

# Optische Methoden in der NMR

Prinzip: Benutzen eines Lasers zur Detektion und/oder Anregung

Vorteile:

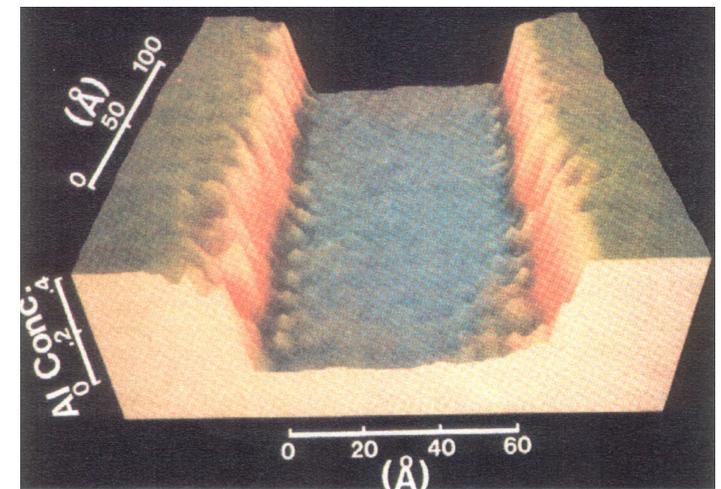
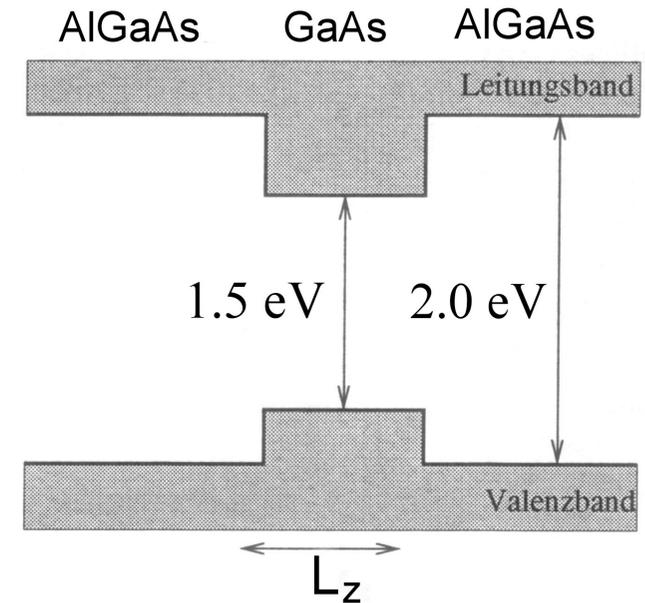
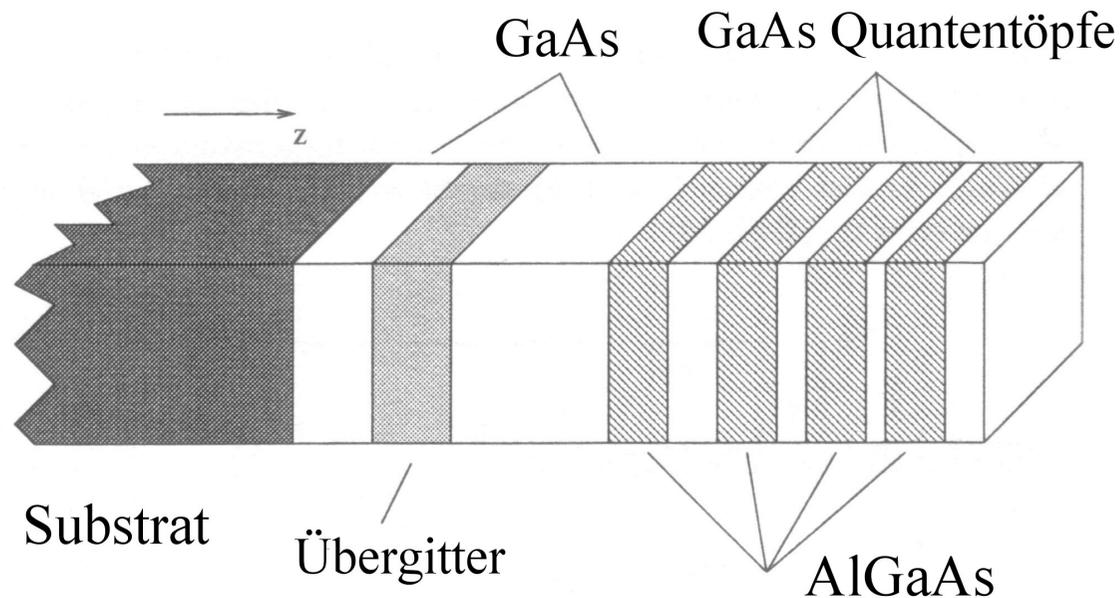
- hohe Empfindlichkeit  
NMR benötigt  $10^{18}$  Kernspins, in ODNMR  $<10^{11}$  Kernspins
- hohe Selektivität

