

$$(g(t))_{kl, nm} = \delta_{nk} \delta_{me} \Theta(t) e^{-i(\epsilon_n - \epsilon_m)t}$$

Wie verhält sich unsere Störung?

$$H_{1,L}(t) |n\rangle \langle m| = H_1(t) |n\rangle \langle n| = \sum_k (H_1(t))_{kn} |k\rangle \langle n|$$

$$\Rightarrow (H_{1,L}(t))_{kl, nm} = \delta_{em} (H_1(t))_{kn}$$

Also  $H_{1,L}$  verändert nur die linke Seite!

Also

$$\begin{array}{c} k \\ \text{---} \\ | \\ n \end{array} \Bigg| \begin{array}{c} | \\ m \end{array} \hat{=} (H_1(t))_{kn}$$

$$H_{1,R}(t) |n\rangle \langle m| = |n\rangle \langle m| H_1(t) = \sum_e |n\rangle \langle e| (H_1(t))_{me}$$

$$\begin{array}{c} | \\ n \end{array} \Bigg| \begin{array}{c} e \\ \text{---} \\ | \\ m \end{array} \hat{=} - (H_1(t))_{me}$$

Für unser WW in Dipolkopplung gilt dann:

links

$$E(t) \cdot (\nu_L(t))_{kl, nm} = \delta_{em} E(t) \cdot (\nu(t))_{kn}$$

$$\begin{array}{c} k \\ \text{---} \\ | \\ n \end{array} \Bigg| \begin{array}{c} | \\ n \end{array} \hat{=} E(t) \cdot (\nu(t))_{kn}$$

rechts:

$$E(t) \cdot (\nu_R(t))_{kl, nm} = \delta_{nn} (\nu(t))_{me} \cdot E(t)$$

$$n \left| \begin{array}{c} e \\ m \end{array} \right| \cong E(t) \cdot (\mu(t))_{m \times e}$$

Es folgt die Spw:

$$tr(\mu_{R/L} \dots \dots \dots S_0)$$

↑ Störungen + Propagation

Was macht die Spw am Ende?

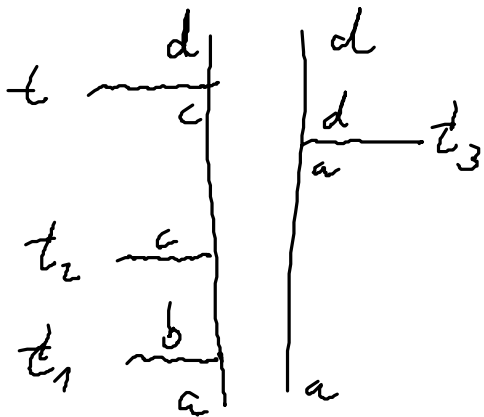
$$tr(\dots) = \sum_k \langle k| \dots |k\rangle$$

Auf  $\langle n| \langle m|$

$$tr(\langle n| \langle m|) = \sum_k \langle k|n\rangle \langle m|k\rangle = \delta_{nm}$$

Am Ende müssen beide Zustände gleich sein!

Folgendes Diagramm als Bsp:



Bedingung Dichtematrix in Gleichgewicht oder Diagonal

Aufschreiben der Formel

$$P^{(3)}(t) \Big|_{\text{Beispiel}} = - \left( -\frac{i}{\hbar} \right)^3 \int_{t_0}^t dt_3 \int_{t_0}^{t_3} dt_2 \int_{t_0}^{t_2} dt_1$$

$$\sum_a P_{a, \mu_{20}}(t) \langle a | H_{12}^{(t)} | a \rangle \langle a | H_{13}^{(t_3)} | a \rangle \langle a | H_{1,cb}^{(t_2)} | a \rangle \langle a | H_{1,ba}^{(t_1)} | a \rangle$$

← von unten nach oben aufschreiben

Verwende Ausdrücke für Greenfkt:

$$= - \left( \frac{i}{\hbar} \right)^3 \int_{t_0}^t dt_3 \int_{t_0}^{t_3} dt_2 \int_{t_0}^{t_2} dt_1 \sum_{abcd} N_{cd}(t) H_{1,da}(t_3) H_{1,cb}(t_2) H_{1,bc}(t_1)$$

$$e^{-i(\epsilon_c - \epsilon_d)(t-t_3)} e^{-i(\epsilon_c - \epsilon_a)(t_3-t_2)} e^{-i(\epsilon_b - \epsilon_a)(t_2-t_1)}$$

