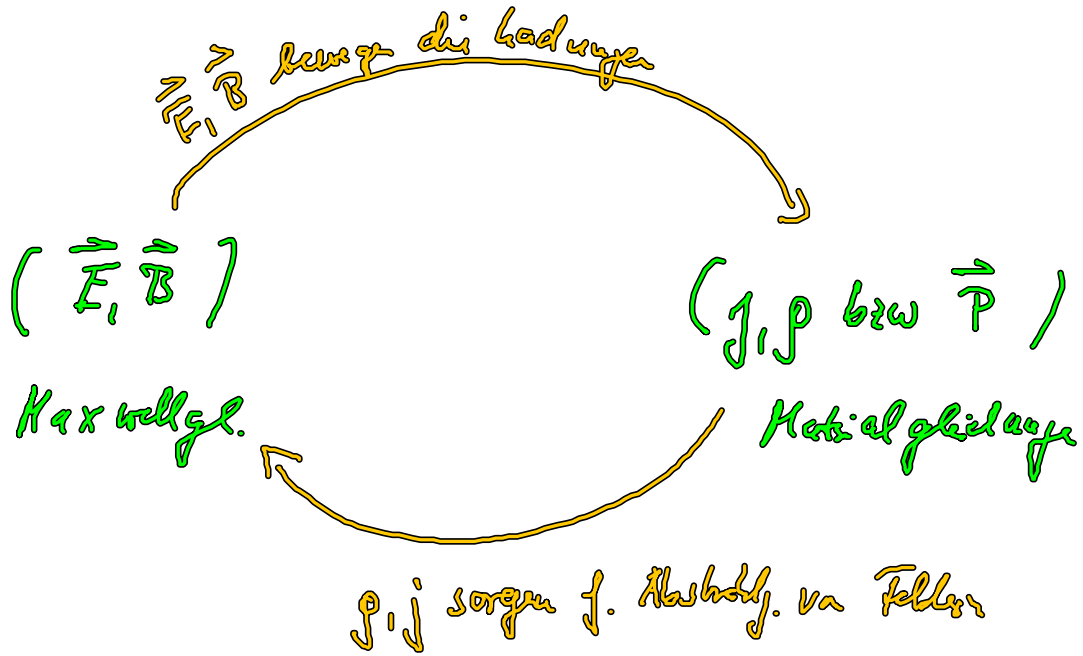


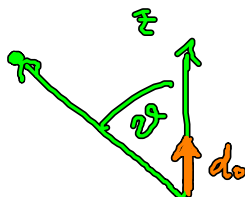
# Zusammenfassung der VL



Ziel ist die Bestimmung dieser Dynamik durch Selbstkonsistenz k Lösung von  $\text{Dichteanzahngleichg.}$  und Wellengleichungen f. Langwelle Amplitude  $\vec{E}$

## a) Welle im Vakuum

- an ED war Dipol bekannt:  $\vec{E}(\vec{r}, t) = E_0 \frac{1}{r^2} d_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} (kr - \omega t) \vec{e}_z$



$k = \frac{\omega}{c}$

Kugelwelle

- Gaußsche Strahl:  $\square \vec{E} = 0$  in paraxialer Approximation  
 (z: Ausbreitungsrichtung,  
 $x, y$ : Längs zur Krümmung)  
 $\ll \lambda$

$$\left( \partial_z + \frac{1}{c} \partial_t + \frac{1}{2ik_z} \Delta_{\perp} \right) \tilde{E}(z, \vec{r}_{\perp}, t) = 0$$

