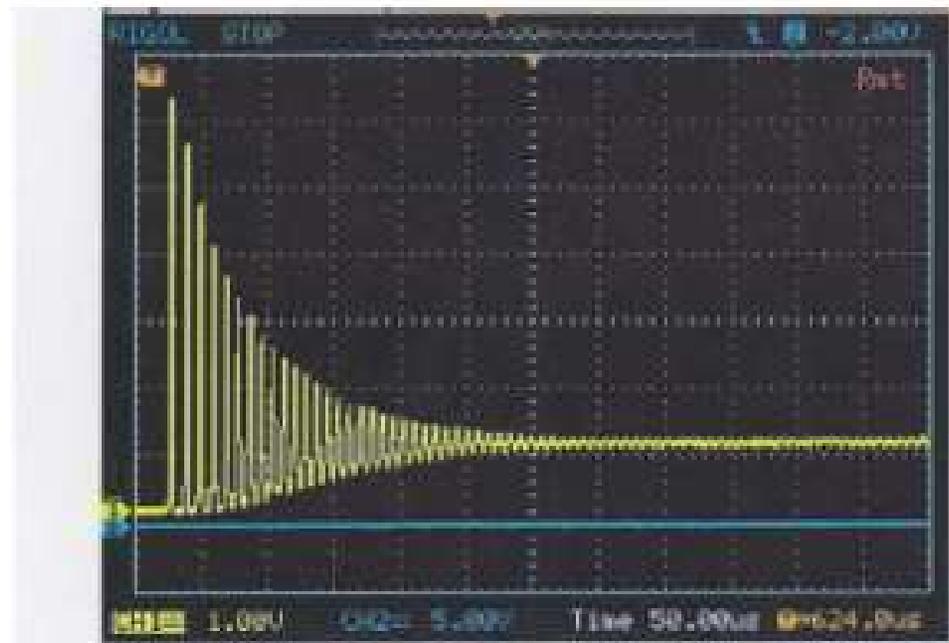
% Initialize und ODE23 Aufruf
tspan = 0:1E-7:7:5E-5;
N_0 = 1; % Startwert Besetzung N
Q_0 = 0.001; % Startwert Anzahl Photonen
% x(1)= Besetzung N, x(2)=Anzahl Photonen
x0 = [N_0 Q_0]; %
[T,X] = ode23(@dgl3x,tspan,x0);

% Pumpuls nachbilden
t=0:1E-7:7:5E-5;
R = 9*10^6; % Pumprate
n=length(t);
RP=ones(1,n);
for i=1:n
    if(t(i) <= 0.1E-4 )
        RP(i,1)= 0 ;
    else
        RP(1,i) = R;
    end
end

function [dxdt] = dgl3x(t,x)
    R_Pump = 9*10^6; % Pumprate
    B21 = 2.50E+06; % B21 Koeffizient
    k = 90.00E+06; % Reso.Verluste
    t_spt_emi = 5.00E-04; % 1/A21 spt. Emission
    A21=1/t_spt_emi;
    if(t >= 0.1*10^-4 && t <= 2*10^-3)
        R = R_Pump; % [Pumprate]
    else
        R = 0; % [Pumprate]
    end
    dxdt = zeros(2,1);
    dxdt(1) = R - B21*x(2)*x(1)- x(1)*A21;
    dxdt(2) = -k*x(2) + B21*x(2)*x(1);
    % N_i = dt * (R - B*Q_i-1 * N_i-1 - N_i-1 A21 ) + N_i-1
    % Q_i = dt * (-k*Q_i-1+B*Q_i-1*N_i-1)+n_i-1
end
    
```



Bei kontinuierlichem Pumpen hören die Spikes nach einer Weile auf und es pendelt sich in der Regel das cw Gleichgewichtsniveau des Lasers ein



Aufgenommen mit einem  
Diodenlaser gepumpten  
Er-Faserlaser

# Übungsaufgaben

# ÜBUNGSAUFGABEN

25.) E5.1

Berechnen Sie die Zahl der Neon-Atome in einem He-Ne-Laser mit einem Kapillardurchmesser von 1 mm und einer Länge von 20 cm.

Wieviele Photonen pro Sekunde werden von einem Ne Atom bei einer Ausgangsleistung von 1 mW emittiert? (Fülldruck  $p = 500 \text{ Pa}$ ,  $p_{\text{He}}/p_{\text{Ne}} = 5:1$ , Avogadrokonstante  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ , Molvolumen bei 1 bar ( $10^5 \text{ Pa}$ ) = 22,4 Liter)

[Lösung:  $3,5 \cdot 10^{15}$  ; 1] (++)

26.) E1.2

Wieviele Photonen pro Sekunde strahlt eine He-Ne-Laser ( $\lambda = 633 \text{ nm}$ ) mit  $P = 1 \text{ mW}$  ab? Wie hoch ist die Photonenenergie in Joule und in Elektronenvolt?

[Lösung:  $3,2 \cdot 10^{15}$  ;  $3,1 \cdot 10^{-19} \text{ J}$  ; 1,9 eV] (++)

# Übungsaufgaben

65.) E2.2

In einem 5 cm langen Nd-Laserkristall tritt Strahlung mit einer Leistung von 1 W ein und mit 3 W aus. Wie groß sind

(a) der Verstärkungsfaktor  $G$  und

(b) die differentielle Verstärkung  $g$ ?

( $G = 3$ ,  $g = 0,22 \text{ cm}^{-1}$ )

66.) E2.3

Ein Lasermedium besitzt eine differentielle Verstärkung von  $0,05 \text{ cm}^{-1}$ . Um welchen Faktor wird das Licht nach 12 cm verstärkt?

( $G = 1,82$ )

# Vielen Dank – nächster Termin

## MI 24.05.2023

Mit den Kurzvorträgen  
Lasersicherheit  
He-Ne-Laser  
CO<sub>2</sub> Laser  
Festkörper Laser