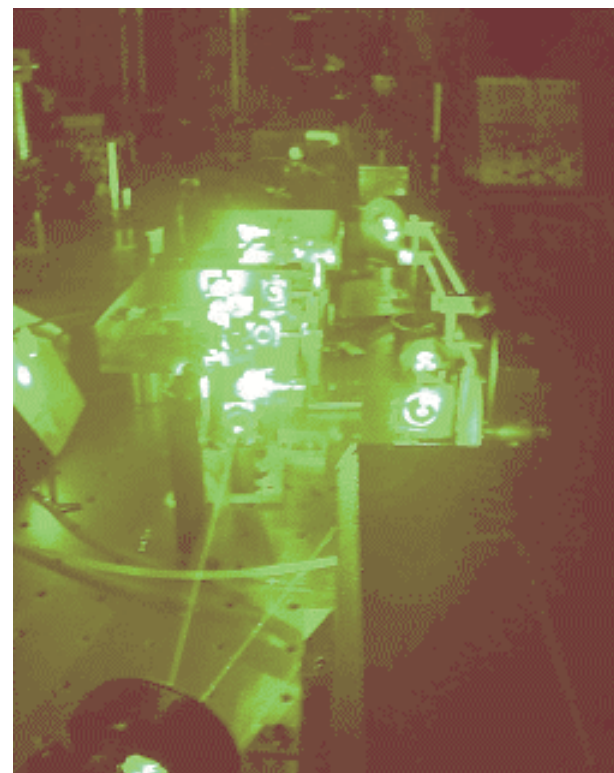


Grundlagen der LASER-Operation



Rolf Neuendorf

Inhalt

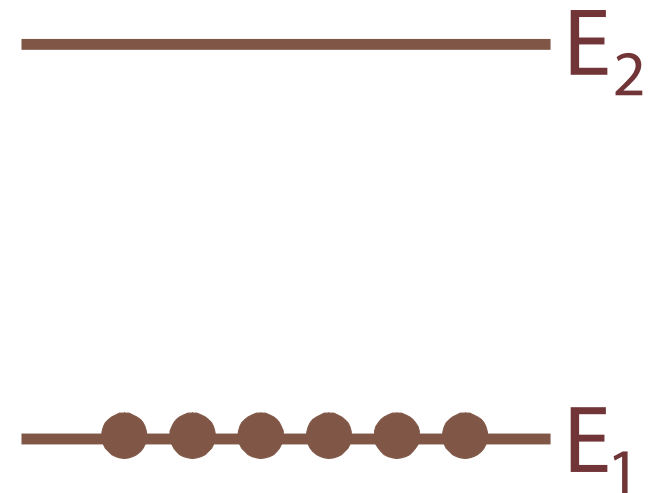
- Grundlagen der Lasertechnik
- Nichtlineare optische Effekte
 - Frequenzvervielfachung
 - parametrische Prozesse
 - sättigbare Absorption
- Erzeugung von Laserpulsen
- Vermessung kurzer Laserpulse
- Modifikation von Laserpulsen
 - Kompression
 - Verstärkung

Grundlagen

LASER – Light Amplification by Stimulated
Emission of Radiation

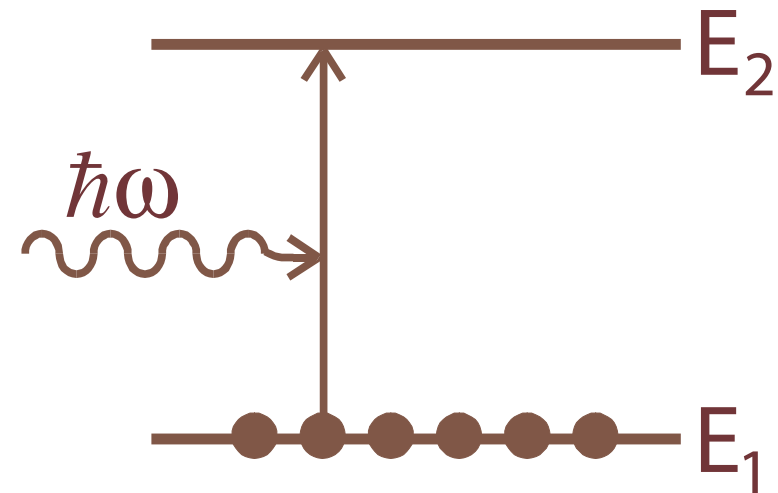
Physikalische Grundlage: Das 2 Niveau System

Das 2-Niveau System



Das 2-Niveau System

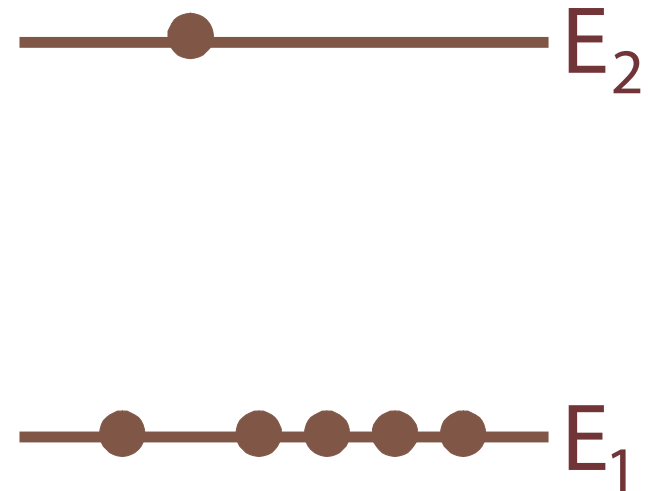
Absorption:



Das 2-Niveau System

Absorption:

$$\frac{dN_{1 \rightarrow 2}^{Abs}}{dt} = B_{12} \cdot N_1 \cdot u(\omega)$$

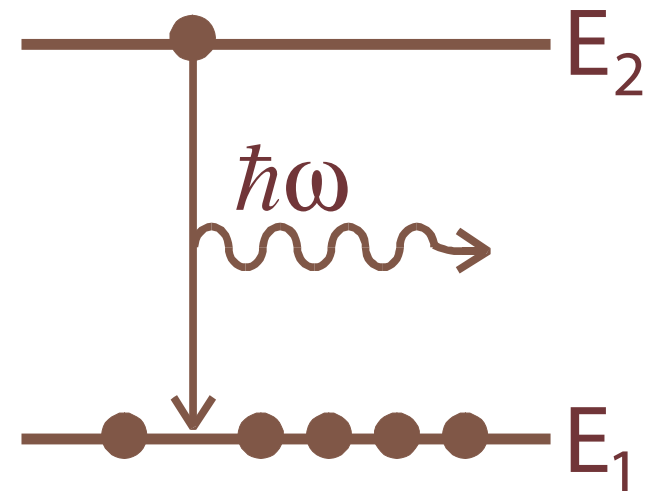


Das 2-Niveau System

Absorption:

$$\frac{dN_{1 \rightarrow 2}^{Abs}}{dt} = B_{12} \cdot N_1 \cdot u(\omega)$$

spontane Emission:



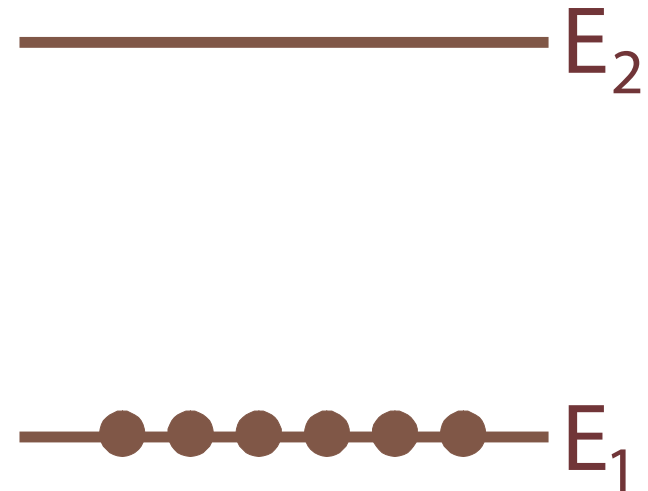
Das 2-Niveau System

Absorption:

$$\frac{dN_{1 \rightarrow 2}^{Abs}}{dt} = B_{12} \cdot N_1 \cdot u(\omega)$$

spontane Emission:

$$\frac{dN_{2 \rightarrow 1}^{spontan}}{dt} = A_{21} \cdot N_2$$



Das 2-Niveau System

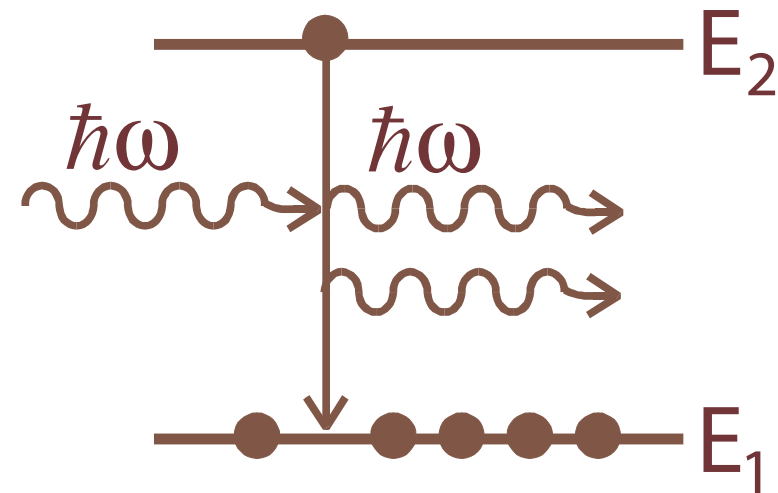
Absorption:

$$\frac{dN_{1 \rightarrow 2}^{Abs}}{dt} = B_{12} \cdot N_1 \cdot u(\omega)$$

spontane Emission:

$$\frac{dN_{2 \rightarrow 1}^{spontan}}{dt} = A_{21} \cdot N_2$$

stimulierte Emission:



Das 2-Niveau System

Absorption:

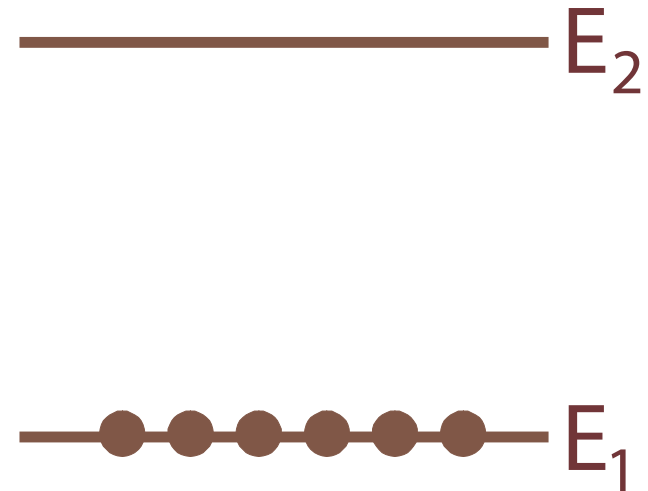
$$\frac{dN_{1 \rightarrow 2}^{Abs}}{dt} = B_{12} \cdot N_1 \cdot u(\omega)$$

spontane Emission:

$$\frac{dN_{2 \rightarrow 1}^{spontan}}{dt} = A_{21} \cdot N_2$$

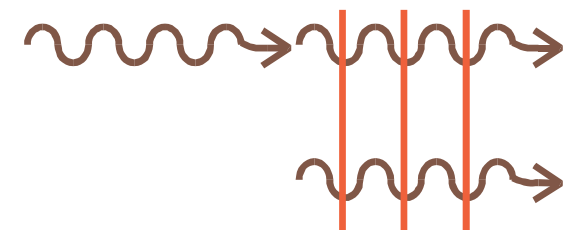
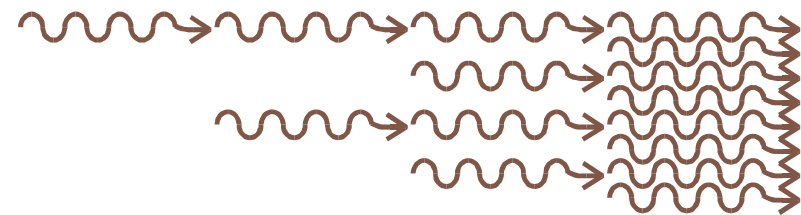
stimulierte Emission:

$$\frac{dN_{2 \rightarrow 1}^{stimuliert}}{dt} = B_{21} \cdot N_2 \cdot u(\omega)$$

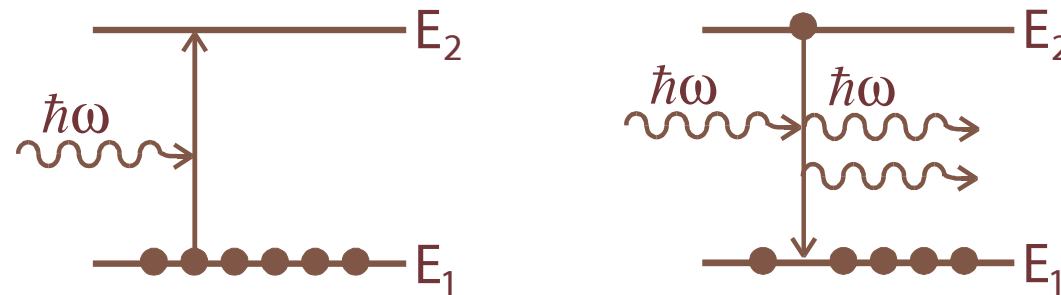


Stimulierte Emission

- führt zu Photon-Multiplikation (Lichtverstärkung)
- das stimulierte emittierte Photon besitzt die gleiche Frequenz, Phase und Richtung wie das anregende Photon (Kohärenz)



Absorption vs. stimulierte Emission



Absorption

$\sim N_1$

stimulierte Emission

$\sim N_2$

Emission bevorzugt, wenn $N_2 > N_1$

Besetzungsinversion!

Besetzungsinversion

Gleichgewichts-Besetzung von Zuständen:
Boltzmann-Verteilung

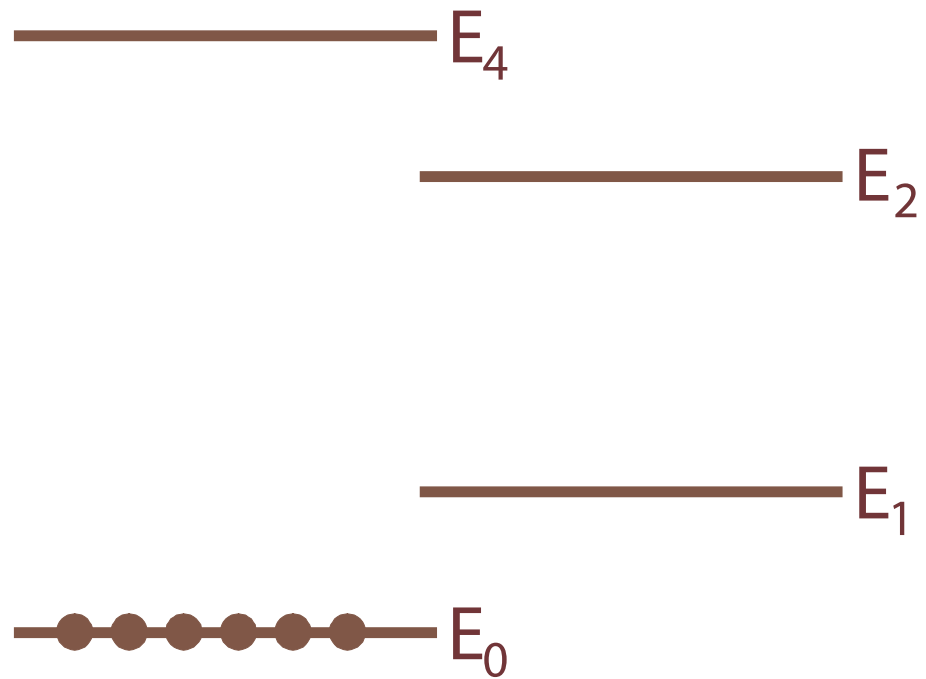
$$N_2 / N_1 \propto e^{-(E_2 - E_1) / kT}$$

$E_2 > E_1$: im thermischen Gleichgewicht
keine Besetzungsinversion möglich

Nicht-Gleichgewichtszustand erforderlich !