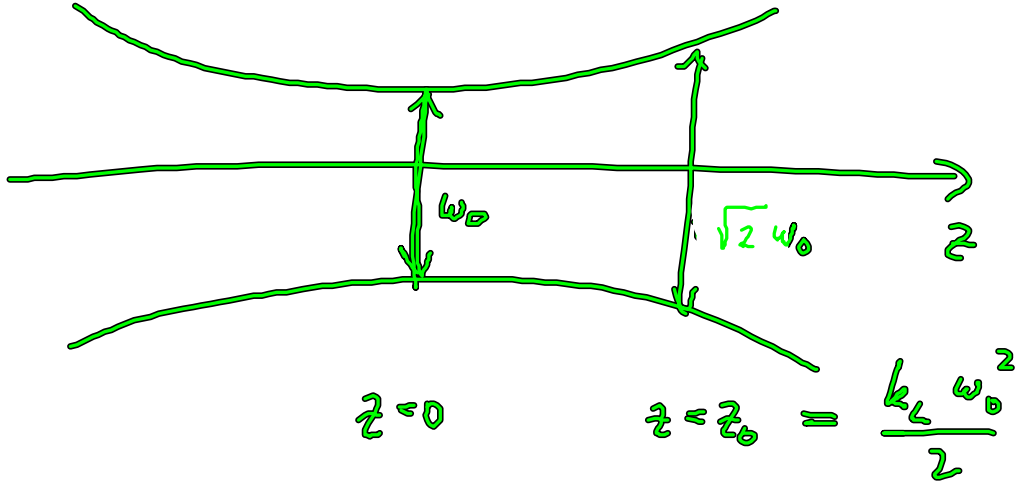
beschreibt Felder die sich entlang z ausbreiten

mit  $e^{ik_z z}$  - Ansatz

Umkehrweg bzgl. von Gaußstrahl  $\gamma = z$

$$|\tilde{E}|^2 = \frac{|\tilde{E}_0|^2}{1 + (\gamma/z_0)^2} e^{-\frac{2r_{\perp}^2}{w_0^2 (1 + \gamma^2/z_0^2)}}$$

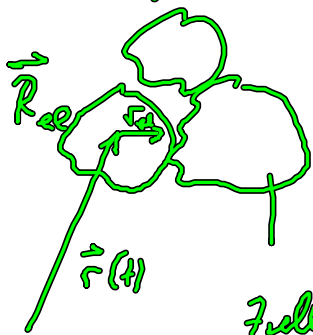
bzgl.  $r_{\perp}$  findet Aufweitung  
 mit zunehmendem  $z = \gamma > 0$  statt



wird also immer fortgeführt bei  $z_0$ .  
 dann kann Stahl bestimmt werden

## b) Beschreibung des Materie

- Einteilung des Stroms  $j$  in Maxwellst. auftritt im Raum



Zelle  $> \dot{A}$  (atomar Abtand)  
 $< \lambda$  (500nm)

$$\vec{j} = \vec{j}_u + \dot{\vec{p}}$$

$\uparrow$                        $\uparrow$

Multipolentwicklung  
zwischen der Zelle

Dipolnäherung

$$\vec{P} = q \vec{r}_{el}(t) \delta(\vec{r} - \vec{R}_{el})$$

$$\vec{j}_m = q \dot{\vec{R}}_{el}(t) \delta(\vec{r} - \vec{R}_{el}(t))$$

## Quantisierung

$$H = H_0 + H_{int}$$

↑  
atomarer  
Hamiltonian  
(H-Atom)

↑  
WW des Elektrons  
und Licht

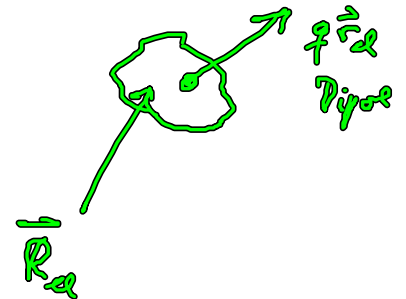
$$H_{int} = -q \vec{r}_{el}(t) \cdot \vec{E}(\vec{r}_{el}, t)$$

Dipolnäherung:

beobachtbare Größe:

$$\langle \vec{P} \rangle_{qm} = \langle \psi(\vec{r}_{el}, t) | q \vec{r}_{el} | \psi(\vec{r}_{el}, t) \rangle \delta(\vec{r} - \vec{R}_{el})$$