Nächste Abschnitt:

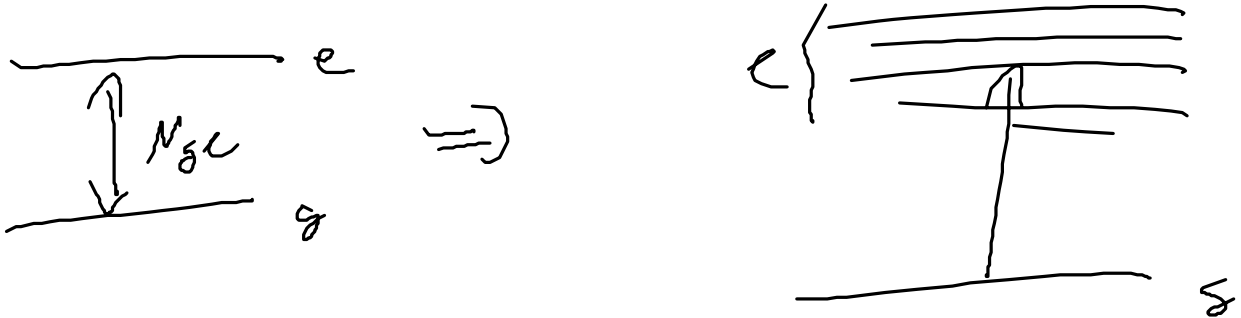
Dipolauswahlregeln und Energieerhaltung zur Reduktion der Diagramme verwenden.

### III.4 Regeln aufstellen für Diagramme

Ziel: Eigenschaften des Hamilton operier unter um Anzahl der Diagramme zu reduzieren!

- a) Dipol auswahlregeln (Zweiniveausystem)
- b) Rotating Wave Approximat (Energieerhaltung)
- c) weiteres Beispiel für Spektroskopie
- d) Motteildarstellung als Analysemöglichkeit

a) Beispiel zwei Niveausystem / zwei Bandensystem



e: 1st single exciton: einfache Anregung.

# Hamilton operator:

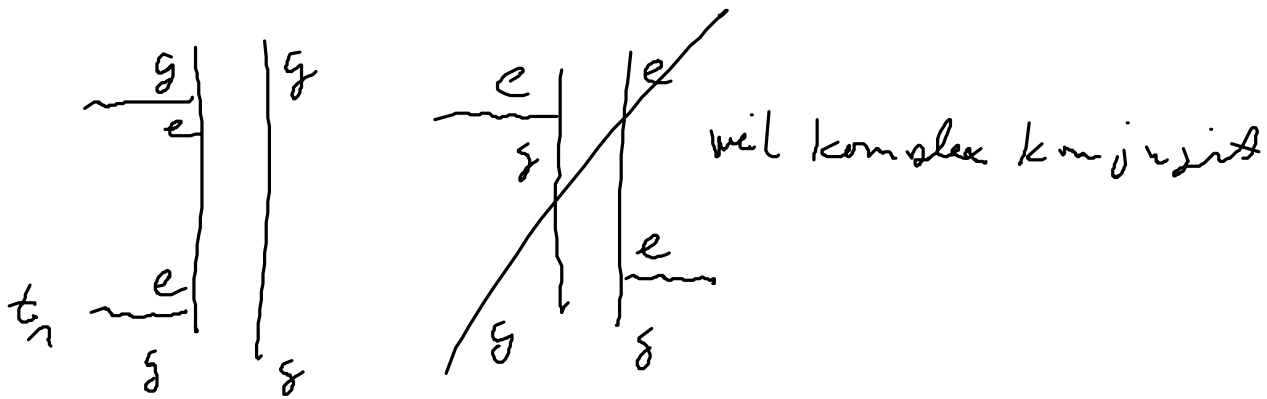
$$H_1 = \sum_e E(t) \nu_{ge} |g\rangle\langle e| + \sum_e E(t) \nu_{eg} |e\rangle\langle g|$$

hier könnte man  
h-c schreiben

Observable:  $P(t) = \nu_{ge} t^{-1} |g\rangle\langle g| + \nu_{eg} t^{-1} |e\rangle\langle e|$