Inhalt:

- Photolumineszenz
- Optisches Pumpen
- Hanle-Effekt
- ODNMR
- Lochbrennspektroskopie
- kohärente Ramanstreuung

# GaAs / AlGaAs-Heterostrukturen

- Herstellung mittels MBE (molekular beam epitaxy)
- MBE ermöglicht eine Auflösung in Größenordnung einzelner Monolagen
- Mittels MBE kann man das Mischverhältnis gezielt einstellen  
→ Eigenschaften der Materialien kontrollierbar



# Photolumineszenz (PL)

Absorption eines Photons falls  $E_{\text{Ph}} \geq E_{\text{g}}$

→ Übergang eines Elektrons von VB in LB

→ Bildung eines Elektron-Loch-Paares

→ Bei niedrigen Temperaturen: Bildung eines Exzitons

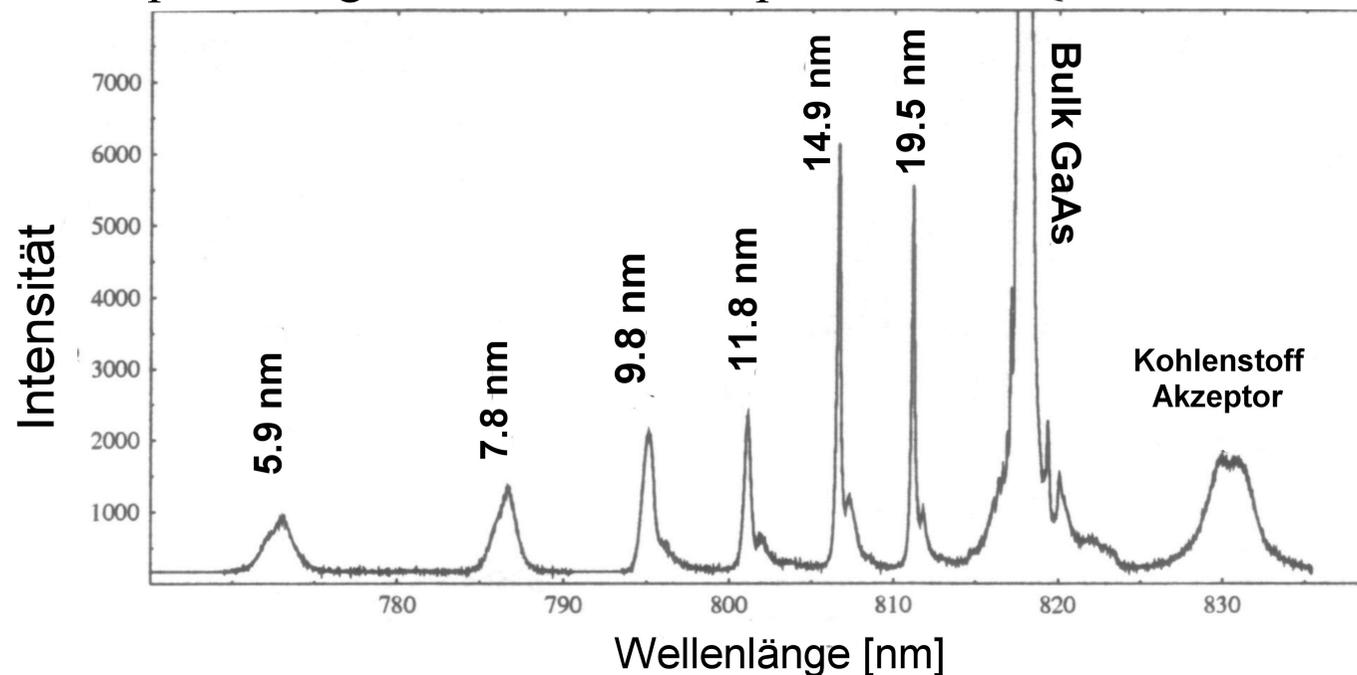
→ Verminderung des Energieabstandes um Bindungsenergie des Exzitons  $E_{\text{Ex}}$