Erwartungswert der Dipolnäherung,  
weil das in die Maxwellgl. eingeht



$$\langle P \rangle = \int \underline{\underline{r}}(\vec{r}, t)$$

brauche dazu:

$$|\psi(\vec{r}, t)\rangle = ? \quad i\hbar \partial_t |\psi\rangle = H |\psi\rangle$$

$$\text{Ansatz: } \sum_n c_n(t) |u\rangle = |\psi\rangle$$

$$H_0 |u\rangle = \epsilon_u |u\rangle$$

$$\vec{P} = \sum_{\ell, n} \vec{d}_{\ell n} \underbrace{p_{\ell n}(t)}_{\text{Dichtematrix } \underbrace{c_\ell^*(t) c_n(t)}_{p_{\ell n}}}} \delta(\vec{r} - \vec{R}_{\ell n})$$

bestimmt durch Dichtematrix

$$\dot{p}_{\ell n} = i(\omega_\ell - \omega_n) p_{\ell n} - i \sum_k (\Omega_{\ell k}^* p_{kn} - \Omega_{kn} p_{\ell k})$$

+ Phase relation  $(-p_{\ell n} p_{\ell n})$

+ Energie relation  $-\sum_n (p_n - p_n^0)$

• linear Optik:  $\vec{P}(\vec{r}, \omega) = \epsilon_0 \chi(\omega, \vec{r}) \vec{E}(\vec{r}, \omega)$

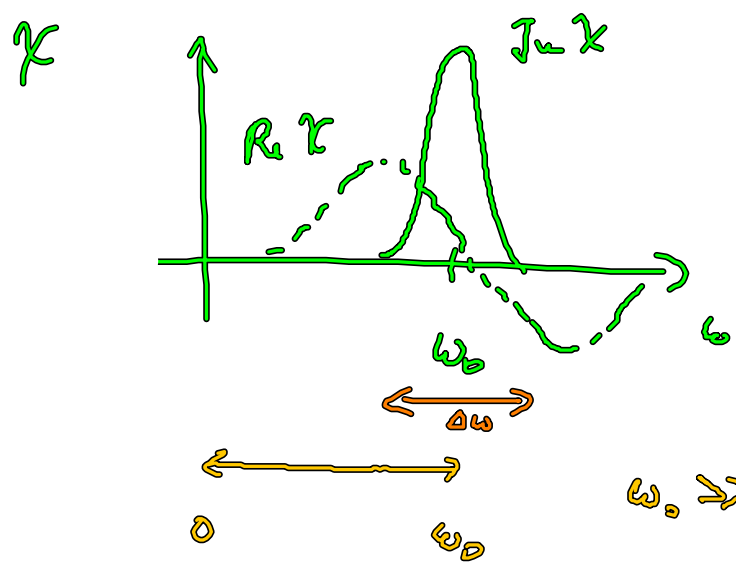
Dicht. v. ZNS  
↓

↑  
Suszeptibilität

$$\chi(\omega, \tau) = \frac{(d_{12})^2 u_0 \hat{A}}{\hbar \epsilon_0} \frac{(\rho_{11} - \rho_{22})}{\rho_{11}^2 + (\omega - \omega_0)^2}$$

Zweiwira  $\nearrow$  Dipolmoment  $\nearrow$  Besetzung, stellt Vorzeichen von  $\omega_0 = \omega_2 - \omega_1$

(Absorption / Gain)



$\omega_0 \Rightarrow \Delta\omega$  RWA

c) Nichtlineare Antwort

• Resonanzprozesse:  $\omega_2$  ?

Zweiwira system:

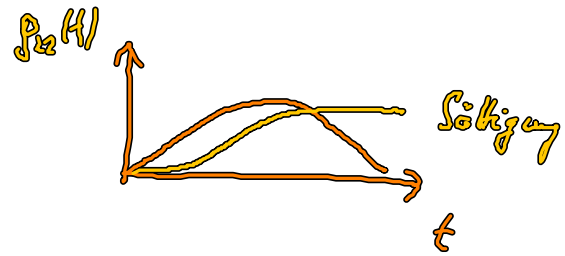
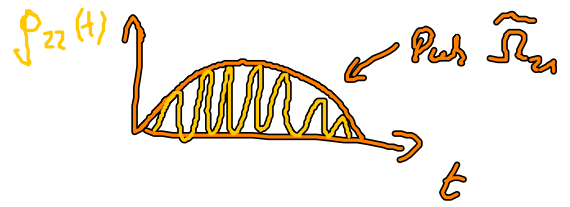
$$\partial_t \tilde{\rho}_{11} = i \tilde{S}_{12} \tilde{\rho}_{11} - \frac{i}{2} \tilde{S}_{21} (\rho_{11} - \rho_{22}) \hat{A} + \text{andere Besetzung } \rho_{ii}$$

für zweiwira syst. 3 Lösungen:

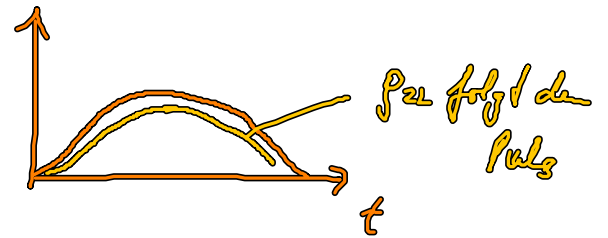
(i)  $\tilde{\omega} \Rightarrow \tilde{\rho}_{11}$   $\Rightarrow$  Population

Ausgang  
 ↓  
 (ii)  $\gamma > \tilde{\Omega} \Rightarrow \uparrow$

Phasenzustand,  
 kein Oszillat.

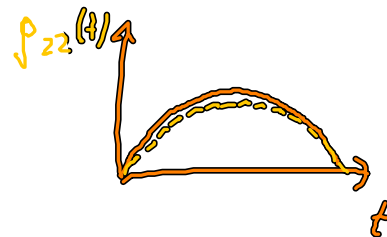


(iii)  $\gamma, \uparrow \Rightarrow \tilde{\Omega}$   
 stationäre Lag.,  
 von Feld verursacht

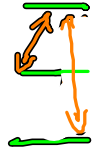


• Near resonance  $\tilde{\Omega} \approx \omega_c$

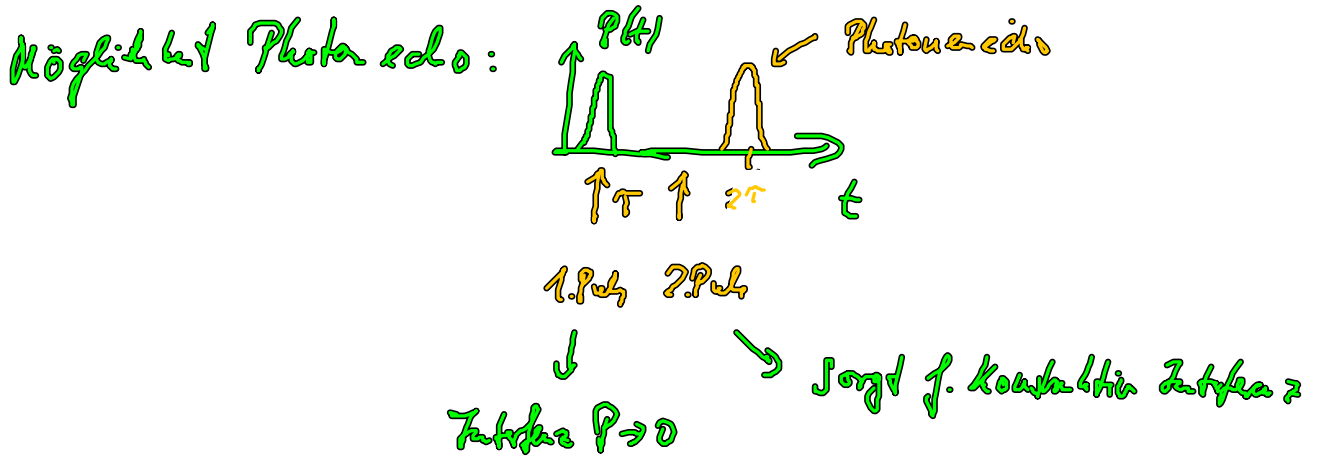
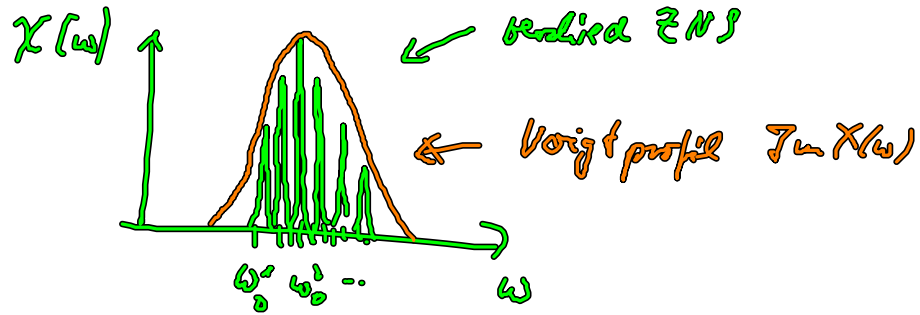
ergibt Kern nichtlinearität  $P_{22} \approx |\tilde{E}|^2 \tilde{E} \quad (|\tilde{\Omega}|^2 \tilde{\Omega})$