Es reicht dies zu berechnen,   
 spart 50% der Diagonale.   
 Complex konjugiert

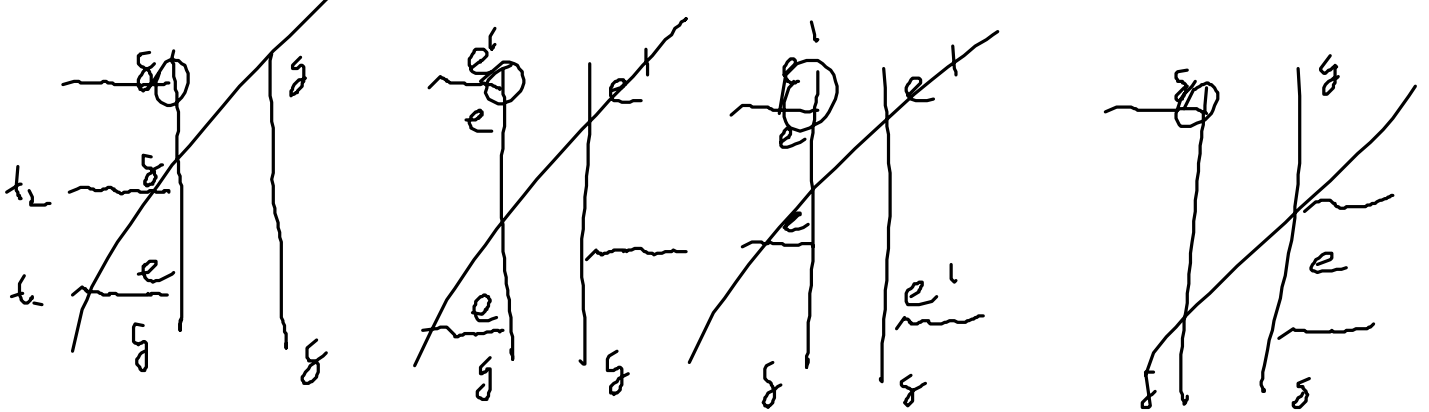
## Diagramm 1. Ordnung (Konvention Observable links)



$$\rho^{(1)}(t) = \int_{t_0}^t dt_1 \underbrace{p\left(\frac{-i}{\hbar}\right)}_{\text{Klein}} \sum_e \nu_{ge} \nu_{eg} E(t_1) e^{-i(\omega_e - \omega_g)t_1 - \gamma_{eg} t_1} + c.l.$$