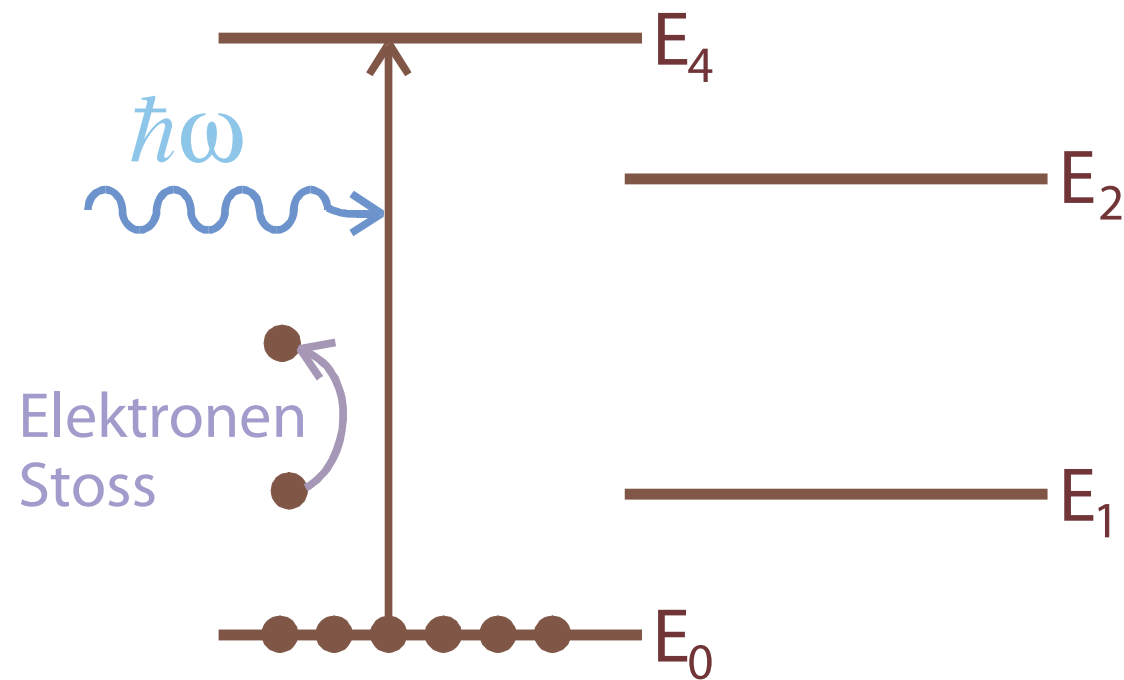
Pumpen

4 Niveau System



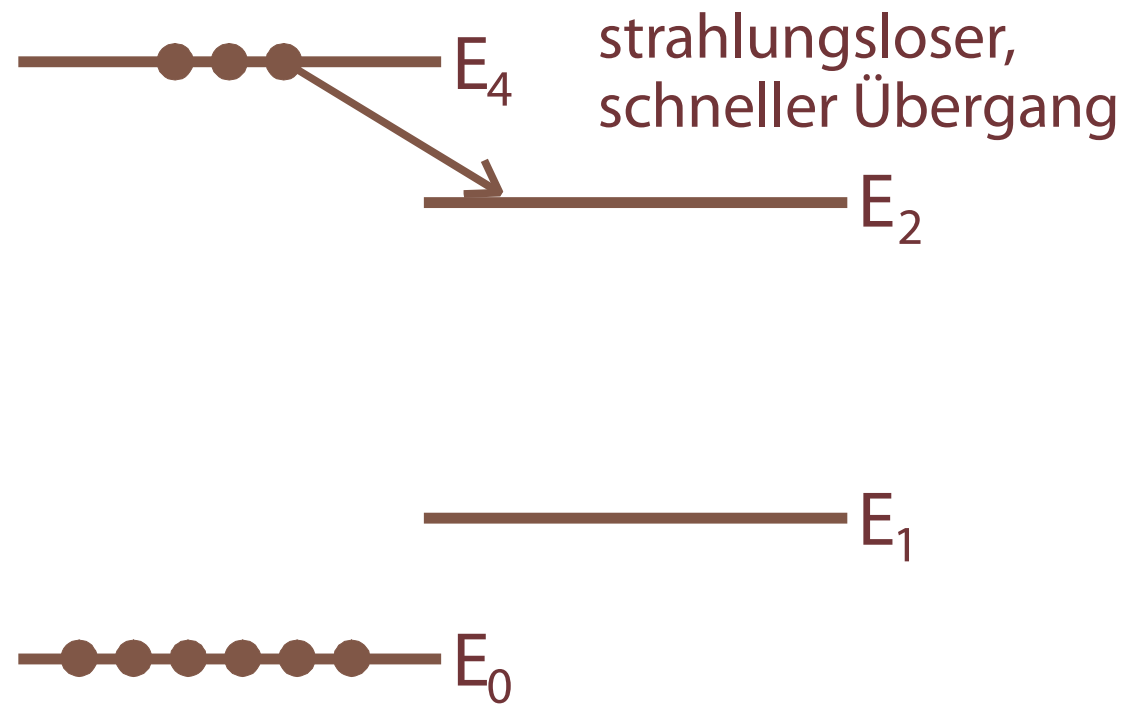
Pumpen

4 Niveau System



Pumpen

4 Niveau System



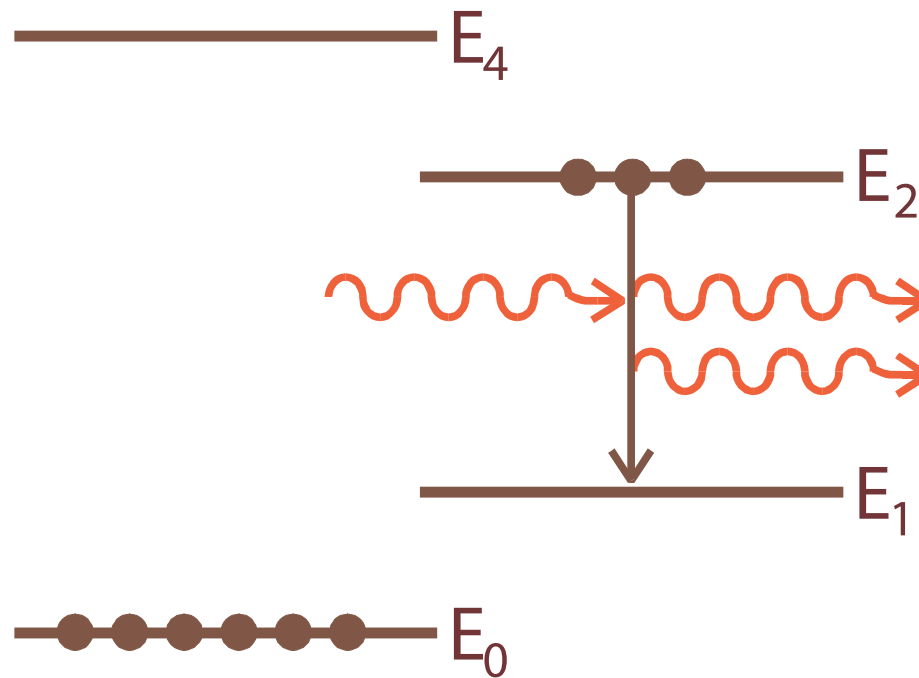
Pumpen

4 Niveau System



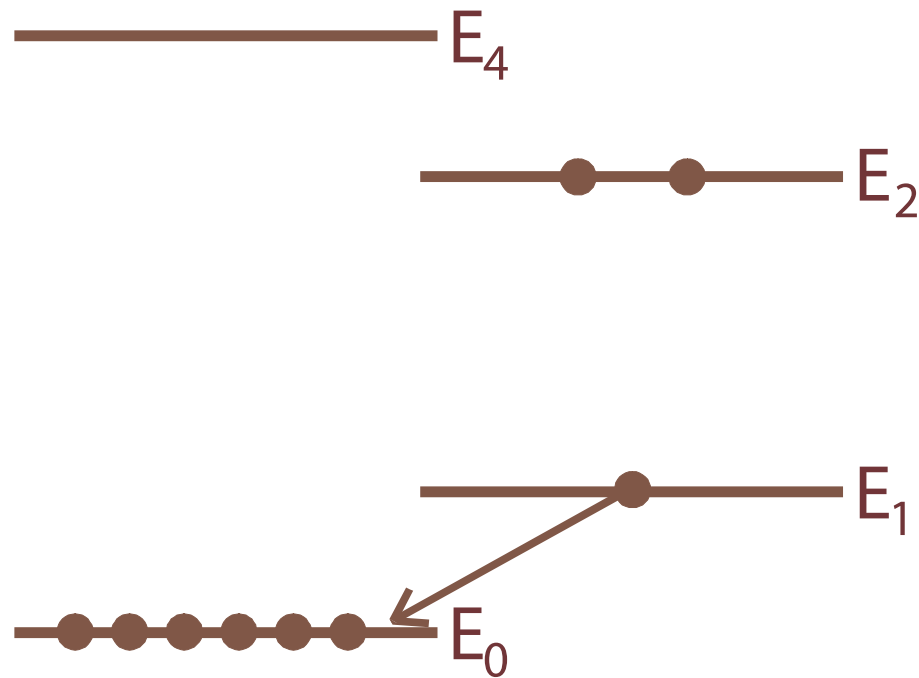
Pumpen

4 Niveau System

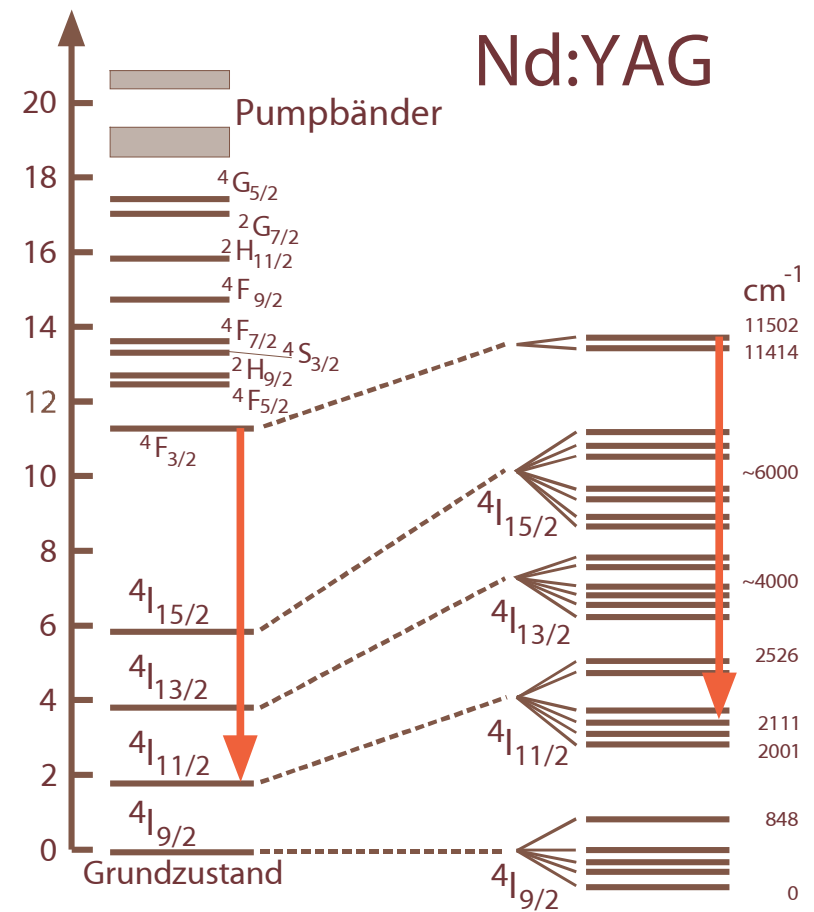
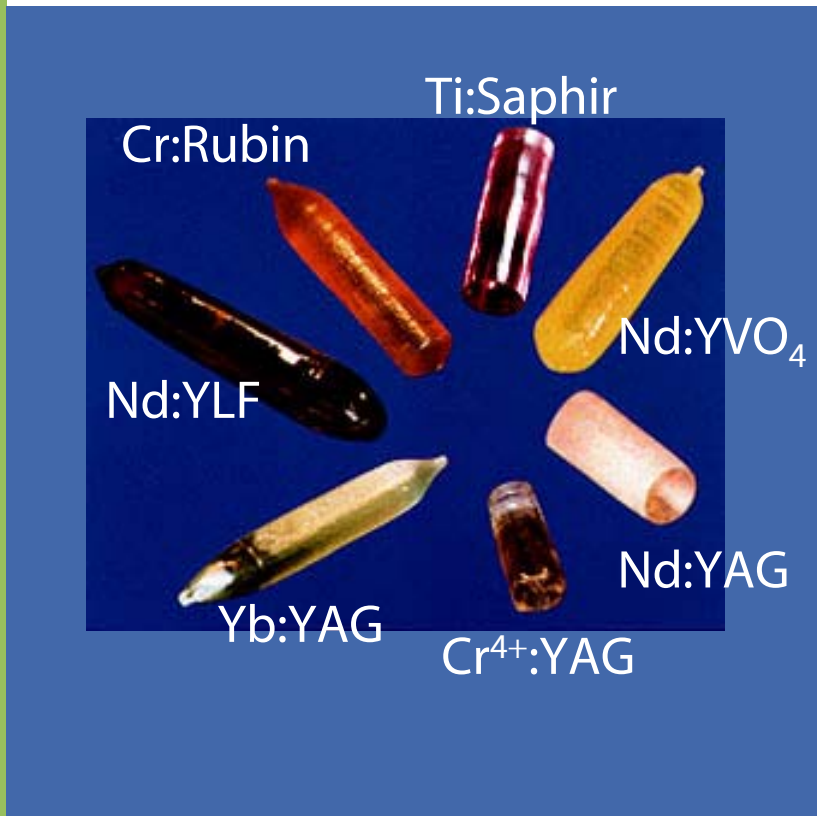


Pumpen

4 Niveau System

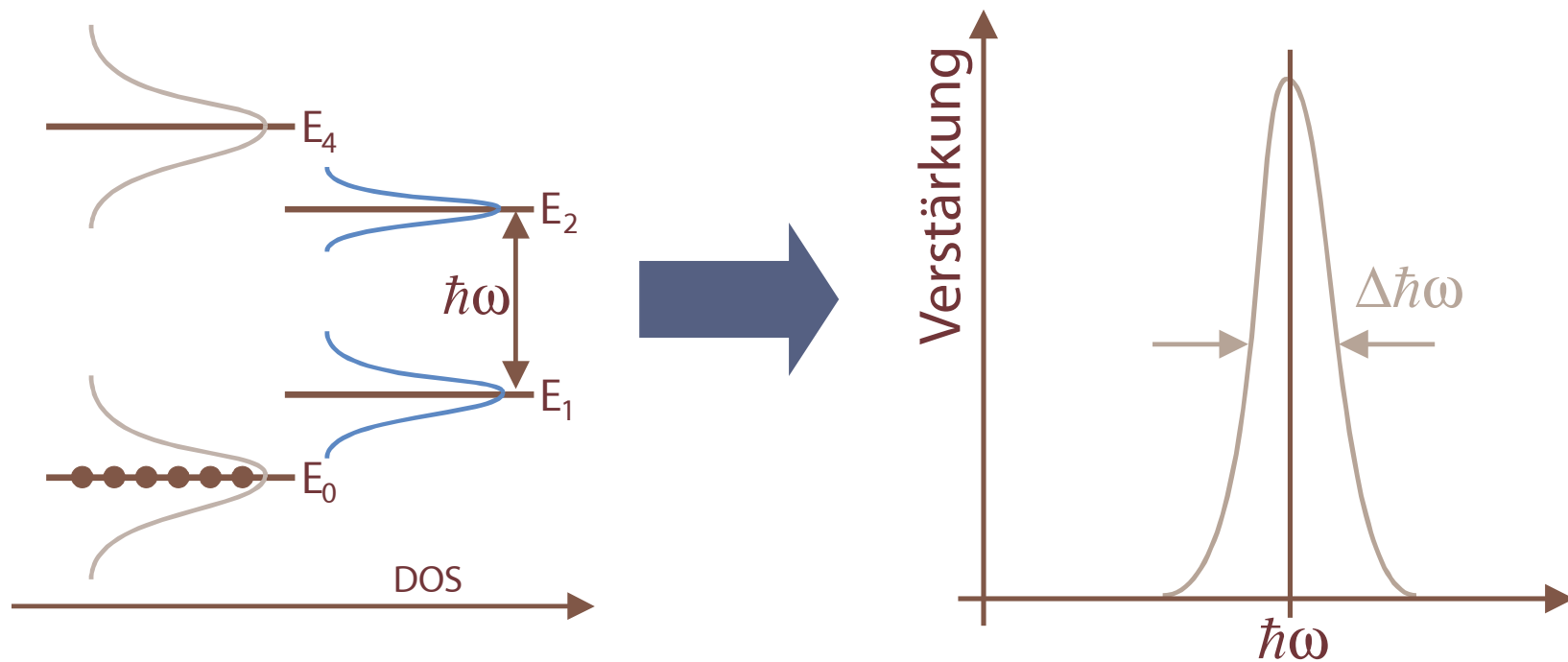


Reale Lasermedien



Verstärkungsprofil

endliche Linienbreite (der Laserniveaus)