Unterschied:  
 $P_{22} \rightarrow$  Resonanz: imaginär  $\Rightarrow$  Absorption  
 $P_{22} \rightarrow$  Nichtres.: reell  $\Rightarrow$  Breitzelleneffekte

- 3 Niveausystem  $\rightarrow$  Quantinterferenz   $n \lambda^4$ -System  
 Langwelliges Licht ( $\frac{m}{s}$ )  
 verschwindende Absorption

- Vielniveausystem: Ausw. v. ZNS mit verschiedenen Übergangsraten



- Nichtresonanzprozesse:
 

$\rightsquigarrow \uparrow \omega_c$	$\overline{\quad}$	$\overline{\quad}$
$\rightsquigarrow \downarrow \omega_c$	$\uparrow \downarrow \omega_c$	$\rightsquigarrow \uparrow \downarrow \rightsquigarrow 2\omega_c \rightsquigarrow$
Zwei-photon- absorption	optisch gleichrichtung	zweite Harmonische

Emission: 
$$j_{\text{opt}}(t) \sim |\tilde{\Sigma}_1(t)|^2 \quad \text{Frequenz} \rightarrow 0$$
  
 optisch fehl-richtig.



$$p_{12}(t) \sim |\tilde{E}_n(t)|^2 \cos(2\omega_0 t) \quad \text{Frequenz } \underline{2\omega_0}$$

↗  
Zwei Harmonische

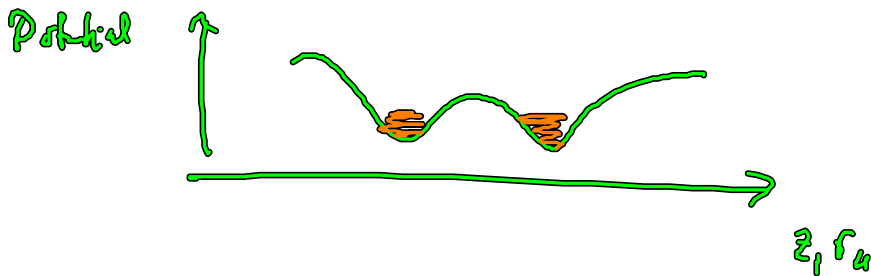
$$\text{Feldstärke } |\vec{E}|^2 \approx |\partial_t p_n|^2$$

Absorption:  $\partial_t I = -\alpha I$  linear  $\Rightarrow$  Lambert Beer

$I \approx |\vec{E}|^2$   $\partial_t I = -\beta I^2$  Zweifachabsorption  $\Rightarrow$  Potenzgesetz

• ponderomotorische Kraft wirkt auf freie Elektronen nach dem Prinzip der optischen Gleichrichtung  $F \sim -\nabla |\vec{E}|^2$

