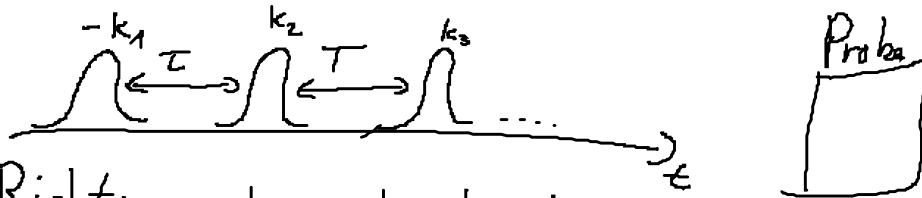


Beispiel für Vierwellenmischung (FWM):

Photonecho:



Richtung $\underline{k}_s = -\underline{k}_1 + \underline{k}_2 + \underline{k}_3$ für
Signal! $\underline{k}_2 = \underline{k}_3$ Ein Puls
für $T=0$

Dieses Signal trennt homogene und
inhomogene Verbreiterung. ($T \approx 0, k_2 = k_3$)
 \Rightarrow Raumabhängig Felder

$$\Omega(\underline{R}^n, t) = \underbrace{\Omega_1^{(0)} e^{i\underline{k}_1 \cdot \underline{R}^n - i\omega_1 t}}_{\text{einmal}} \delta(t) + \underbrace{\Omega_2^{(0)} e^{i\underline{k}_2 \cdot \underline{R}^n - i\omega_2(t-T)}}_{\text{zweimal}} \delta(t-T) + \text{c.c.}$$

$$\dot{P}_{12,n} = (i\delta^n - \gamma) P_{12,n} + \frac{i}{2} \tilde{\Omega}(\underline{R}_n, t) \Delta_n$$

($\tilde{\Omega} = \text{complex}$)

$$\dot{\Delta}_n = -i \tilde{\Omega}(\underline{R}_n, t) (P_{21,n} - P_{12,n})$$

formale Integration:

$$P_{12,n}(t) = P_{12,n}(-\infty) + \frac{i}{2} \int_{-\infty}^t dt' \tilde{\Omega}(R_n, t') \Delta_n(t') e^{(i\delta^{(n)} - \gamma)(t-t')}$$

$$\Delta_n(t) = \Delta_n(-\infty) - 2 \int_{-\infty}^t dt' \tilde{\Omega}(R_n, t') \text{Im}(P_{12,n}(t'))$$

0-te Ordnung: $P_{12,n}^{(0)} = 0$, $\Delta_n^{(0)} = 1 = \Delta_0$

1-te Ordnung

$$P_{12,n}^{(1)} = 0 + \frac{i}{2} \Delta_0 \int_{-\infty}^t dt' \tilde{\Omega}(R_n, t') e^{(i\delta^{(n)} - \gamma)(t-t')}$$

$$P_{12,n}^{(1)} \Big|_{k_1} = \frac{i}{2} \Delta_0 \int_{-\infty}^t dt' e^{i k_1 \cdot R^{(n)}} \delta(t') e^{(i\delta^{(n)} - \gamma)(t-t')}$$

→ nur der erste Puls trägt zum Signal bei

↓ Falsche Richtung

$$P_{12,n}^{(1)} \Big|_{k_1} = \frac{i}{2} \Delta_0 e^{i k_1 \cdot R^{(n)}} e^{(i\delta^{(n)} - \gamma)t} \Theta(t)$$

Wir benötigen nur den Beitrag in Richtung $-k_1$.

$$\Delta_n^{(1)} \Big|_{-k_1 + k_2} = \cancel{\Delta_0} - \int_{-\infty}^t dt' \tilde{\Omega}(R_n, t') \Big|_{\text{nur } \frac{-i}{2}} \Big|_{-k_1 + k_2} e^{-i k_1 \cdot R^n} e^{(i\delta^{(n)} - \gamma)t'}$$

0. Ordnung

$$= \frac{i}{2} e^{i(k_2 - k_1) \cdot R^{(n)}} \int_{-\infty}^t dt' \tilde{\rho}^{(3)}(R_n, t') e^{i\delta^{(n)}(t-t')} \Theta(t-t')$$