→ Energie der PL-Lichtes:  $E_{\text{PL}} = E_{\text{g}} - E_{\text{Ex}}$

→ PL-Energie nimmt mit sinkender Topfdicke zu

→ Untersuchung des Quantentopfes mit bekannter Dicke möglich

→ PL-Spektrum gibt das Emissionsspektrum der QW wieder



# Angeregte Photolumineszenz PLE (photoluminescence excitation)

Für Halbleiter-Quantentöpfe ist eine Absorptionsmessung nicht möglich, da das Licht hauptsächlich vom Substrat absorbiert wird. →

indirekte Absorptionsmessung:

PL wird in Abhängigkeit von Anregungswellenlänge gemessen

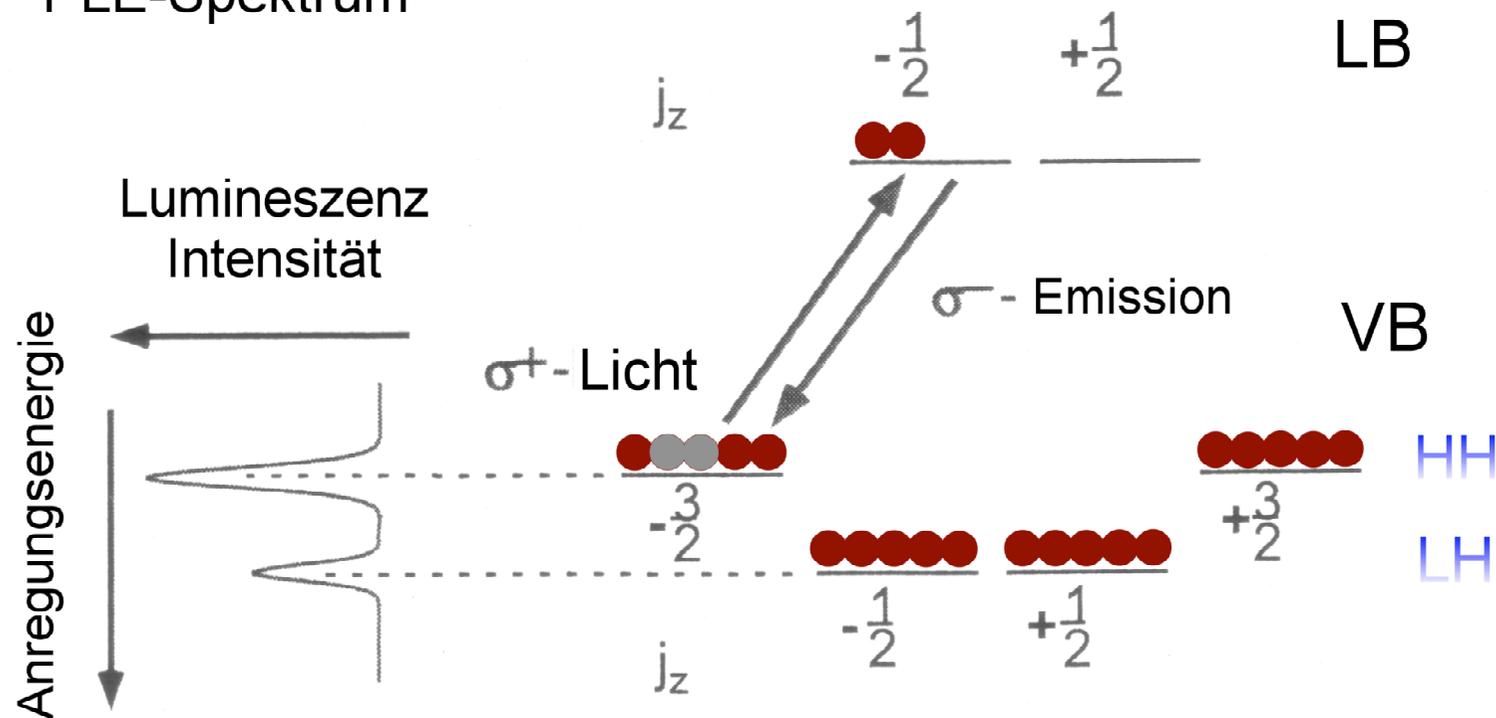
Anregungsenergie = Energie der Bandlücke (Die Probe absorbiert das Licht)