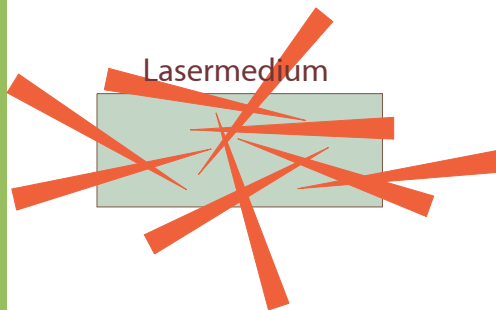


Verstärkungsprofil

typische Breiten $\Delta\nu_0 (= \Delta\hbar\omega / h)$

<u>Medium</u>	<u>$\Delta\nu_0 / \text{Hz}$</u>
Argon-Ionen	$1,1 \cdot 10^8$
Helium-Neon	$1,5 \cdot 10^9$
Nd:YAG	$2,1 \cdot 10^{11}$
Rhodamin 6G (Dye)	$1,0 \cdot 10^{14}$

Superstrahlung



Aktives Medium (mit Inversion)

→ „Superstrahlung“

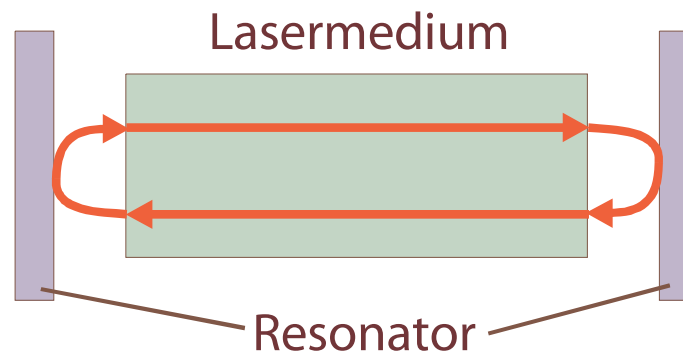
- (spontan) emittiertes Photon durch einmaliges Durchlaufen des aktiven Mediums verstärkt
- unkontrolliert in alle Richtungen
- undefinierte Verstärkung (abhängig von Startpunkt)
- viele unkorrelierte Wellenzüge

Feedback

Bedingung für (stabile) Laser-Oszillation:

FEEDBACK

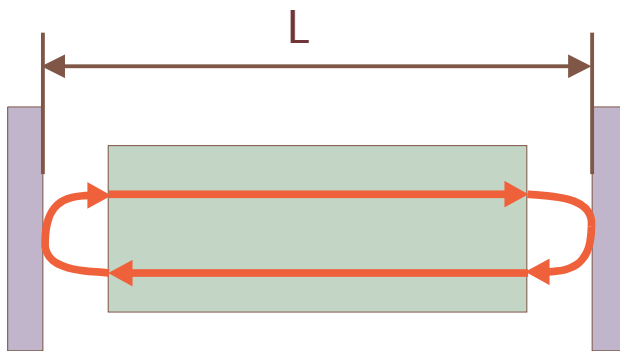
→ Superstrahlung wird in aktives Medium rückgekoppelt



Resonator

Reflexionen an den Resonatorspiegeln
→ Ausbildung stehender Wellen

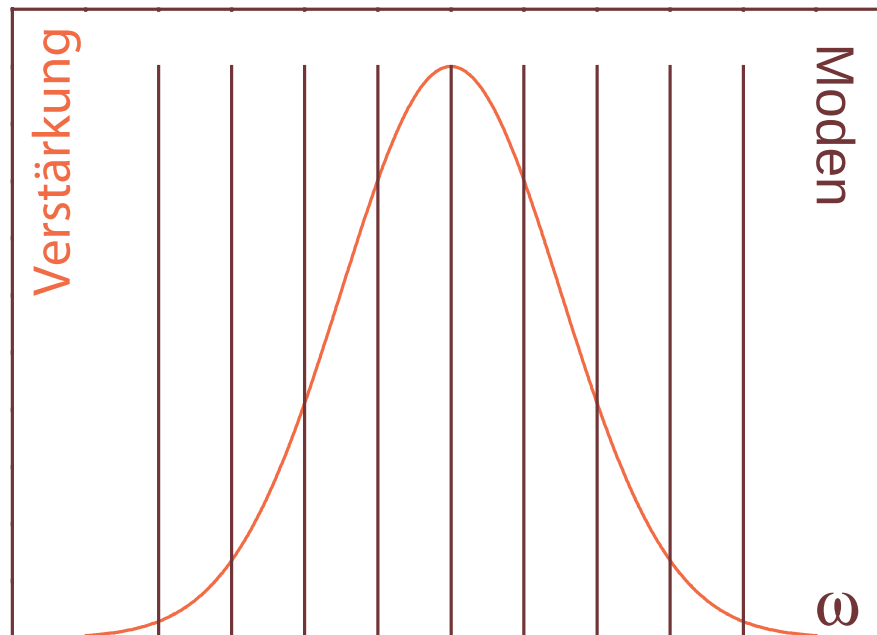
Bedingung für konstruktive Interferenz:



$$L = m \frac{\lambda}{2} = m \frac{c}{2\omega}$$
$$\Rightarrow \omega = m \frac{c}{2L} ; \quad \Delta\omega = \frac{c}{2L}$$

Longitudinale (axiale) Lasermoden

in der Regel passen viele Resonatormoden in das Verstärkungsprofil des aktiven Mediums



$$\Delta\omega_{\text{mode}} = \frac{c}{2L}$$

↓

$$\Delta\omega_{\text{mode}} \sim 1,5 \cdot 10^8 \text{ Hz}$$

(mit $L = 1\text{m}$)

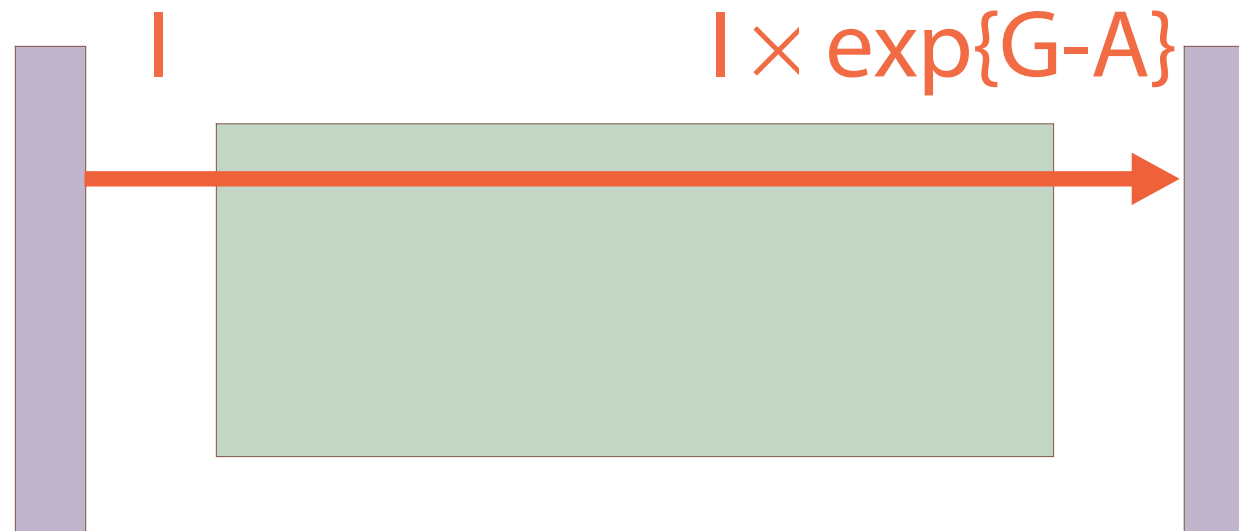
zum Vergleich:

$$\Delta\omega_{\text{gain}} \sim 10^8 - 10^{14} \text{ Hz}$$

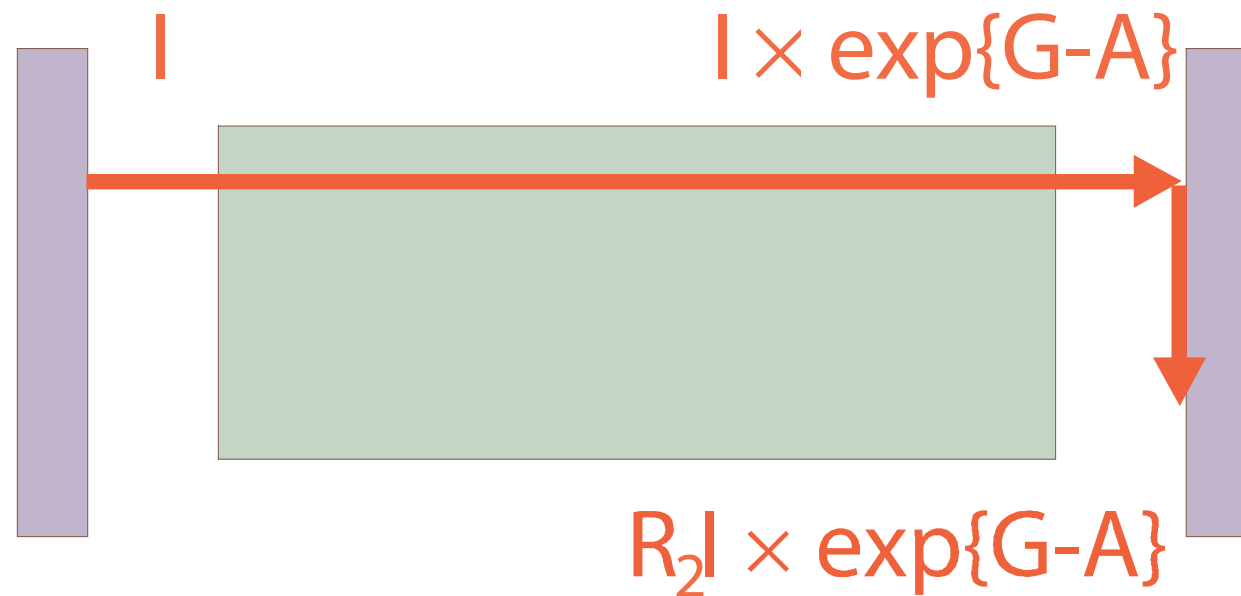
Resonatorumlauf



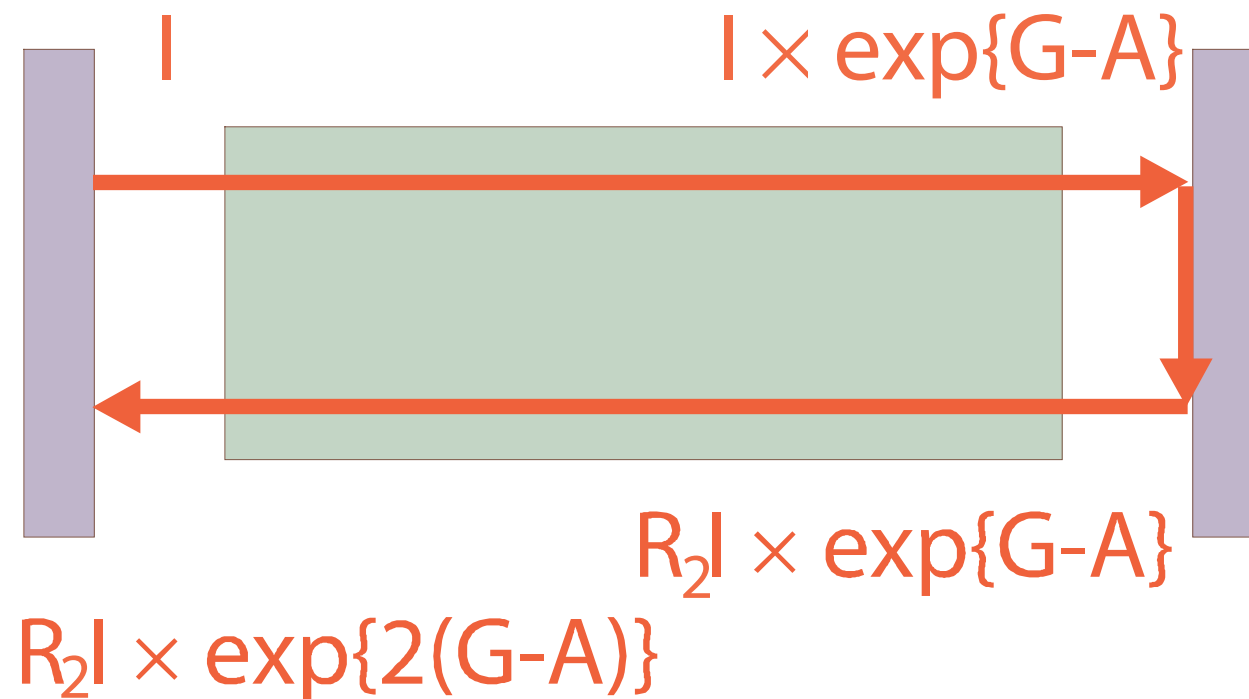
Resonatorumlauf



Resonatorumlauf

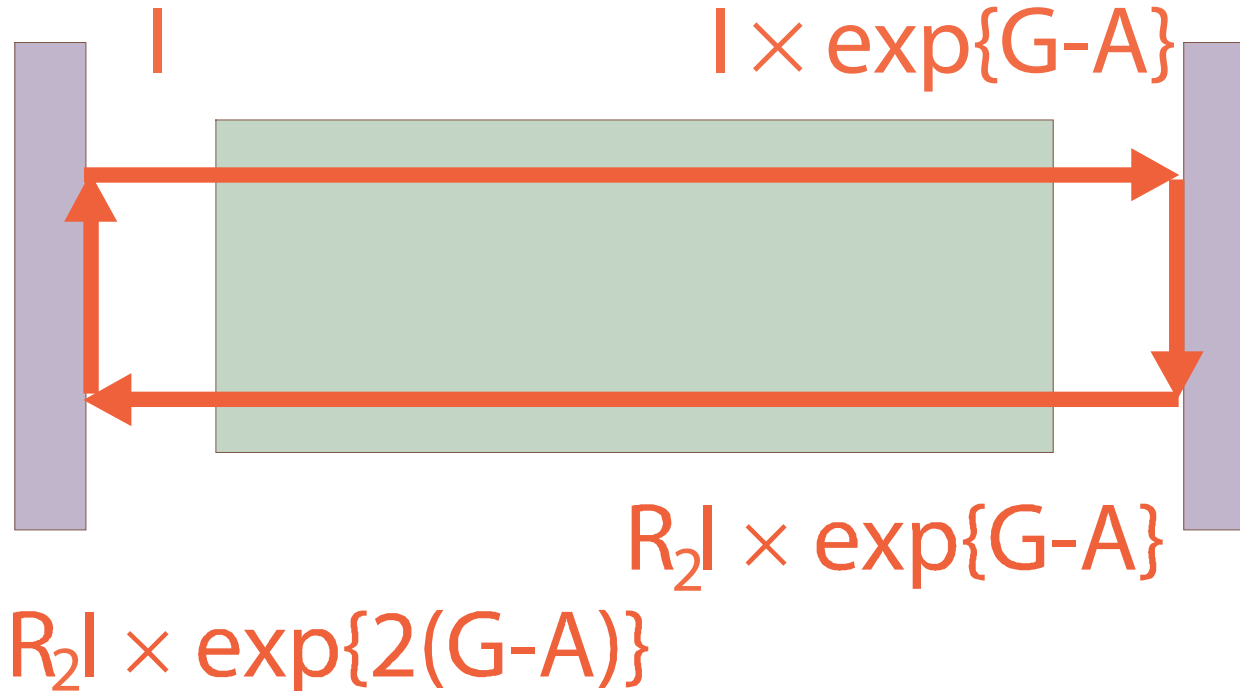


Resonatorumlauf



Resonatorumlauf

$$R_1 R_2 I \times \exp\{2(G-A)\}$$



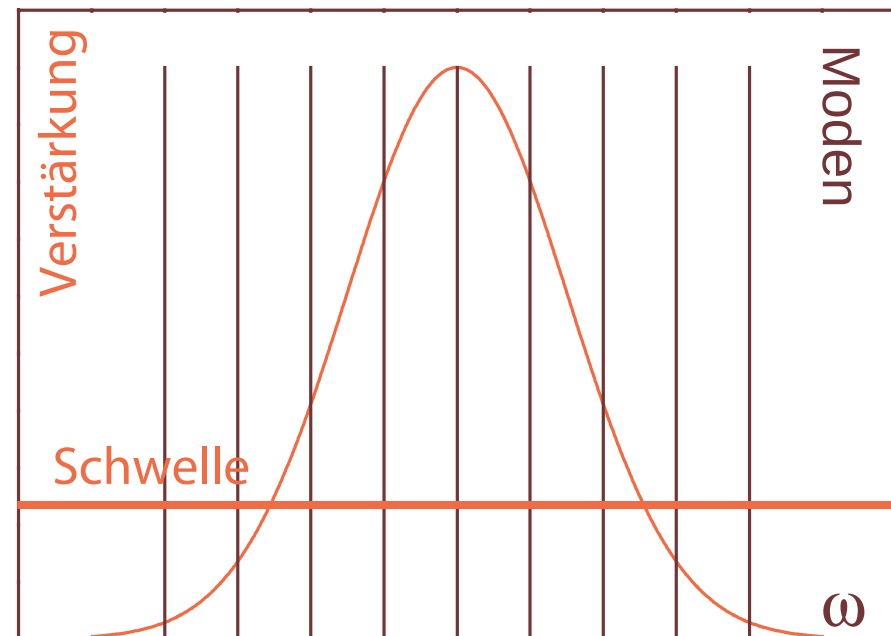
Resonatorumlauf

Verstärkung, wenn

$$I \leq R_1 R_2 I \cdot e^{2(G-A)}$$

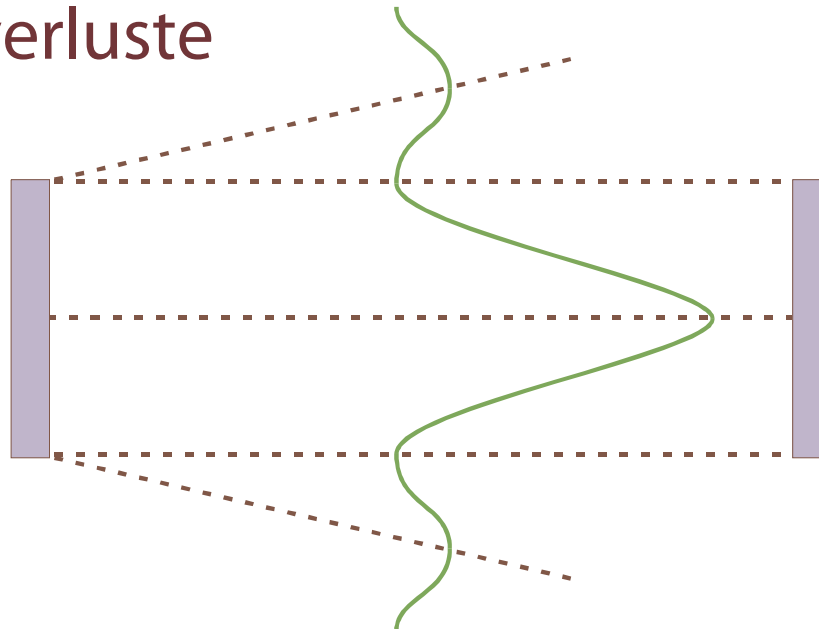
Schwellenwert:

$$G \geq \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) + A$$



Resonatorverluste

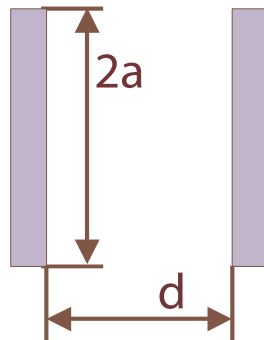
- $R_1, R_2 < 100\%$ (Auskopplung)
- Absorptionsverluste (A)
- Beugungsverluste



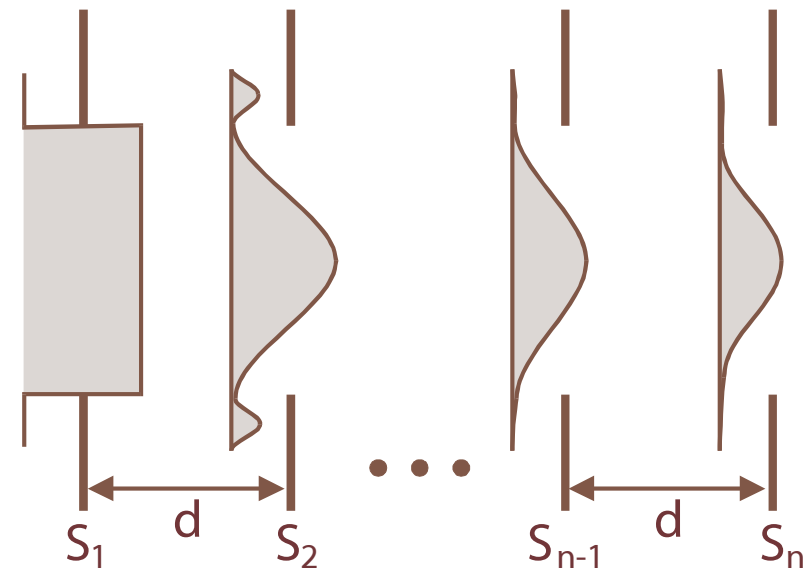
Transversale Lasermoden

Beugung $\Rightarrow$ transversale Moden

Spiegelsystem

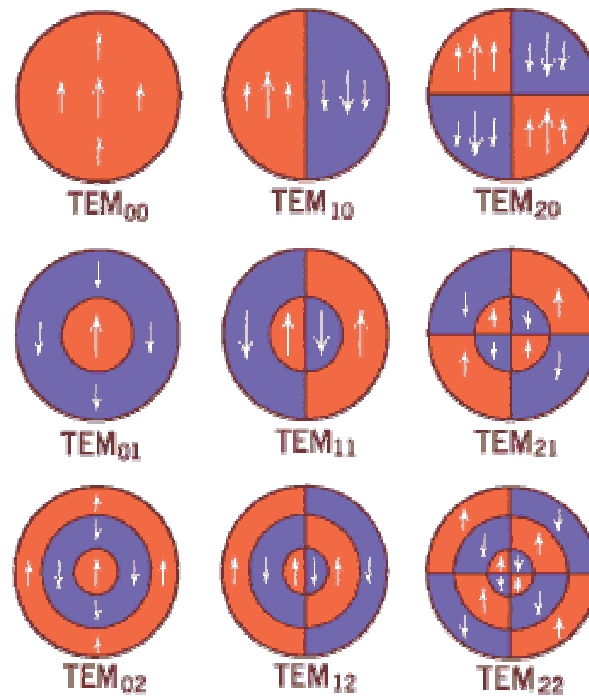


Äquivalentes
→
Spaltsystem



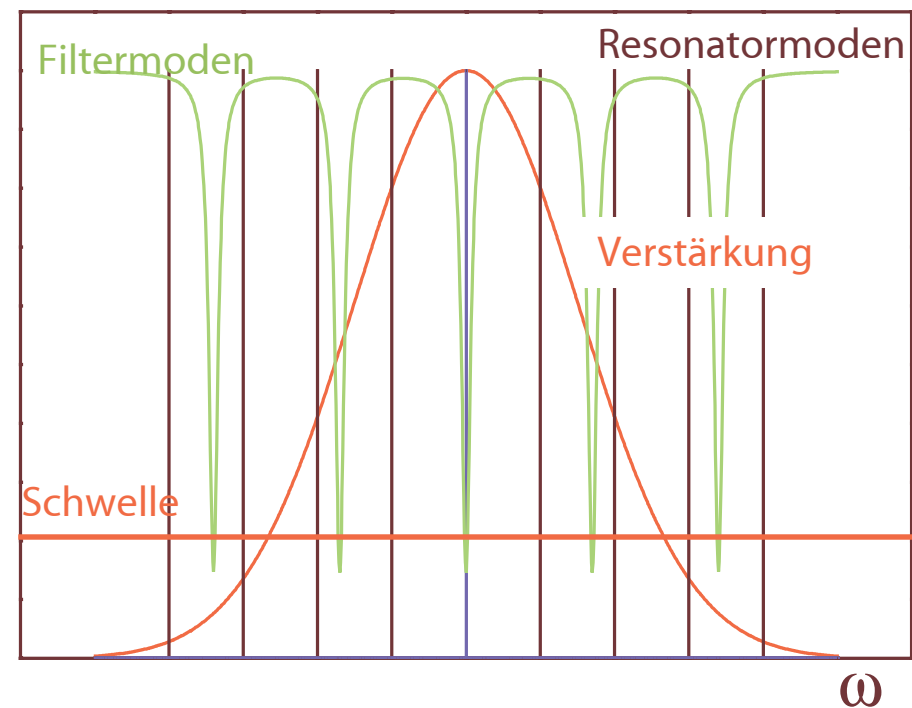
iterative Berechnung der Beugungsfigur $\rightarrow$ Fox-Gordon-Gl.

Transversale Lasermoden



Modenselektion

- transversale Moden
höhere Mode = grössere
laterale Ausdehnung
→ Selektion der TEM_{00} -
Mode mit Blenden
- longitudinale Moden
→ z.B. zusätzliches,
(inkommensurables)
Interferenzfilter
(Etalon)



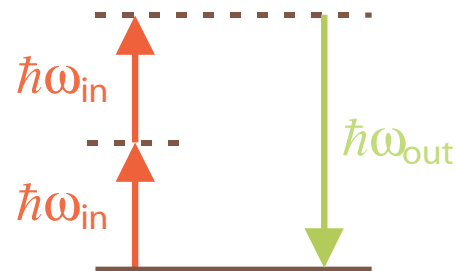
Nichtlineare Optische Prozesse

- Frequenzvervielfachung
- Parametrische Prozesse
- Sättigungsprozesse

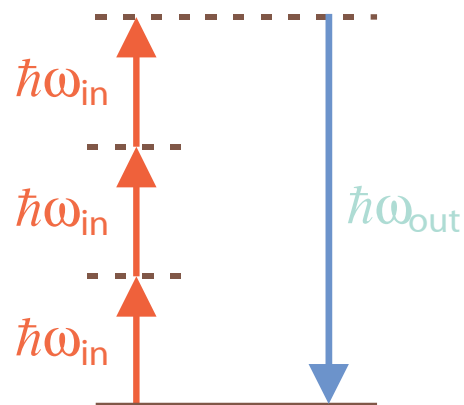
Frequenzvervielfachung

- Photonen-Bild

SHG



THG



- Wellen-Bild

$$\vec{P} \propto \vec{\chi}^{(1)} \vec{E} + \vec{\chi}^{(2)} \vec{E}^2$$

$$\propto \sin^2(\omega t) = \frac{1}{2} [1 - \cos(2\omega t)]$$

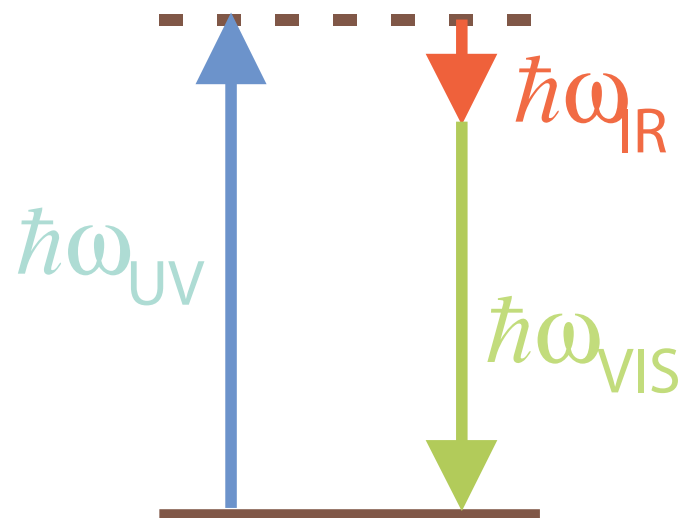
$$\vec{P} \propto \vec{\chi}^{(1)} \vec{E} + \vec{\chi}^{(2)} \vec{E}^2 + \vec{\chi}^{(3)} \vec{E}^3$$

$$\propto \sin^3(\omega t) = \frac{1}{4} [3\sin(\omega t) - \sin(3\omega t)]$$

Parametrische Prozesse

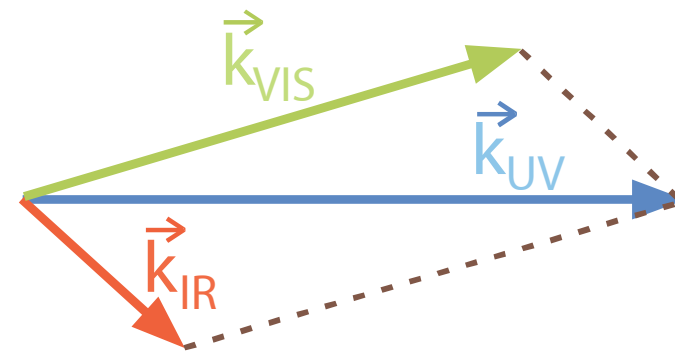
- z.B. „parametric down-conversion“

Energieerhaltung



Impulserhaltung

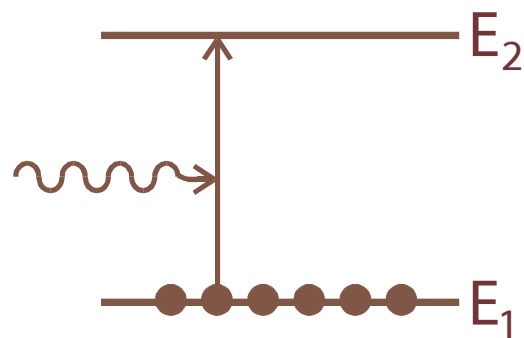
mit $n = n(\omega)$ (Phasenanpassung)



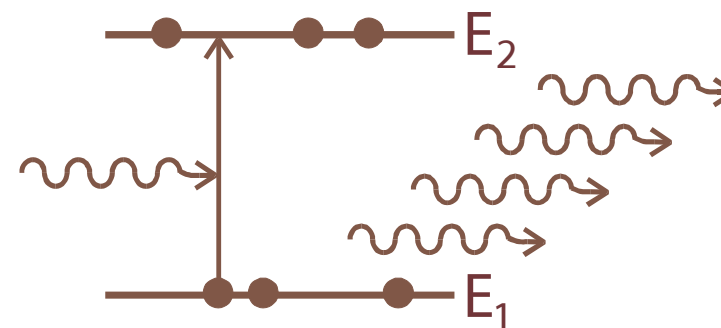
Sättigungsprozesse

z.B. sättigbare Absorption

niedrige Intensität



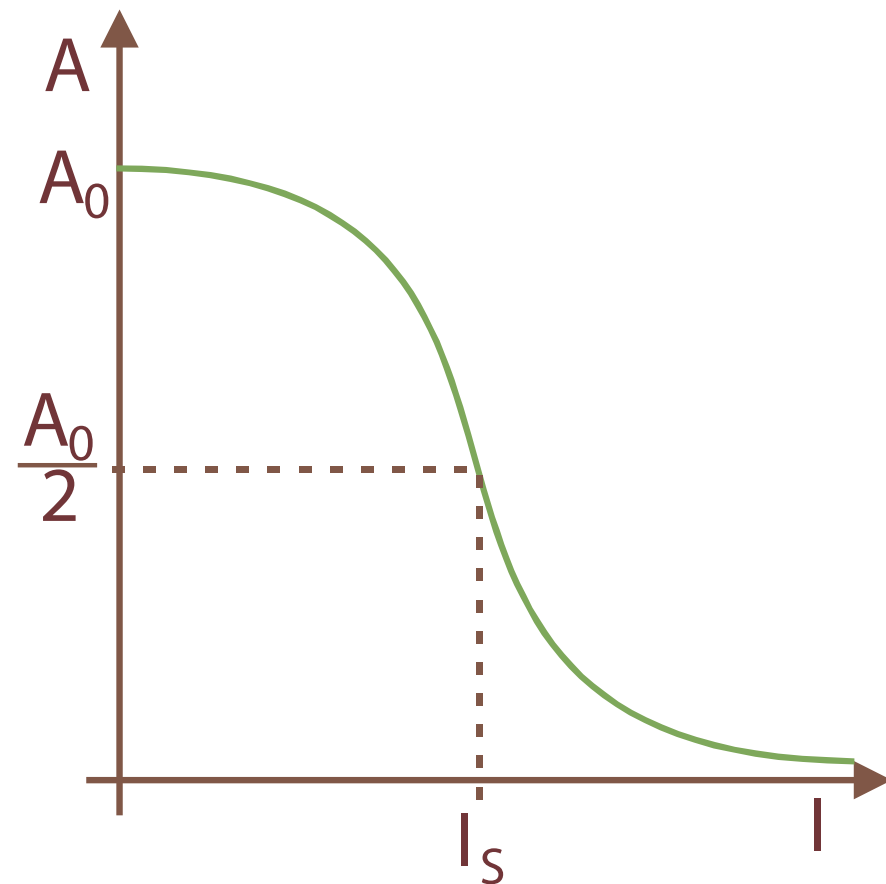
hohe Intensität



Sättigbare Absorption

Empirisch:

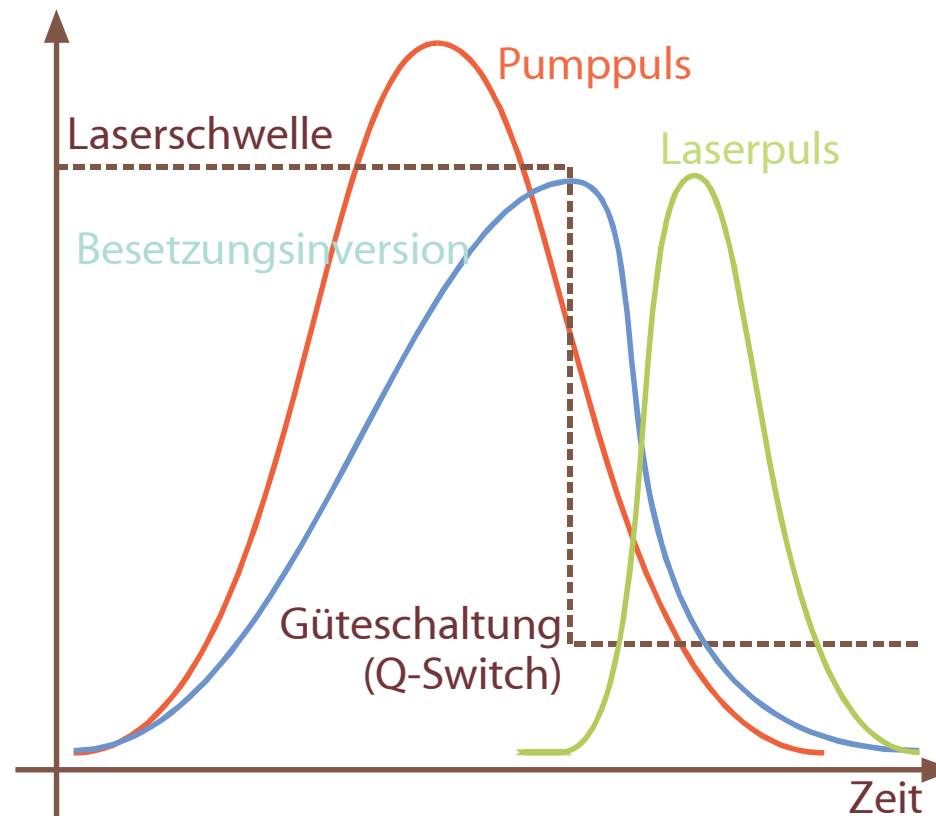
$$A(I) = \frac{A_0}{1 + I/I_s}$$



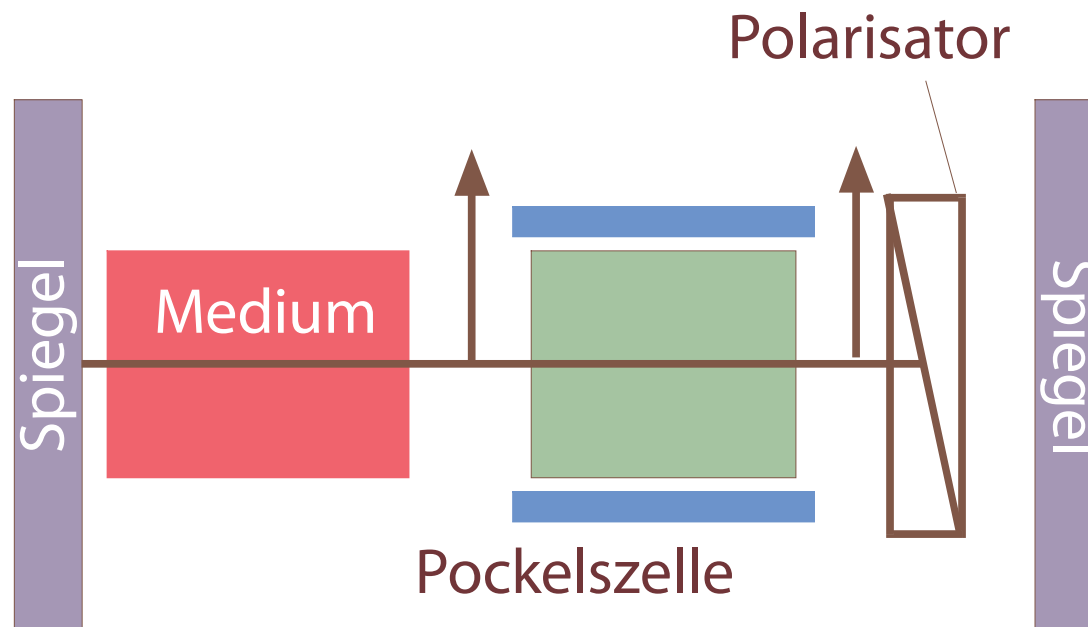
Erzeugung von Laserpulsen

- Güteschaltung des Resonators (Q-Switch)
→ ns -, ps - Pulse
- aktive/passive Modenkopplung (mode locking)
→ ps -, fs - Pulse

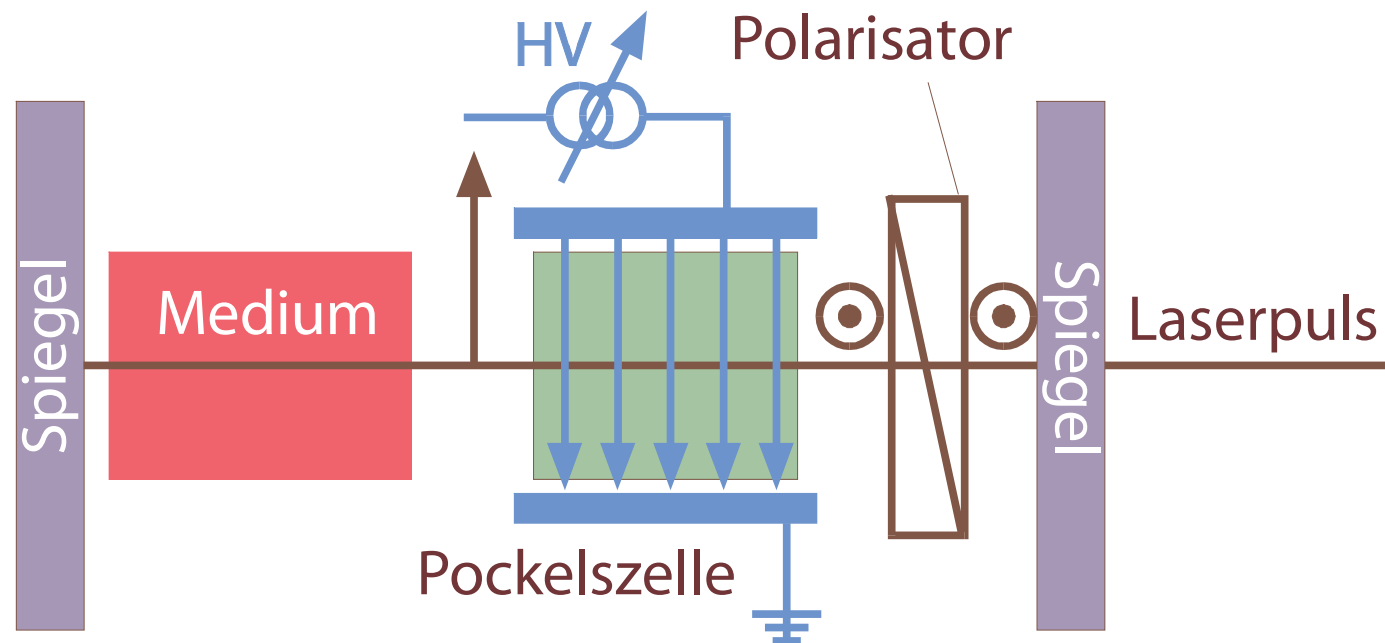
Güteschaltung (Q-Switch)



Güteschaltung mit Pockelszelle

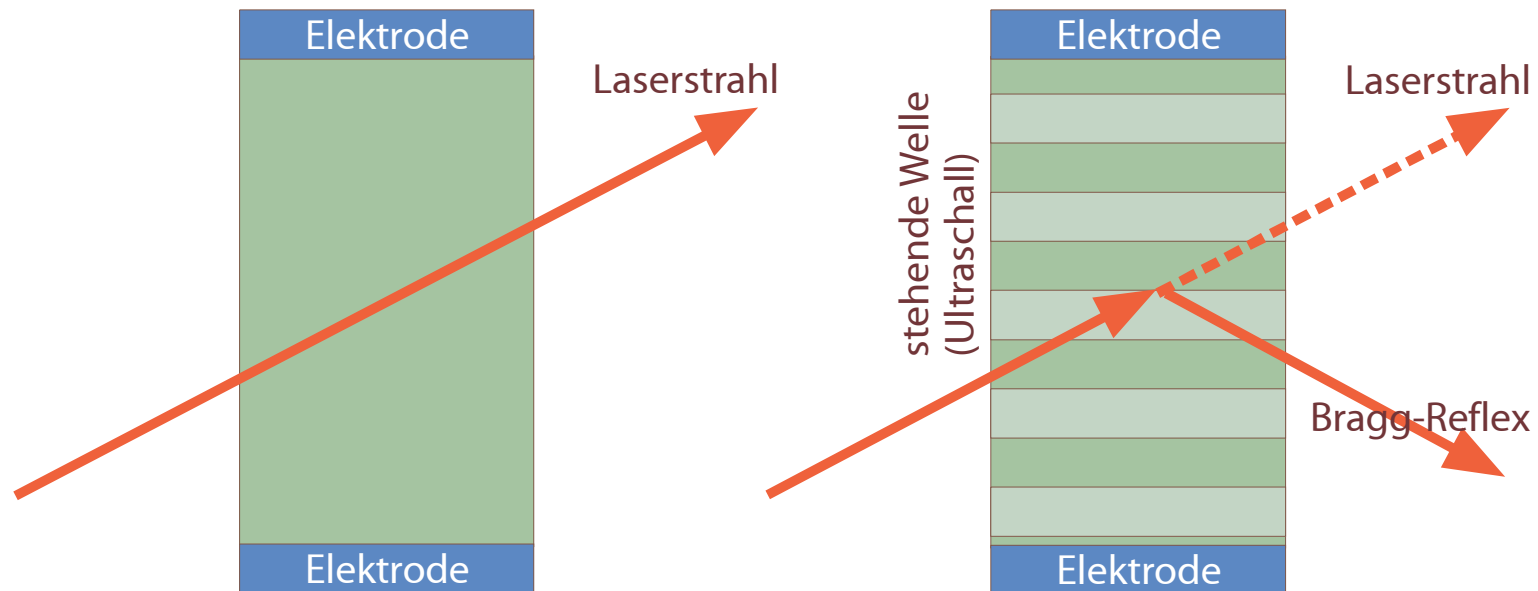


Güteschaltung mit Pockelszelle



Güteschaltung mit AO-Schalter

Akusto-Optischer-Schalter

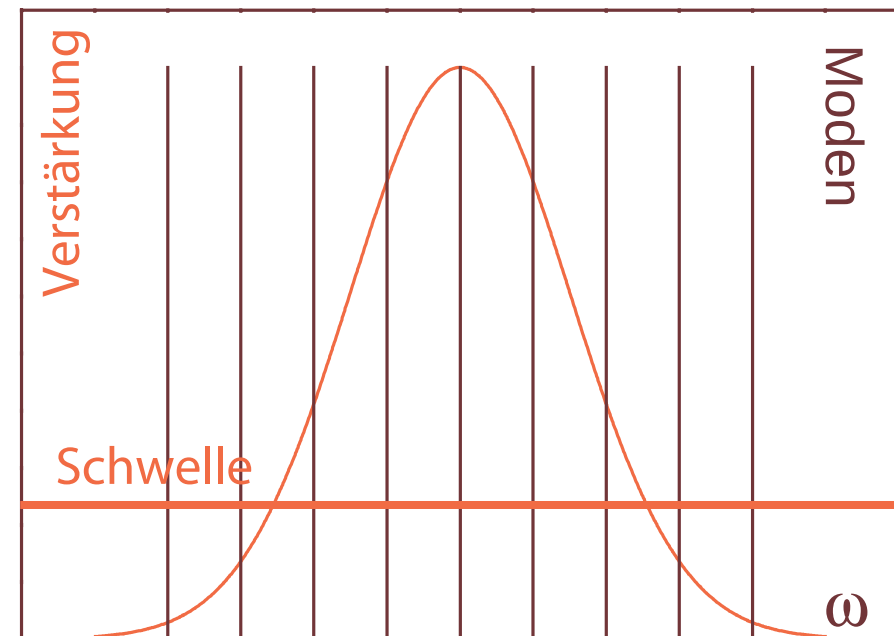


Modenkopplung

Mehrere (viele)
Moden innerhalb des
Verstärkungsprofils



Laserbetrieb in diesen
Moden möglich



Modenkopplung

Überlagerung

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 \cdot \sum_{j=-\infty}^{\infty} \underbrace{f(\omega_0 + j \cdot \Delta\omega)}_{\text{Amplitude}} \cdot \exp\{i[\underbrace{\vec{k}_j \vec{r}}_{\text{Modenfrequenz}} - \underbrace{(\omega_0 + j \cdot \Delta\omega)t - \varphi_j}_{\text{Phase}}]\}$$