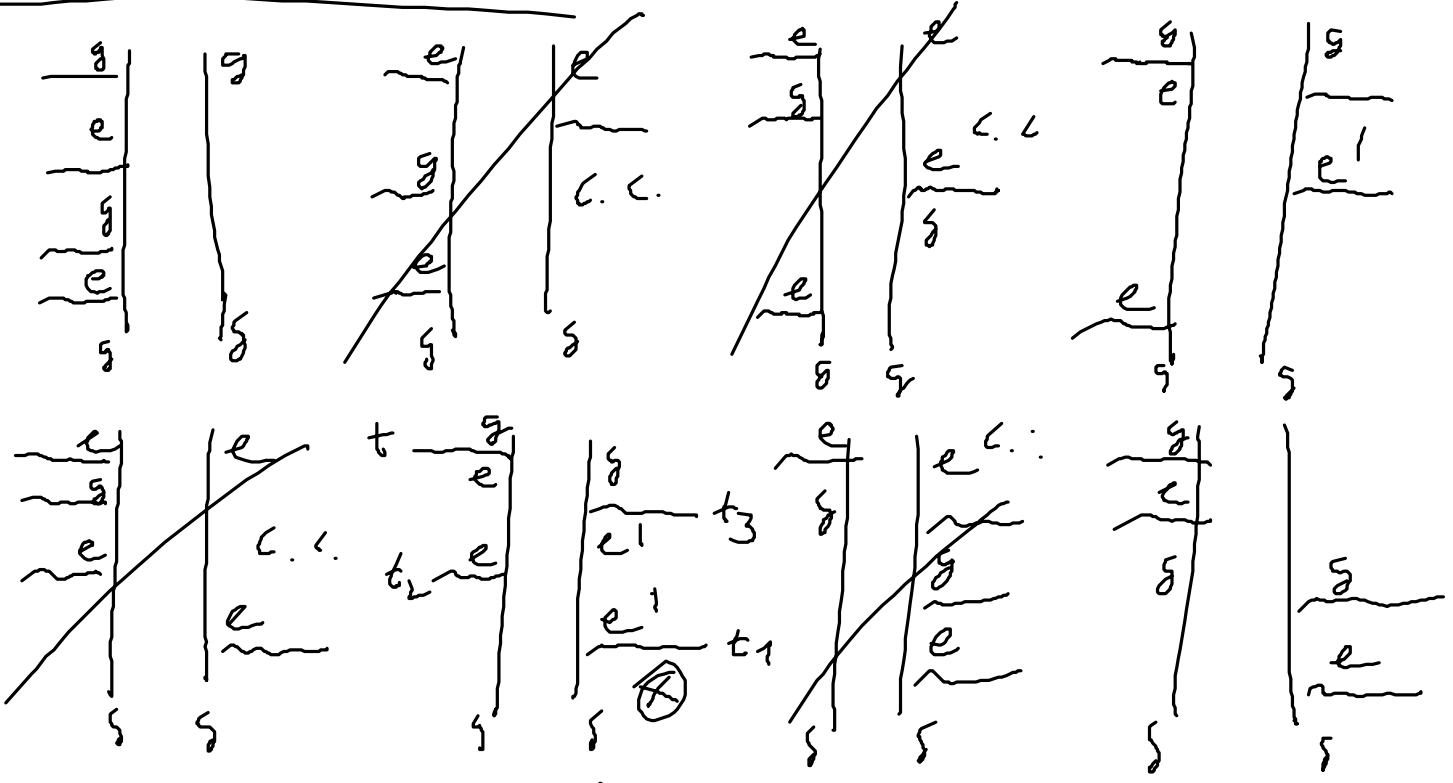
z.B. Übergang  
effekte  
phenomenologisch

## Diagramm 2. Ordnung



⇒ 0 (kein Diagramm) Fertig! (Außer es seien Dipolmomente  $N_{g\delta}$  oder  $N_{e e'}$ )

Diagramm 3. Ordnung



Aber wir haben 4. Diagramme.  
Am Obervale nachhinstehen...

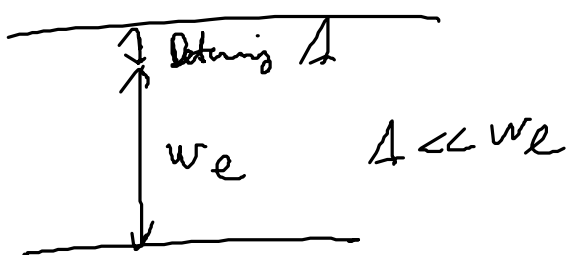
# Beispiel für Response von $\otimes$

$$\begin{aligned}
 \rho^{(3)}(t) \otimes & \Rightarrow \uparrow \left(-\frac{i}{\hbar}\right)^3 \sum_{\text{kein Vorzeichen}} \int_{t_0}^t dt_3 \int_{t_0}^{t_3} dt_2 \int_{t_0}^{t_2} dt_1 N_{ge} N_{ge}(t_1) \cdot E(t_1) \\
 & N_{eg}(t_2) \cdot E(t_2) N_{eg}(t_3) \cdot E(t_3) \\
 & \int_{t_0}^t dt_3 \int_{t_0}^{t_3} dt_2 \int_{t_0}^{t_2} dt_1 N_{ge} N_{ge}(t_1) \cdot E(t_1) \\
 & N_{eg}(t_2) \cdot E(t_2) N_{eg}(t_3) \cdot E(t_3) \\
 & e^{-i(\omega_c - \omega_g)(t-t_3) - \gamma_{eg}(t-t_3)} \\
 & e^{-i(\omega_c - \omega_g)(t_3-t_2) - \gamma_{eg}(t_3-t_2)} \\
 & e^{-i(\omega_g - \omega_e)(t_2-t_1) - \gamma_{ge}(t_2-t_1)}
 \end{aligned}$$

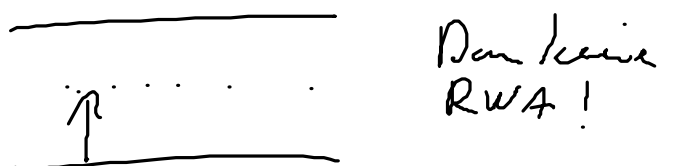
## Rotating wave approximation / Drehwellennäherung

Bei resonanter Anregung optischer Übergänge wird meist die RWA Näherung durchgeführt - Dies vernachlässigt stark off-resonante Prozesse.