↖  
Potenz



d) Lichtausbreitung in Metalle

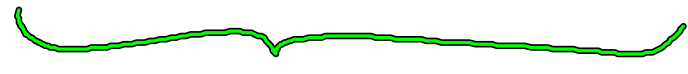
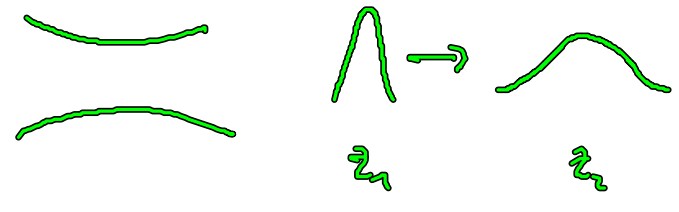
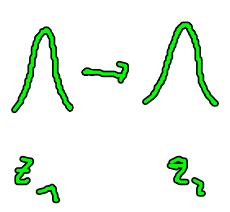
$$\left( \partial_z + \frac{\Delta n}{2ik_L} + \frac{i}{2} k_L^2 \partial_y^2 \right) \widehat{E}(z, y) = \frac{ik_L}{2n^2 \epsilon_0} \widehat{P}(z, y)$$

↑  
Ausbreitung  
mit Lichtgeschw.  
in Medium

↑  
Beugung

↑  
Gruppengeschw.  
dispersion

↑  
stark konstante durch  
erweichte Materie



Dispersion effect

↔  
kann kompensiert  
werden

Kerr NL  
 $|\widehat{E}|^2 \widehat{E} \sim \widehat{P}$

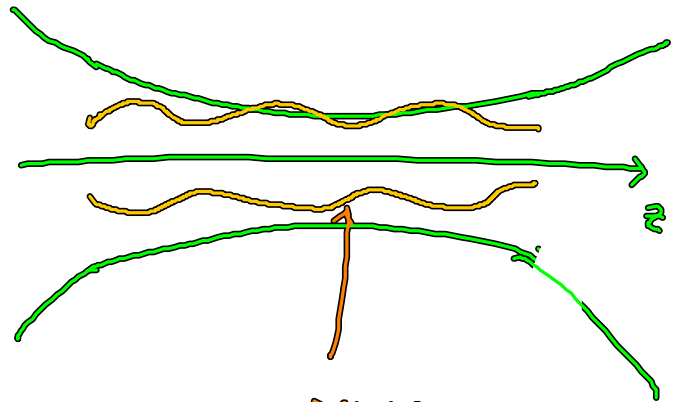
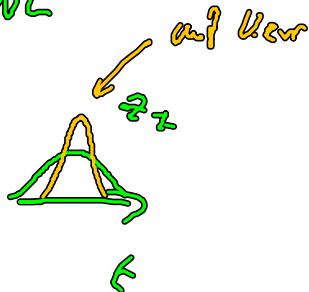
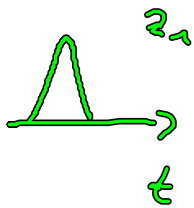
Faser

Solitons entstehen durch  
Kompensation von Gruppe-  
geschwindigkeit  $k_L^2$  dispersion

Selbstfokussierung

entsteht durch Kompensation  
von Beugung und Kerr NL

und Kern NL



$$\tilde{n} \approx \text{sech} \left( \gamma \frac{z}{\tau} \right)$$

$V$  : feldstärke  $z$

$\tau$  : Dauer d. Pulses

o  $2\pi$  Soliton entsteht bei resonanter Ausbreitung in ZNS  
 hat auch die sech-Form

e) gekoppelt strahlendes System

die gemeinsame (kooperative) Emission von  $N$  ZNS

die im Wellenlängenbereich  $\lambda$  lokalisiert sind erfolgt phasen gleich :

$$I \sim N^2 e^{-2N\gamma_{02} t}$$

$N$  mal so schnell  
 und  $N^2$  mal so stark

abgeschwächt Zirkulation

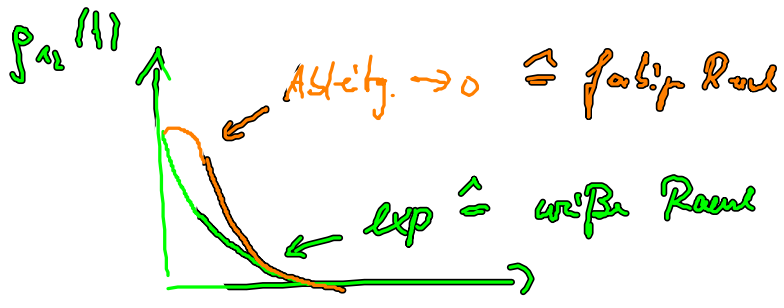
# f) Relaxation prozesse

(i) reine Phase relaxation  
(pure Dephasing)