→ Emission von Licht mit der PL-Wellenlänge der QW

→ Untersuchung eines Quantentopfes durch Festlegung der Detektionswellenlänge

möglich

PLE-Spektrum



# Polarisation der Elektronenspins

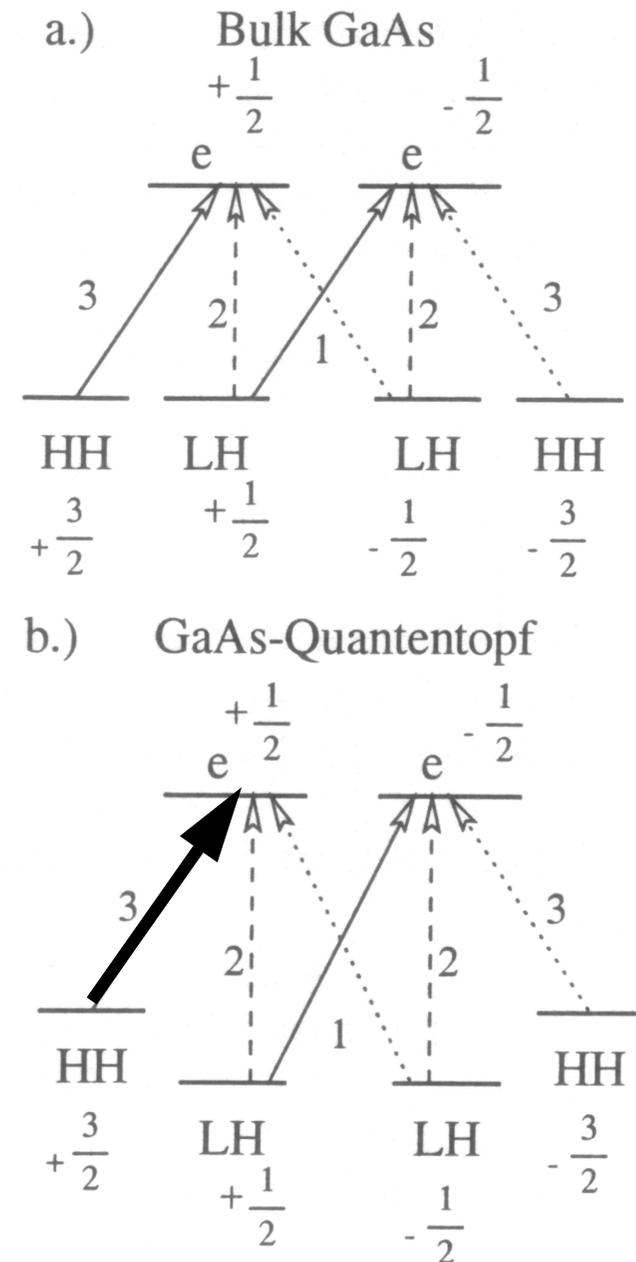
Einstrahlung von polarisiertem Licht →  
Polarisation der Elektronenspins