zufällige Phasenbeziehung $\Leftrightarrow$

φ_j statistisch verteilt



destruktive Interferenz

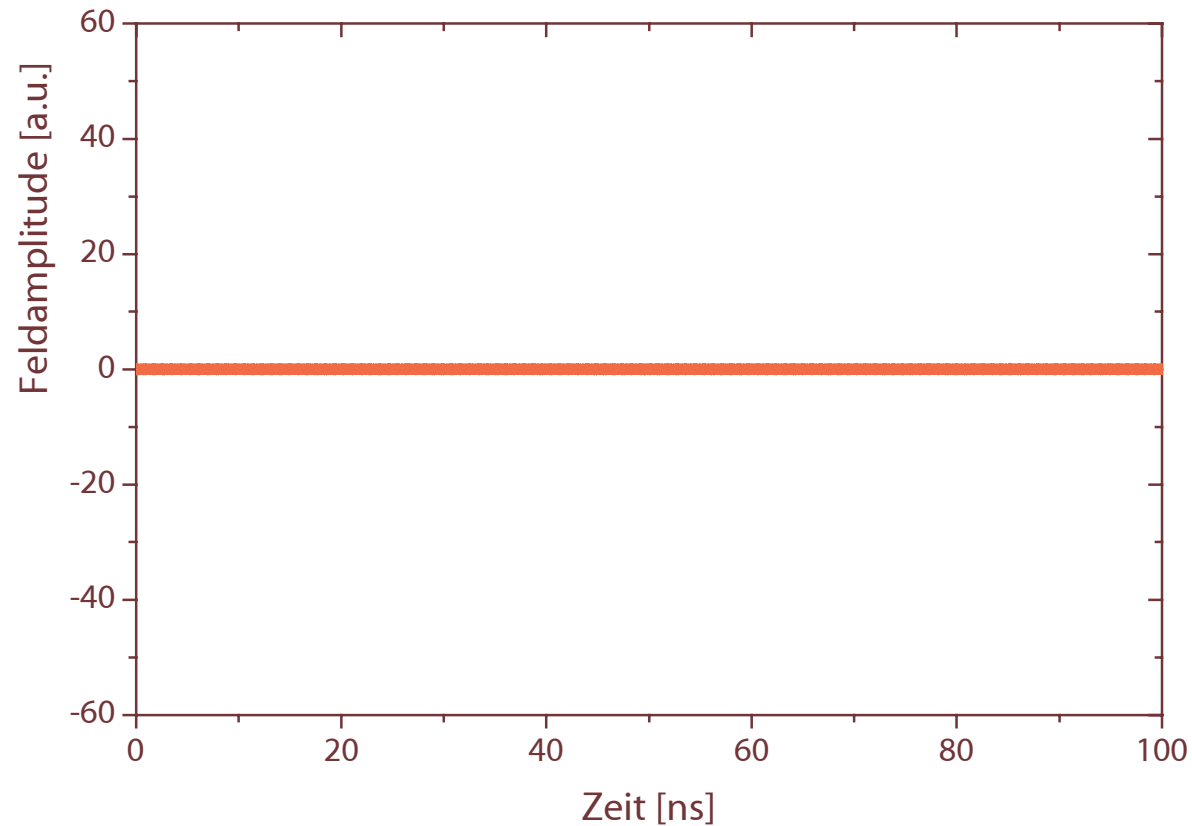
feste Phasenbeziehung

φ_j konstant



konstruktive Interferenz

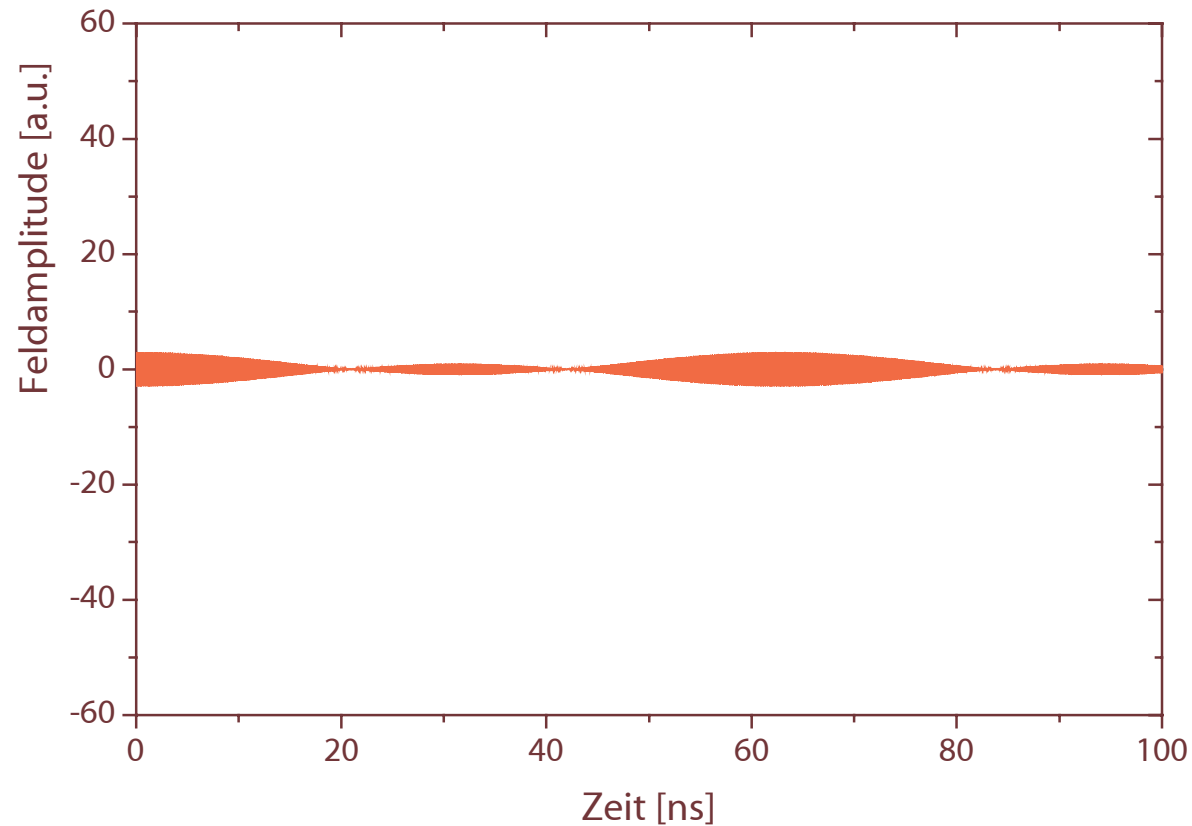
Modenkopplung



1 Mode

$$\omega_0 = 10^{15} \text{ s}^{-1}$$

Modenkopplung

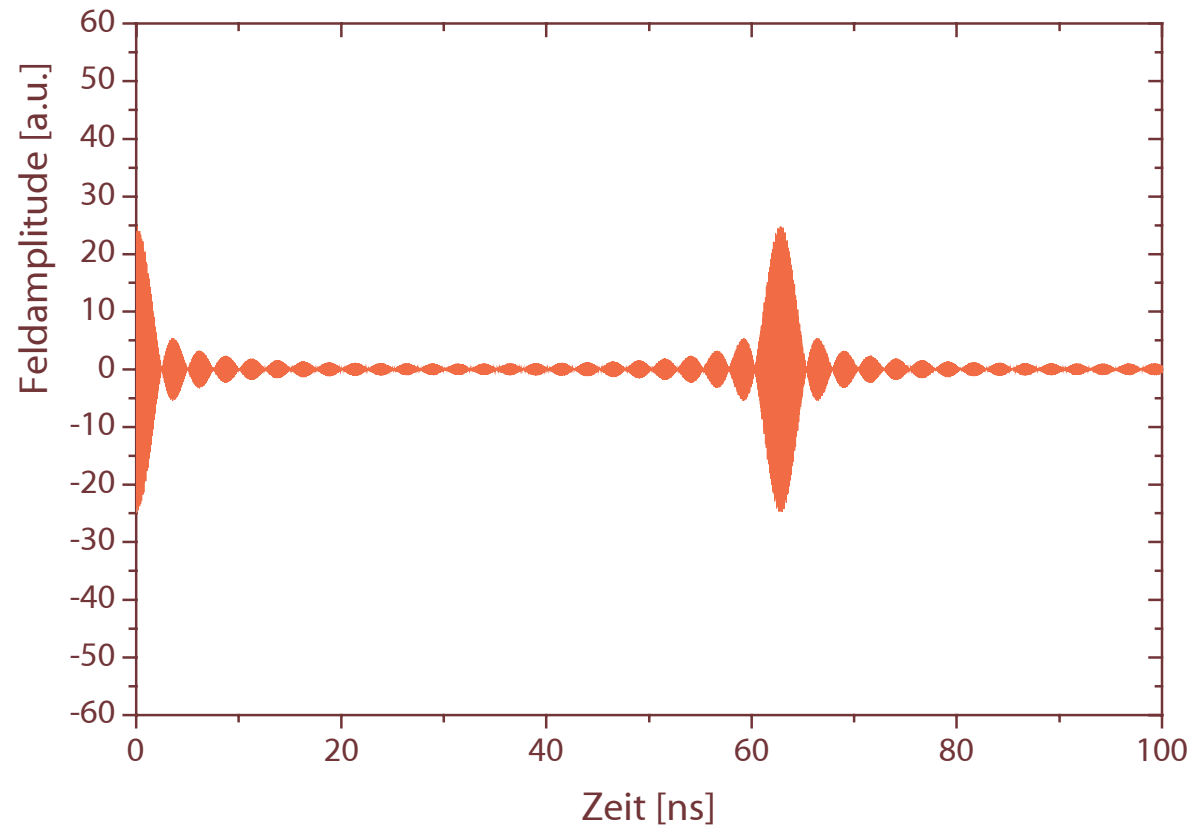


3 Moden

$$\omega_0 = 10^{15} \text{ s}^{-1}$$

$$\Delta\omega = 10^8 \text{ s}^{-1}$$

Modenkopplung

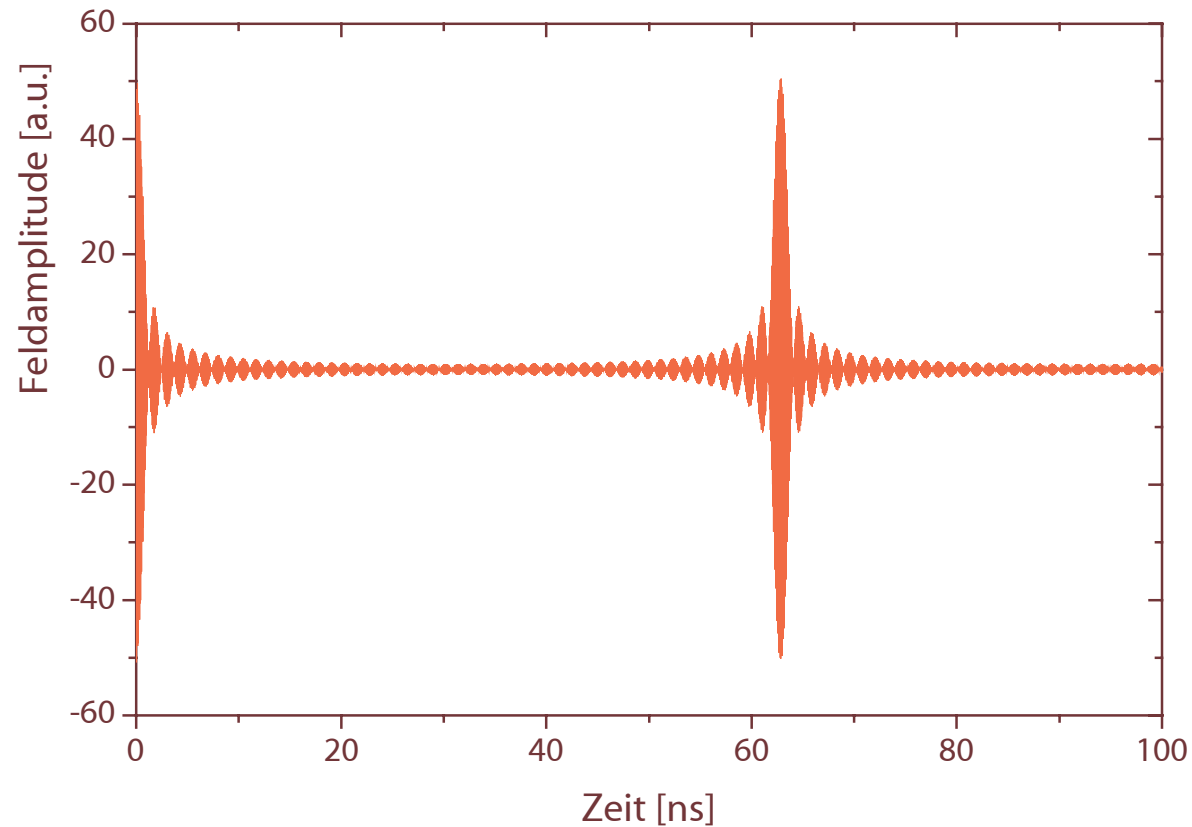


25 Moden

$$\omega_0 = 10^{15} \text{ s}^{-1}$$

$$\Delta\omega = 10^8 \text{ s}^{-1}$$

Modenkopplung



51 Moden

$$\omega_0 = 10^{15} \text{ s}^{-1}$$

$$\Delta\omega = 10^8 \text{ s}^{-1}$$

Modenkopplung

Abstand der Pulse

$$T = 2L / c = 1 / \Delta \nu = 2\pi / \Delta \omega_{\text{Mode}}$$

Breite der Pulse

$$\Delta T = 1 / \delta \nu = 2\pi / \Delta \omega_{\text{Gain}}$$

Aktive Modenkopplung

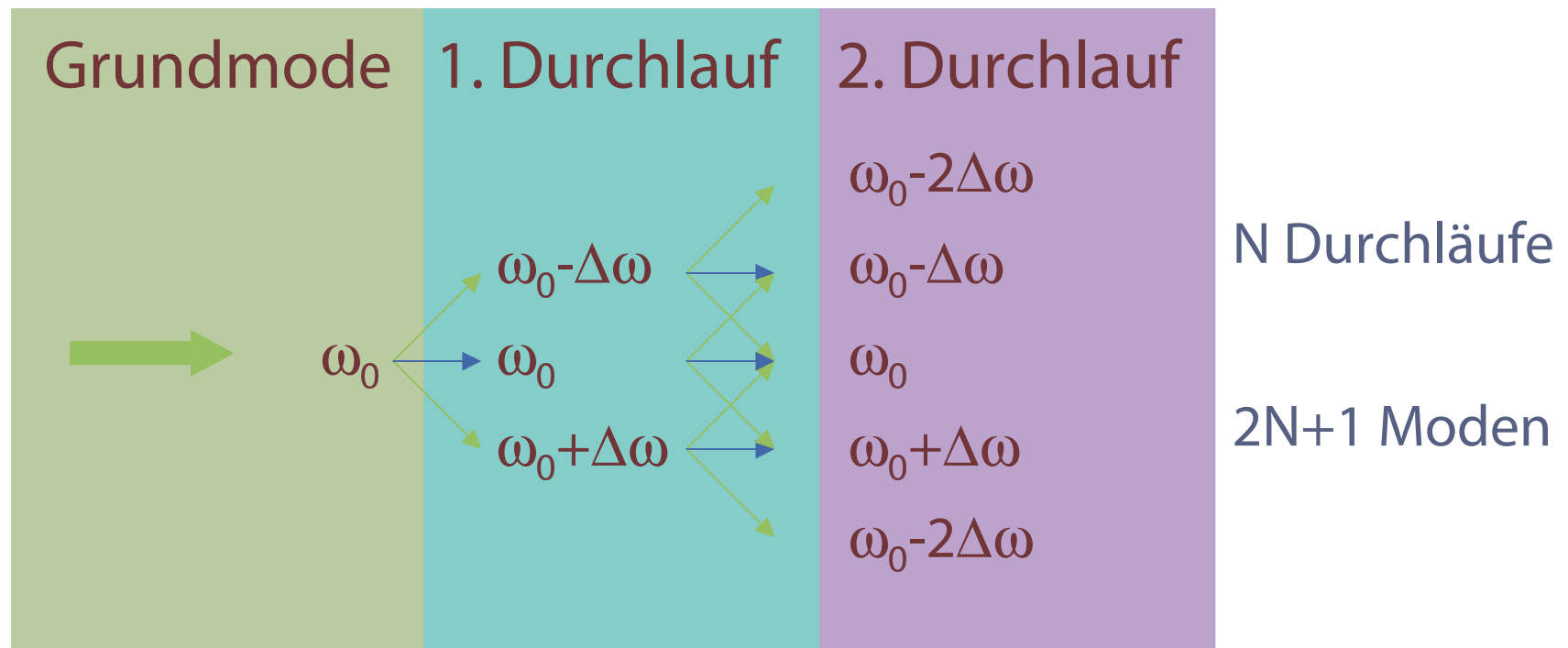
Moduliere Licht der Frequenz ω_0 mit ω' :
(z.B. mit Akusto-Optischem-Modulator)

$$\cos(\omega_0 t) \cdot \cos(\omega' t) = \frac{1}{2} \{ \cos[(\omega_0 - \omega')t] + \cos[(\omega_0 + \omega')t] \}$$

Wähle $\omega' = \Delta\omega \Rightarrow$ Besetzung benachbarter Moden

Aktive Modenkopplung

Modulation



Passive Modenkopplung

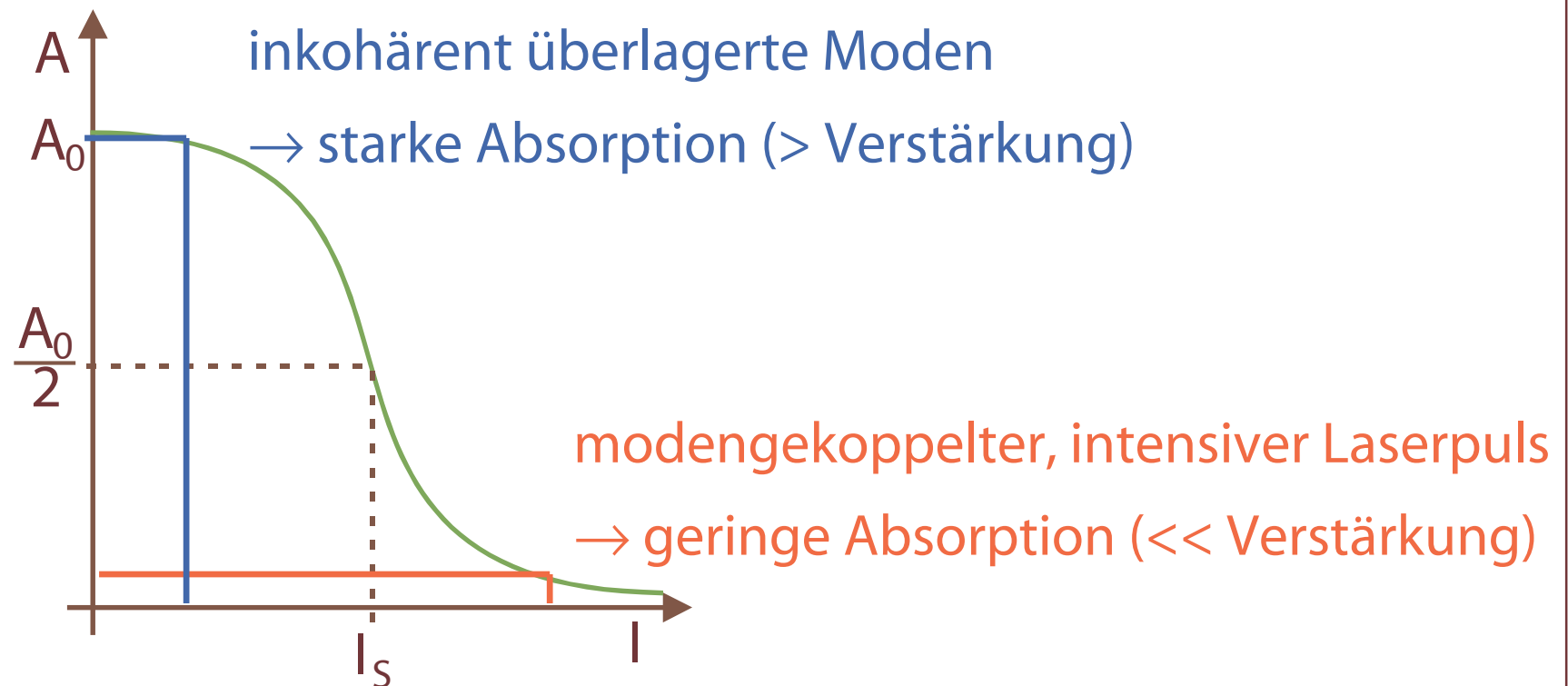
Zufälliger Aufbau einer Modenkopplung
⇒ selektive Verstärkung des Pulses



sättigbarer Absorber

Passive Modenkopplung

sättigbarer Absorber



Vermessung kurzer Laserpulse

indirekte Methoden

- Spektrale Vermessung
→ alle Pulslängen

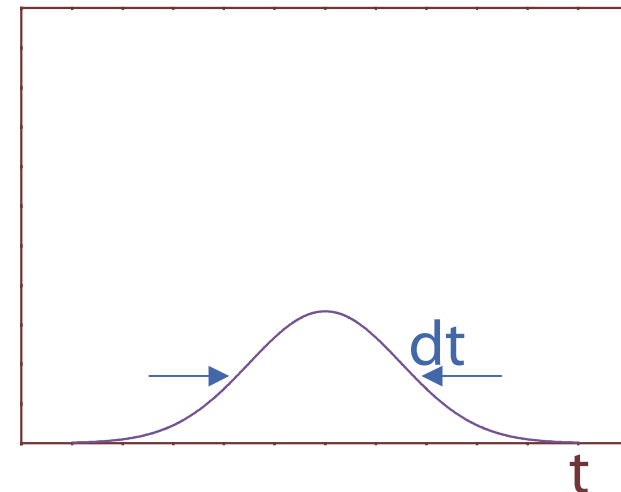
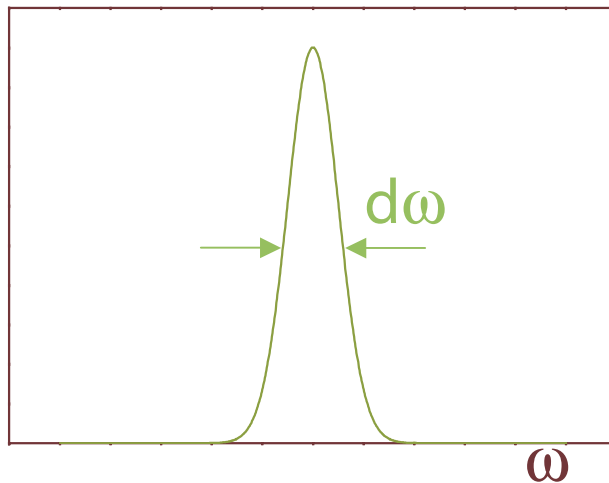
direkte Methoden