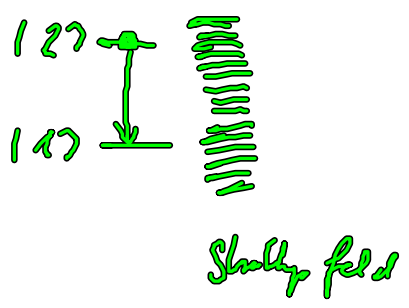
überlagerung führt zu P-Zeher

$$\rho_{12}(t) = \rho_{12}(0) e^{-\frac{1}{2} \int_0^t dt_1 \int_0^t dt_2 \underbrace{\langle V(t_1) V(t_2) \rangle}_{\text{Zeithomokorrelation}}}$$



↑ Mittg.  
↙ großer Raum ↘ farbiger Raum

o Bsp. f. simultanen Phase- und Energie relaxation



über partikulare Strahlungsfeld

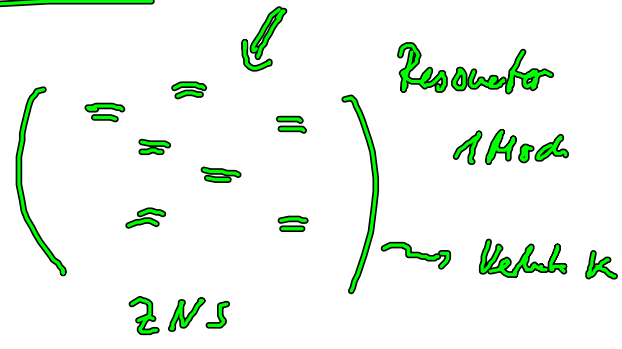
$$2\gamma_{12} = \Gamma = \frac{u_0^3 |d_{12}|^2}{3\pi c^3 \epsilon_0 \hbar^2}$$

Photonenzustandsdichte, bestimmt die Zeit mit denen der Zustand von  $|2\rangle$  und  $|1\rangle$  geht

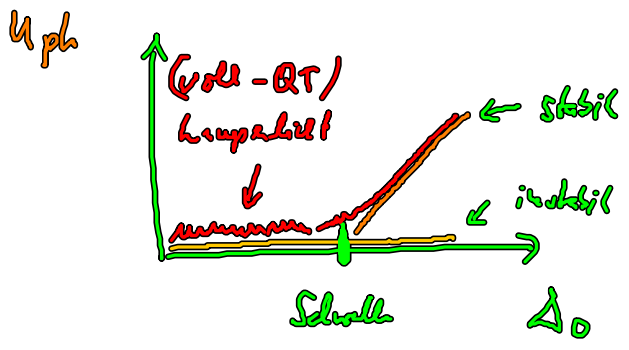
Konfig. v.  $\Gamma$  durch dielektrische Umgebung "Parallelfeld"

g/ Laseremission

$\Delta_0$  Pump (extern) sorgt für  $\Delta_0 < 0$



$\omega = \frac{2\pi}{T}$



an Rategleichung

$$n_{ph} \left( 2k + \frac{\Gamma \omega}{\Gamma + 2g_{ph} \omega} \right) = 0$$

↑  
Kehlk

• Photon Statistik

HBT - Exp.

$$g^{(2)} = \frac{\langle I_1(t) I_2(t+\tau) \rangle}{\langle I_1(t) \rangle \langle I_2(t+\tau) \rangle}$$

- $g^{(2)}_{T=0} = \begin{cases} 1 & \text{Laser} \\ 2 & \text{Langzeit} \\ < 1 & \text{unabhäng. Licht} \end{cases}$
- Vollständ. Kontrast zu klass.