Entartung bei Bulk-GaAs:  
Polarisation bis zu 50% möglich

Aufhebung der Entartung wegen des  
Quantentopfes

leichte und schwere Loch-Zustände können  
getrennt angeregt werden  
→ vollständige Polarisation des  
Elektronenspins möglich

Analyse durch Einstrahlung von Licht mit  
bekannter Wellenlänge und Polarisation



# Polarisationsmessung:

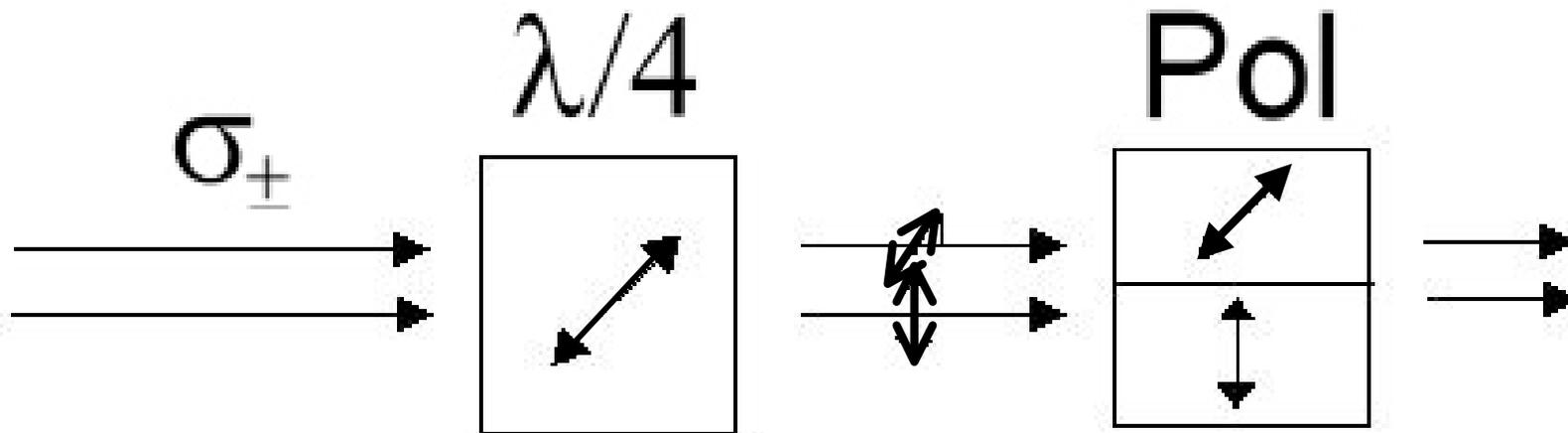
Untersuchung der Intensität des  $\sigma^+$  und  $\sigma^-$ -Anteiles

$\sigma^+$  auf  $\lambda/4$ -Plättchen, Winkel  $+45^\circ \rightarrow$  linearpolarisiertes Licht

$\sigma^-$  auf  $\lambda/4$ -Plättchen, Winkel  $-45^\circ \rightarrow$  linearpolarisiertes Licht

Messung der Intensitäten  $I_+$  und  $I_-$   $\rightarrow$  Polarisationsgrad des Lichtes