### Beispiel



Nicht bei stark off-resonanten Prozessen

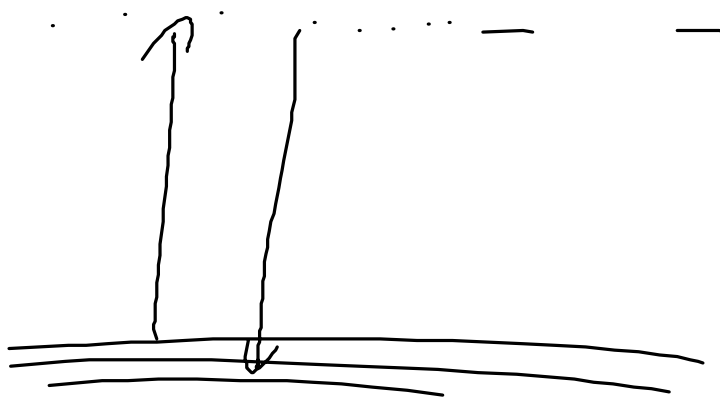


Nicht bei zwei-photonen absorption: (z.B. Second Harmonic Generation)

Kein RWA erlaubt, da dies sonst weggelassen wird, das einzelne Photon ist stark absorbant.

Hier Energie in gesamte Prozesse erfüllt nicht im einzelnen!

## Raman Prozess (offresant)



Hier darf man offresante Prozesse nicht vernachlässigen!

Zur Vorbereitung Rotationsframe definieren:

$$E(t) = \hat{E}(t) e^{i\omega_e t} + \hat{E}^x(t) e^{-i\omega_e t}$$

Der Hamiltonoperator hat die Form:  $\omega_{ij} = \omega_i - \omega_j$

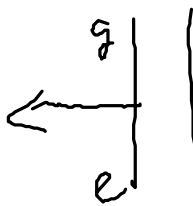
Bsp:  $H_1(t) = \sum_e \hat{E}(t) \cancel{\nu_{se}} e^{i\omega_e t - i\omega_{se} t} |g\rangle\langle e|$   
 $+ \sum_e \hat{E}^x(t) \cancel{\nu_{se}} e^{-i\omega_e t - i\omega_{se} t} |g\rangle\langle e|$  RWA  
 $\omega_{ge} < \omega_{se}$   
 $\Rightarrow$  ~~rotiert schnell~~  
 $\Rightarrow$  ~~vernachlässigen~~

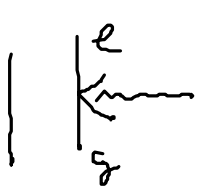
$+ \sum_e \hat{E}(t) \nu_{eg} e^{i\omega_e t - i\omega_{eg} t} |e\rangle\langle g|$   
 $+ \sum_e \hat{E}^x(t) \cancel{\nu_{eg}} e^{-i\omega_e t - i\omega_{eg} t} |e\rangle\langle g|$  RWA


$$= \sum_e \hat{E}(t) \cdot N_{ge} e^{i(\omega_e - \omega_g)t} |g\rangle\langle e| \quad (A)$$

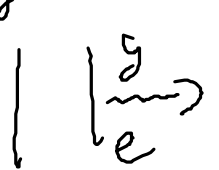
$$+ \sum_e \hat{E}^*(t) \cdot N_{eg} e^{i(\omega_g - \omega_e)t} |e\rangle\langle g| \quad (B)$$

E-Feldteil


 $\leftarrow = e^{i\omega_e t} \hat{E}(t)$ 
(A)


 $\leftarrow = e^{i\omega_e t} \hat{E}(t)$


 $\rightarrow = e^{-i\omega_e t} \hat{E}^*(t)$


 $\rightarrow = e^{-i\omega_e t} \hat{E}^*(t)$