- Streak-Kamera
→ ps - , ns - Pulse
- Autokorrelation
→ ps - , fs - Pulse

Spektrale Vermessung

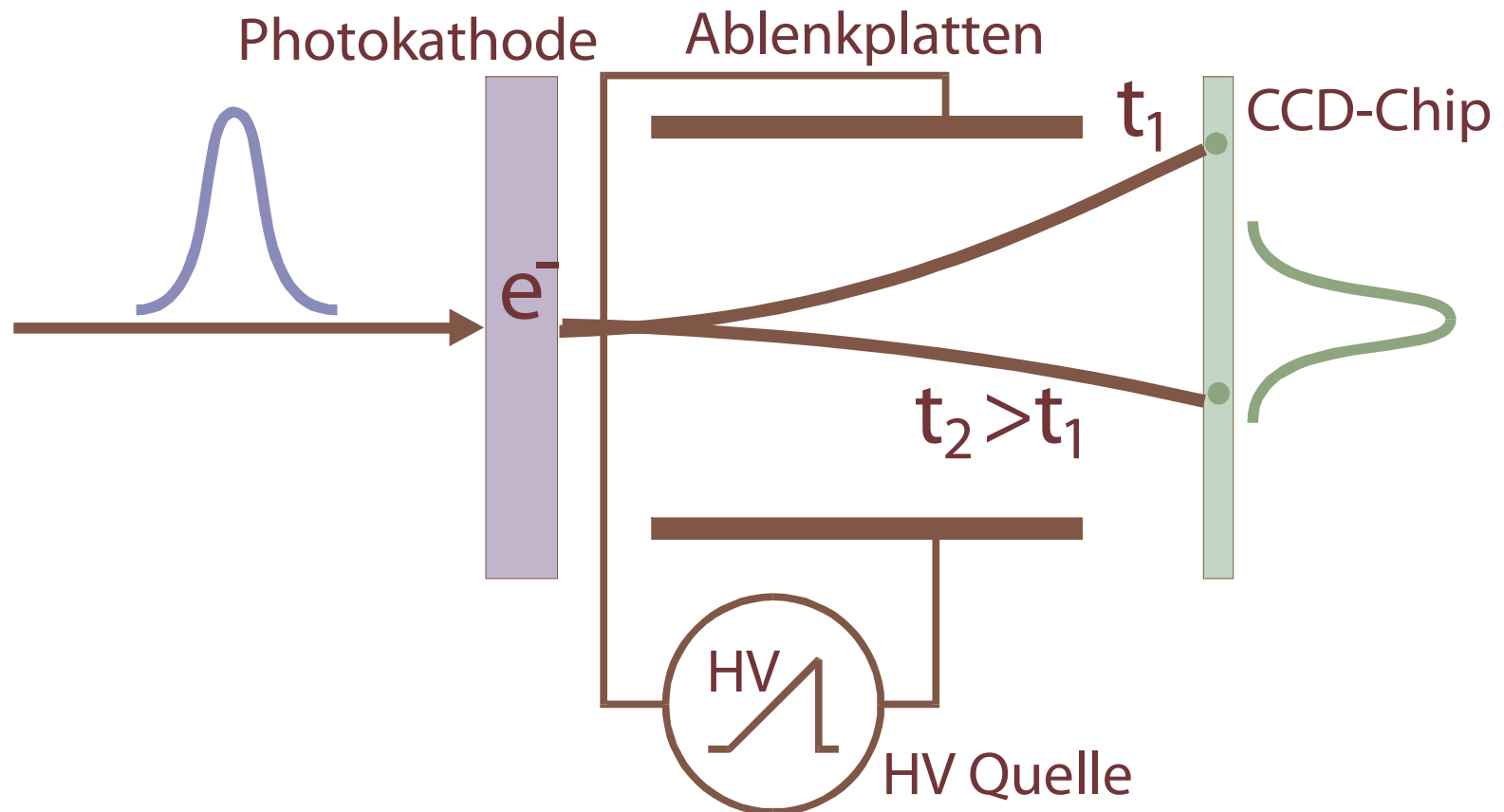
Fouriertransformation

Frequenzdomaine $\Leftrightarrow$ Zeitdomaine



spektrale Breite $\Leftrightarrow$ Pulslänge

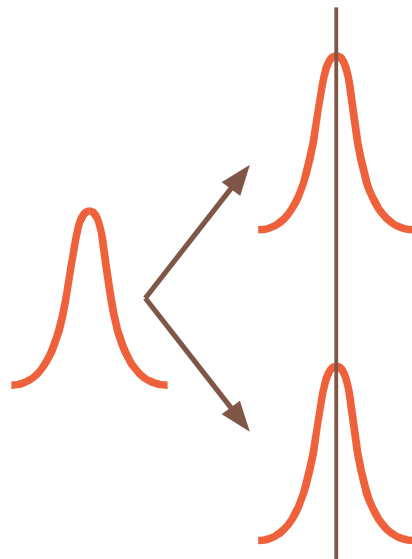
Streak - Kamera



Autokorrelation

Autokorrelation = „mit sich selbst in Relation setzen“

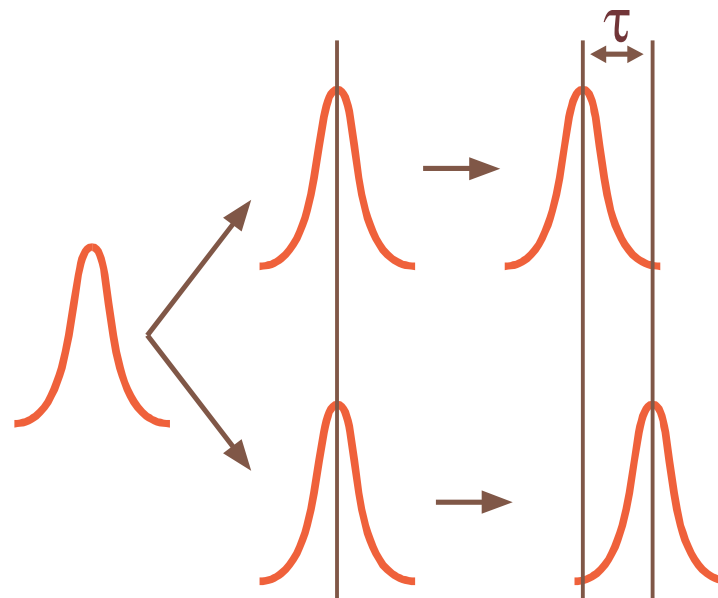
- Aufspaltung des Pulses in 2 Teilpulse



Autokorrelation

Autokorrelation = „mit sich selbst in Relation setzen“

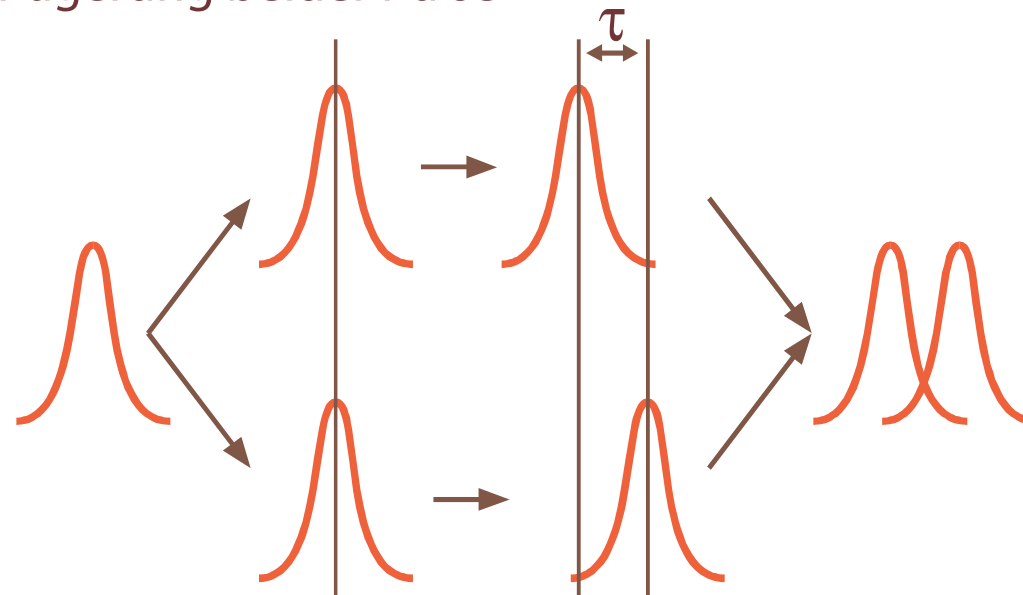
- Aufspaltung des Pulses in 2 Teilpulse
- Verzögern eines Teilpulses



Autokorrelation

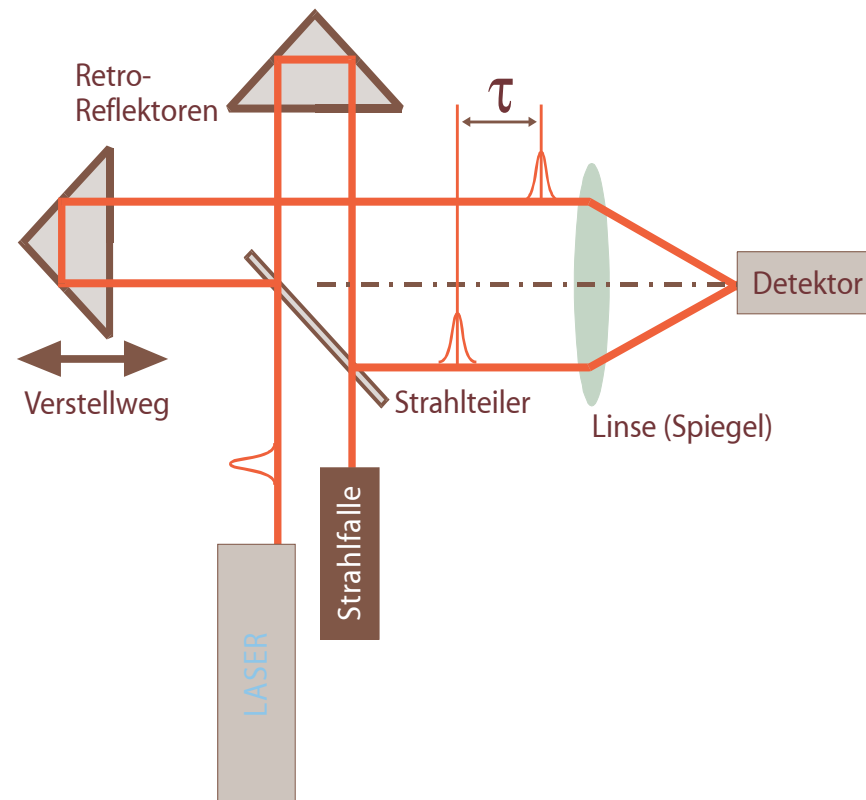
Autokorrelation = „mit sich selbst in Relation setzen“

- Aufspaltung des Pulses in 2 Teilpulse
- Verzögern eines Teilpulses
- Überlagerung beider Pulse



Autokorrelation

Messaufbau



$$\tau = \frac{\Delta s}{c}$$

Autokorrelation

1. Ordnung

$$S^{(1)} = \langle I(t, \tau) \rangle = \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} [I(t) + I(t + \tau)] dt$$

$$= \mathcal{E}_0 \left[\langle E_0^2 \rangle + \underbrace{\frac{1}{T} \int_{-T}^{+T} E_0(t) \cdot E_0(t + \tau) \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos \omega(t + \tau) dt}_{\text{Autokorrelationsfunktion 1. Ordnung}} \right]$$

mit $T \rightarrow \infty$

$$G^{(1)}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{E(t) \cdot E(t + \tau)}{E^2(t)} dt = \frac{\langle E(t) \cdot E(t + \tau) \rangle}{\langle E^2(t) \rangle}$$

Autokorrelationsfunktion 1. Ordnung

Autokorrelation

1. Ordnung: $G^{(1)}(\tau)$

- cw-Laser (monochromatisch, λ)
 - $G^{(1)}(\tau)$ periodisch mit $\lambda/(2c)$
- Puls mit Dauer ΔT (und Frequenzbreite $\Delta\omega \approx 1/\Delta T$)
 - $T \gg \tau (\leq \Delta T)$
 - $\Rightarrow G^{(1)}(\tau)$ ($S^{(1)}$) unabhängig von Verzögerung τ

keine Information über Pulsform $I(t)$

Autokorrelation

brauchen (mindestens) 2. Ordnung: $G^{(2)}(\tau)$

$$S^{(2)}(2\omega, \tau) = \frac{A}{T} \int_{-T}^{+T} [I(t) + I(t + \tau)]^2 dt$$

bzw.

$$S^{(2)}(2\omega, \tau) = A \cdot [1 + 2G^{(2)}(\tau)]$$

mit

$$G^{(2)}(\tau) = \frac{\langle I(t) \cdot I(t + \tau) \rangle}{\langle I^2(t) \rangle}$$