$$P = \frac{I_+ - I_-}{I_+ + I_-}$$

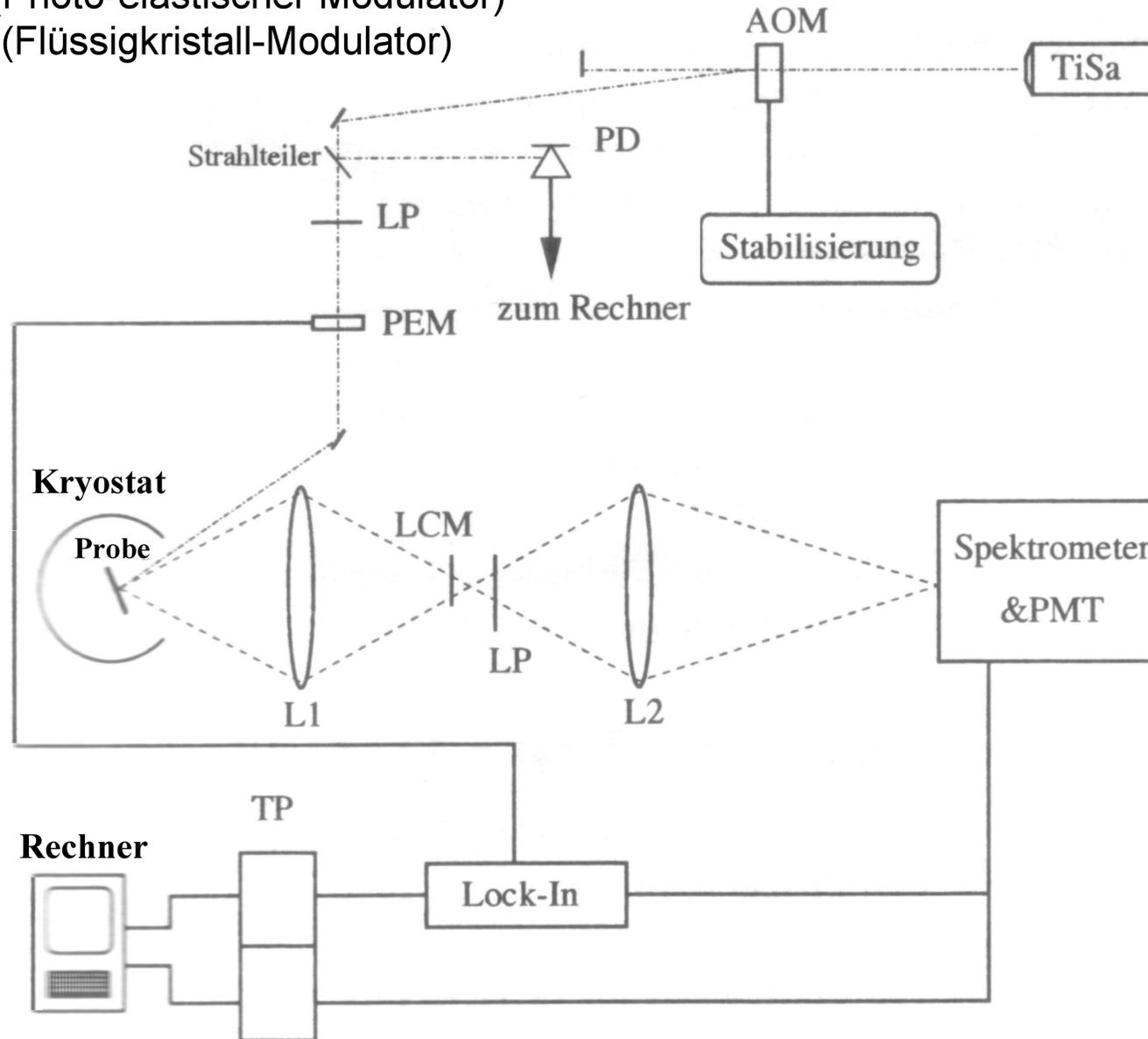


# Versuchsaufbau für GaAs-Quantentöpfe

AOM (akusto-optischer Modulator)