Wir interessieren uns für P als Quelle in Richtung

$$P_{12, n}^{(3)} = \frac{i}{2} \int_{-\infty}^+ dt' \tilde{\rho}^{(3)}(R_n, t') \Big|_{k_2 = k_1} e^{i(2k_2 - k_1) \cdot R_n} e^{i\delta^{(n)}(t-t')} \Theta(t-t')$$

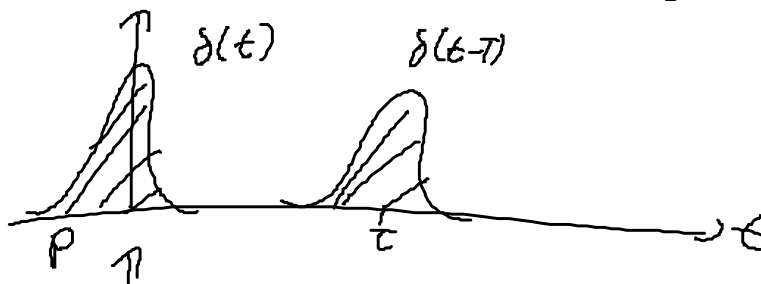
$$= -\frac{1}{4} \int_{-\infty}^+ dt' \tilde{\rho}^{(3)}(R_n, t') \Big|_{k_2 = k_1} e^{i(2k_2 - k_1) \cdot R_n} e^{i\delta^{(n)}(t-t')} \Theta(t-t')$$

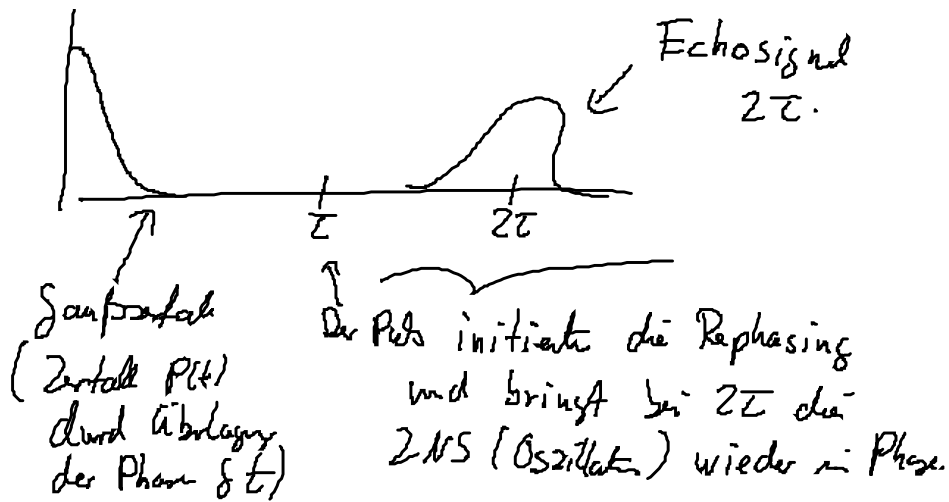
Wir wollen das P als Quelle des Signals

$$P_{2k_2 - k_1}^{(3)}(R_n, t) \propto \sum_n e^{i\delta^{(n)}(t-t_c) - \gamma t}$$

$$\propto \int_{-\infty}^{\infty} d\delta f(\delta) e^{i\delta(t-t_c) - \gamma t}$$

$$P_{\text{Pulse}} \propto e^{-\frac{(t-t_c)^2 \frac{\delta_0^2}{4}}{}} - \gamma t$$





Hauptpuls bei 2τ mit der Breite $\frac{\Delta}{\delta\omega}$

Das ist das Echo. Misst man bei $t=\tau$
 für verschiedene τ . So kann man was.

$$P^{(3)}_{2k_2-k_1} \propto e^{-2\gamma\tau}$$

die homogene Linienbreite
 (sogar Form) zu erhalten

Detektionarten

1. homodyne Detektion

Das ganze Echo wird integriert.

$$S_{\text{homo}}(\dots) = \int_0^{\infty} dt |P^{(3)}(k_s, t)|^2$$

↑ Richtung des Echosignal

Detektion z. B. über ein Kalorimeter.