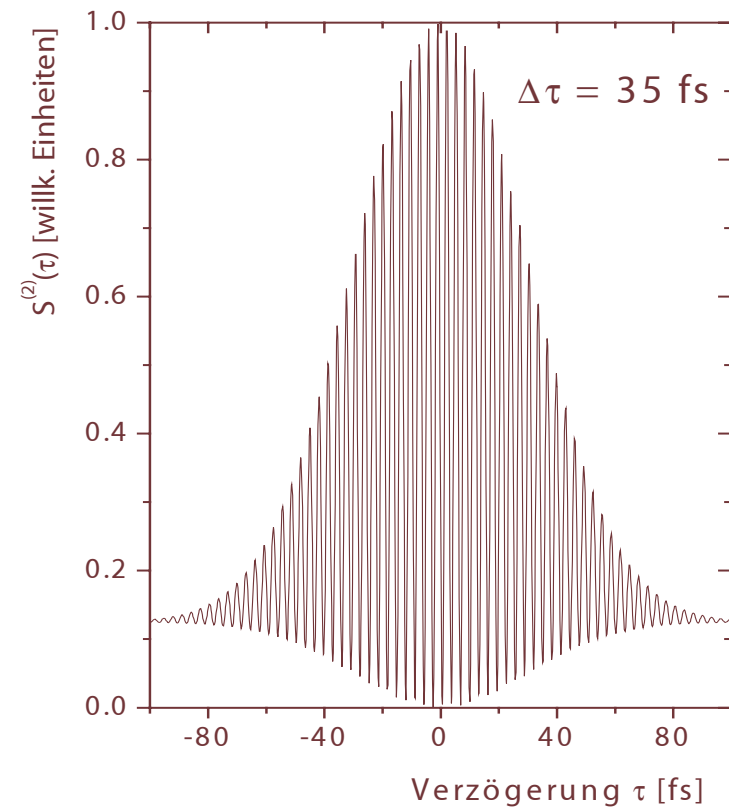
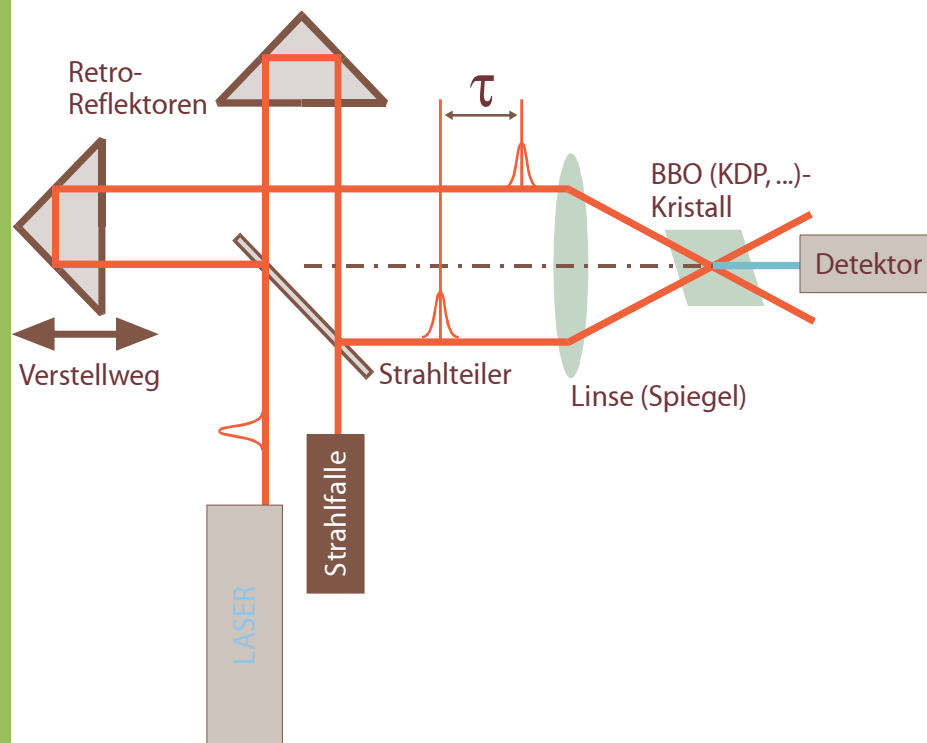
Autokorrelation

Eigenschaften

- $\tau = 0$: $S^{(2)}(2\omega, \tau) = 3A$ (Maximum)
- $\tau \gg \Delta T$: $S^{(2)}(2\omega, \tau) = A$ (Untergrund)
- Information über Pulsdauer ΔT
- keine Information über Pulsform
→ höhere Ordnungen ($n > 2$)

Autokorrelation

Messaufbau für Autokorrelation 2. Ordnung

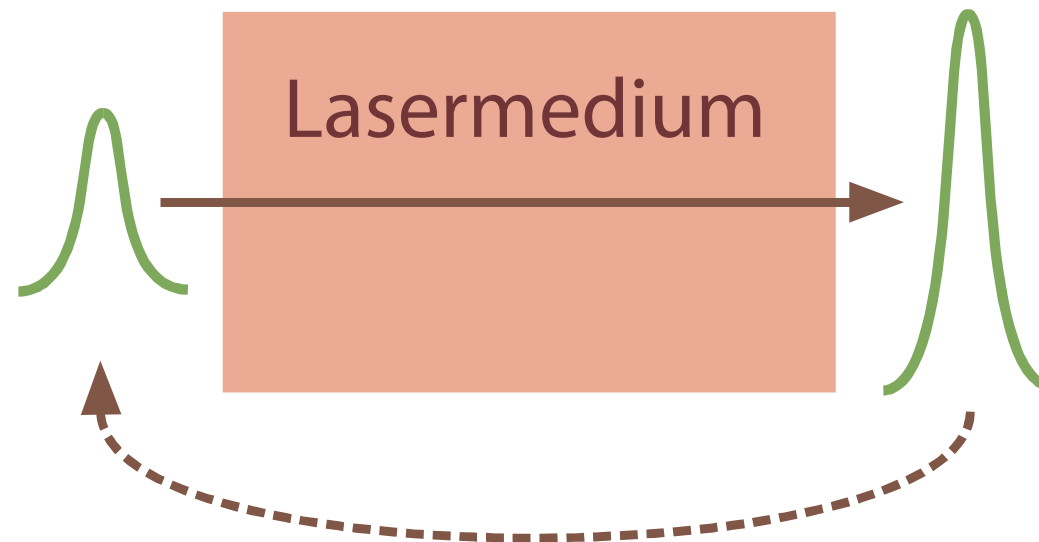


Modifikation von Laserpulsen

- Verstärkung
- Kompression / Dekompression

Verstärkung von Laserpulsen

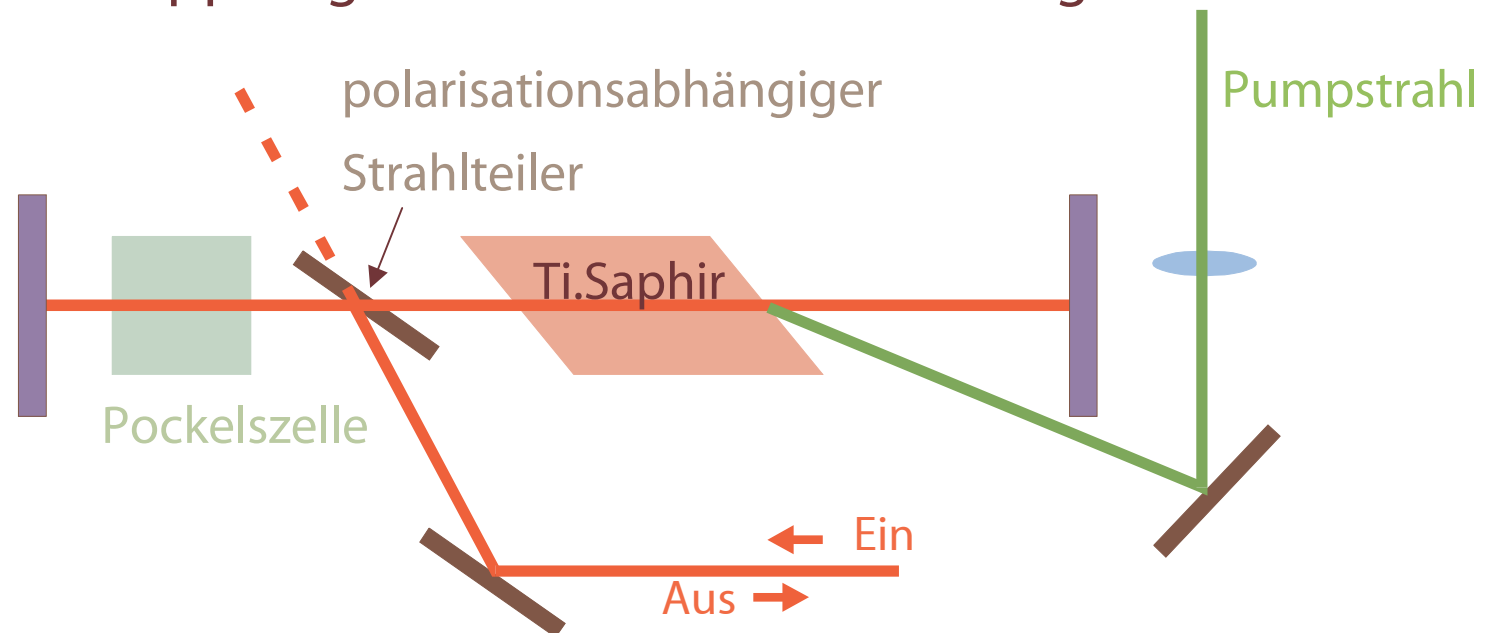
(mehrfacher) Durchgang durch Lasermedium



Verstärkung von Laserpulsen

z.B. regenerativer Verstärker

- Puls wird in Laserresonator eingekoppelt und verstärkt
- Auskopplung bei maximaler Verstärkung



Verstärkung von Laserpulsen

Problem:

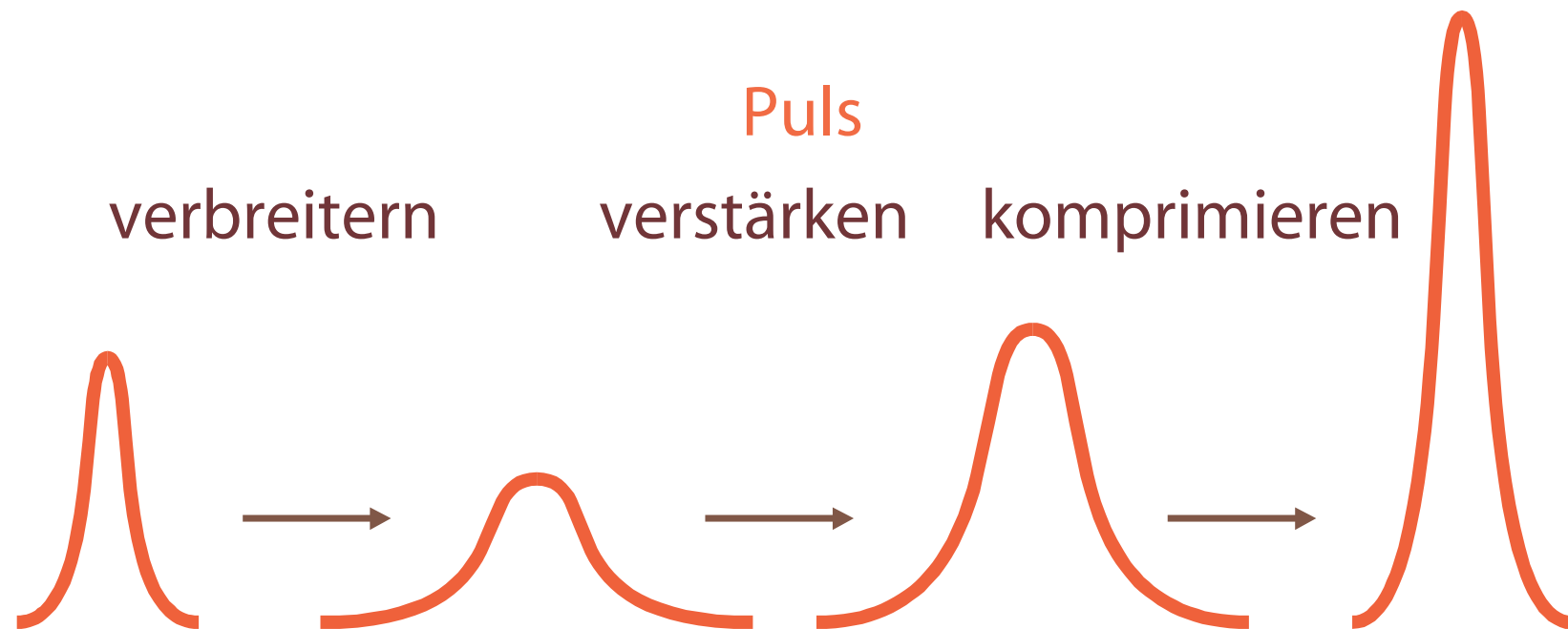
starke Pulse



Energiedichte oberhalb Zerstörungsschwelle

Verstärkung von Laserpulsen

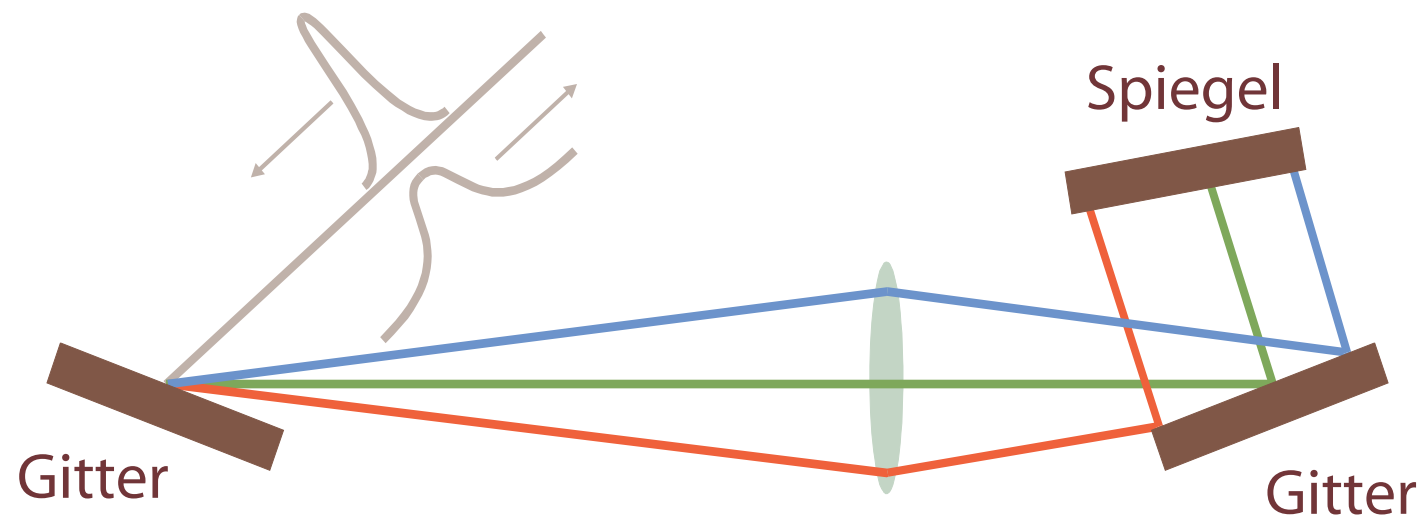
Lösung: „chirped pulsed amplification (CPA)“



Dekomprimieren (Stretchen) von Pulsen

- 1. dispersives Element (Gitter, Prisma)
 - räumliche Trennung der Frequenzanteile
- Verzögerungsstrecke
 - unterschiedliche Weglängen für verschieden Frequenzanteile
- 2. dispersives Element
 - Zusammenführung der räumlich getrennten Frequenzanteile

Dekomprimieren (Stretchen) von Pulsen

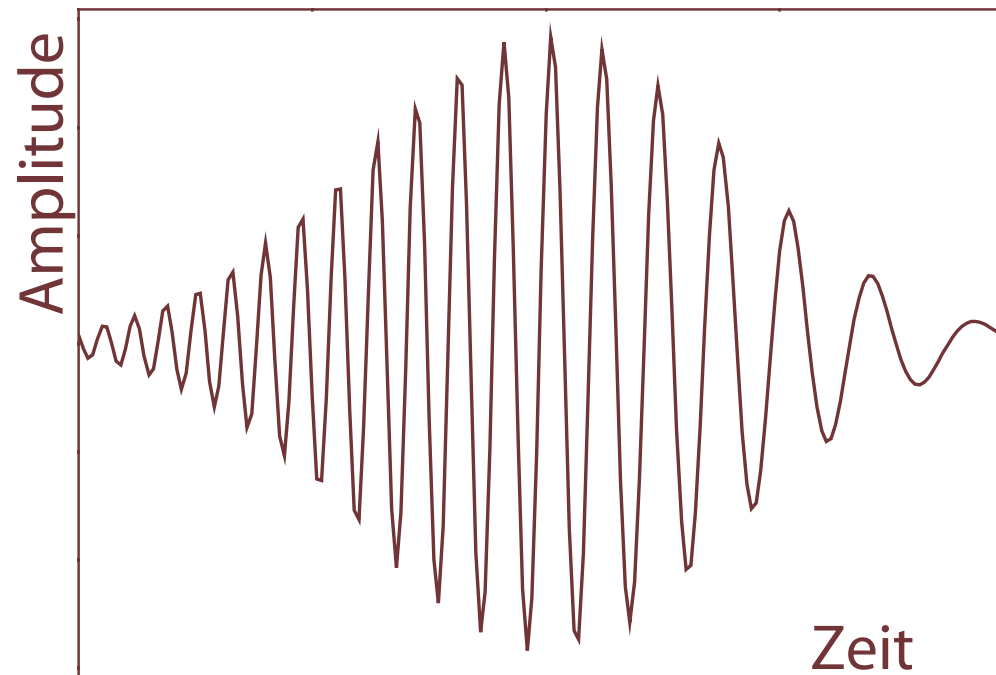


Dekomprimieren (Stretchen) von Pulsen

niedrige Frequenzen langsamer als hohe



„CHIRP“



Komprimieren von Pulsen

wie Dekomprimieren – nur umgekehrt ...