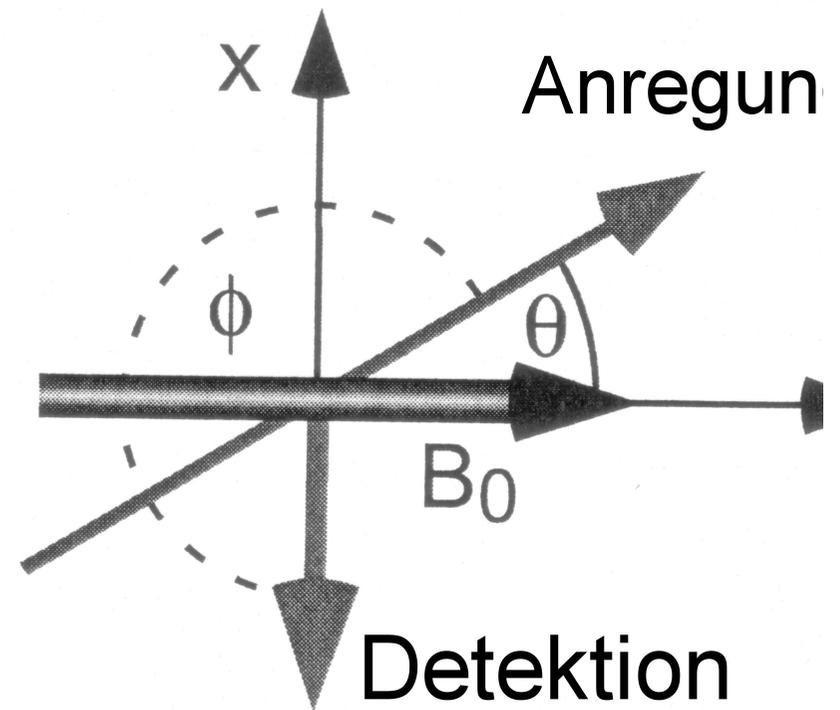
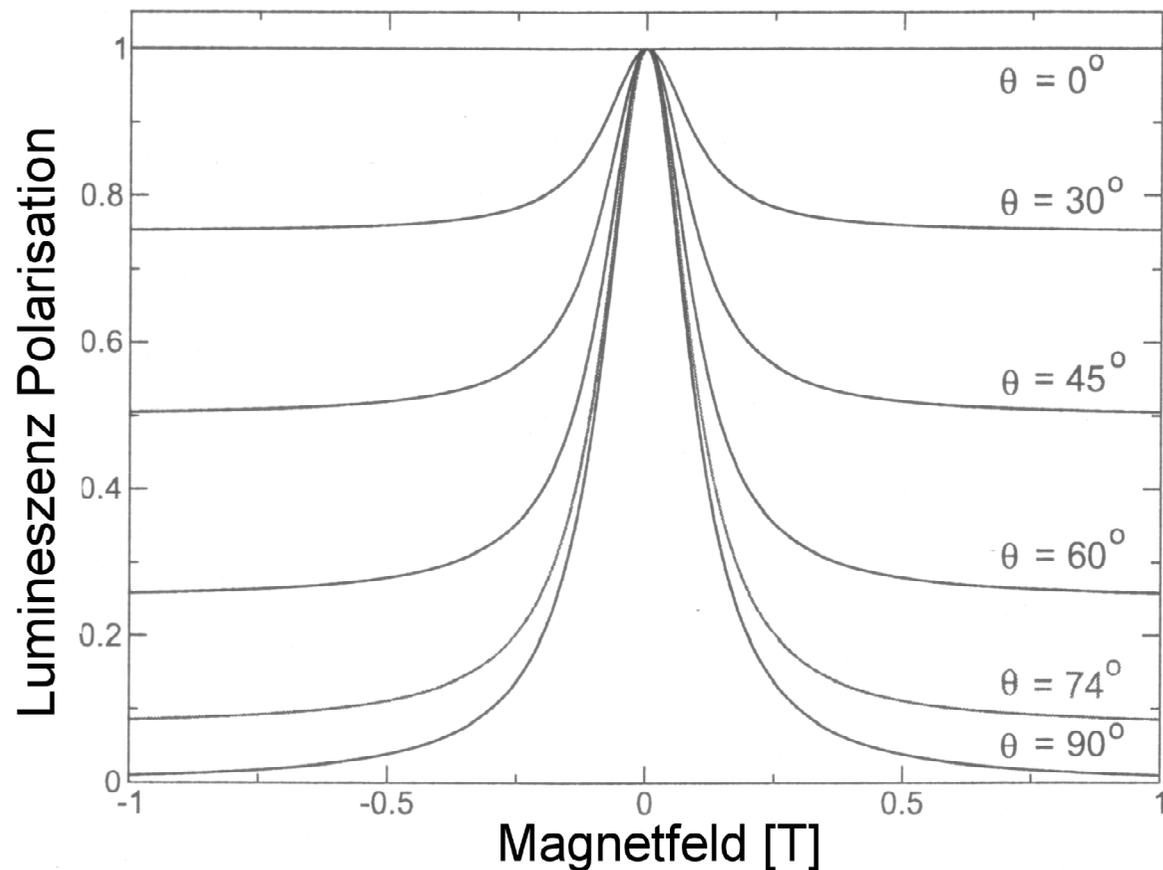
PEM (Photo-elastischer Modulator)