Vorteil: Einfach!

Nachteil: Phase geht verloren

- Signal wird über Bildung des Echos detektiert
=> Inhomogener dephasing muss groß sein!

Es kann praktisch sein auch die Phase zu detektieren!

Heterodyne Detektieren

Wie bekommt man die Phase heraus?

Phase wird durch Interferenz gemessen.

Signal wird mit lokalem Oszillator gemischt.

$$E_{20}(k, t) = \underbrace{E_{20}(t-\tau)}_{\substack{\text{auf die Position} \\ \text{des Echos}}} \exp(i k_{20} \cdot r - i \omega_{20} t - i \varphi) + c.c.$$

↑
Phase differenz zu
dem Puls.

Oszillator muss Phasen gelockt sein,
zusammen mit den drei Pulsen!

$$S_{HSPE}(\vec{r}_s, \vec{r}_s, \varphi) = -2 \operatorname{Im} \int_{-\infty}^{\infty} dt \tilde{E}_{20}^*(t-\tau) P^{(3)}(k_s, t) \exp(i\varphi + i(\omega_{20} - \omega_s)t)$$

$$T_{NR}: |E_s + E_{20}|^2$$

$$= \cancel{|E_s|^2} + \underline{E_s E_{20}^* + E_s^* E_{20}} + \cancel{|E_{20}|^2}$$

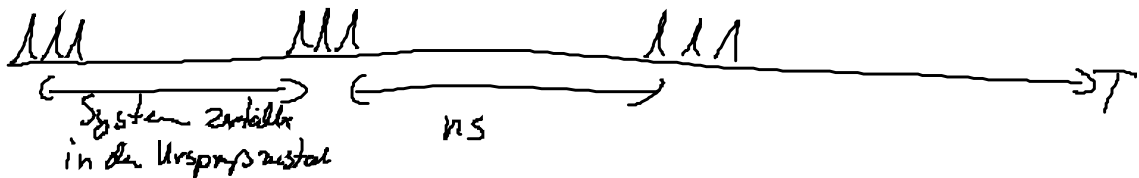
$$S_{HSPE} \propto 2 \operatorname{Re}(E_s E_{20}^*) \quad S_{JPE} \propto |E_s|^2$$

Weiterhin ist die Messung von Real und Imaginär Teil möglich.

$$\zeta = 0 \text{ Real Teil, } \zeta = \frac{\pi}{2} \text{ Imaginär teil z.B.!$$

Heterodyne Detektoren um Signale zu separieren

Experiment oft wiederholen und Phase dann variieren.



$$\text{Also } E_1(t) \Rightarrow E_1(t) e^{i\Omega_1 T_n} \quad \begin{matrix} \uparrow \\ \text{Zeitpunkt des Experiments} \end{matrix}$$

$$E_2(t) \Rightarrow E_2(t) e^{i\Omega_2 T_n}$$

$$E_3(t) \Rightarrow E_3(t) e^{i\Omega_3 T_n}$$

Wichtig $\Omega t \ll 1$
 \uparrow
 Zeiten typisch für Materialdynamik

Wie kann man $e^{i\Omega T}$ erzeugen? (Relative Phase ist entscheidend)

\Rightarrow Kristalle die mit der jeweiligen Frequenz schwingen, die den Signal ein Phase verpassen (AOM)
 und dann nach Messung des Signal aufsumieren

$$\text{Dann } \sum_n e^{i(\pm\Omega_1 \pm \Omega_2 \pm \Omega_3) T_n}$$

$$\rightarrow \int dT e^{i(\pm \Omega_1 \pm \Omega_2 \pm \Omega_3)T} e^{i\Omega_5 T} \\ \propto \delta(\pm \Omega_1 \pm \Omega_2 \pm \Omega_3 \pm \Omega_5)$$

Signal kann für

$$\Omega_5 = \pm \Omega_1 \pm \Omega_2 \pm \Omega_3 \text{ detektiert werden}$$

Typische Werte 40 MHz vs 39 MHz

\Rightarrow Wichtig um die Integrale durch zu führen

\Rightarrow Real und Imaginärteil muss sein.

Heterodyne Detektor.