LCM (Flüssigkristall-Modulator)



# Hanle-Effekt

Abnahme der PL-Polarisation in Abhängigkeit von einem Magnetfeld  $B$ -Feld senkrecht zu Pumprichtung  $\rightarrow$  Präzession mit Larmorfrequenz



# Schiefer Hanle-Effekt

Elektronenspin führt zu einer Polarisierung der Kernspin (Hyp. WW)

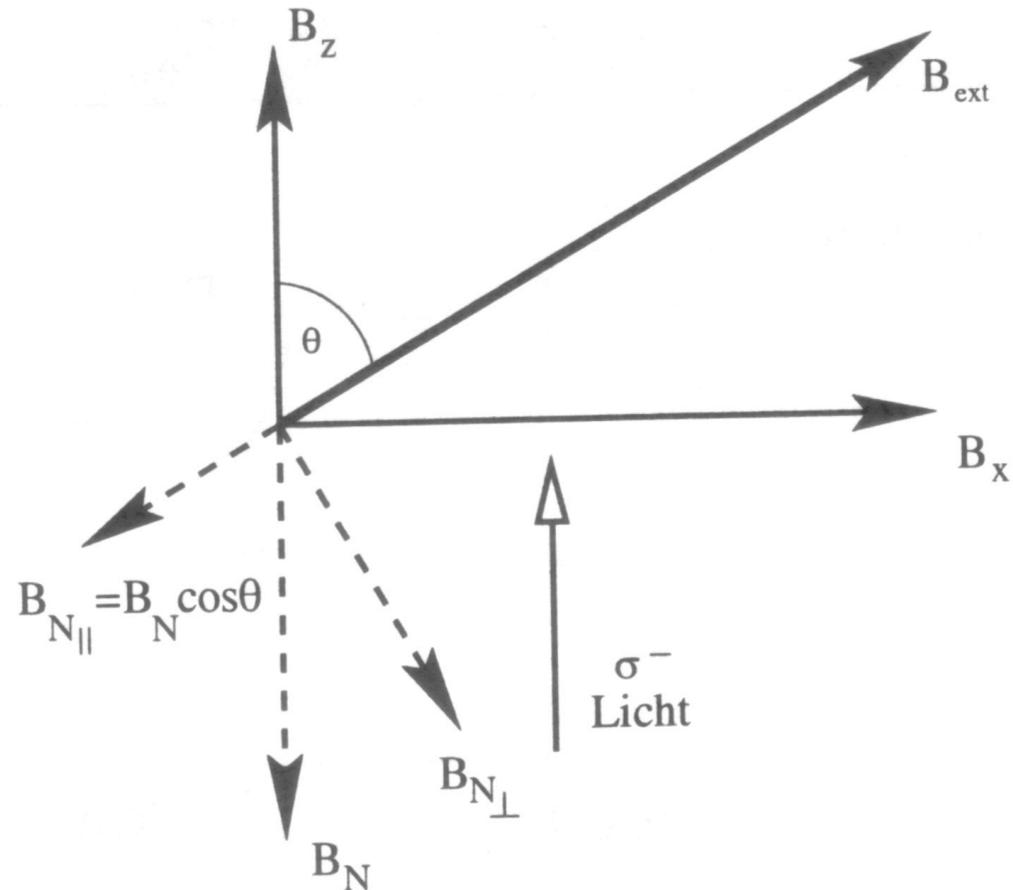
Kernspins erzeugen ein Feld  $B_N$  parallel zum Pumplicht.

$B_{N\perp}$  relaxiert durch  
Dipol-Dipol-WW

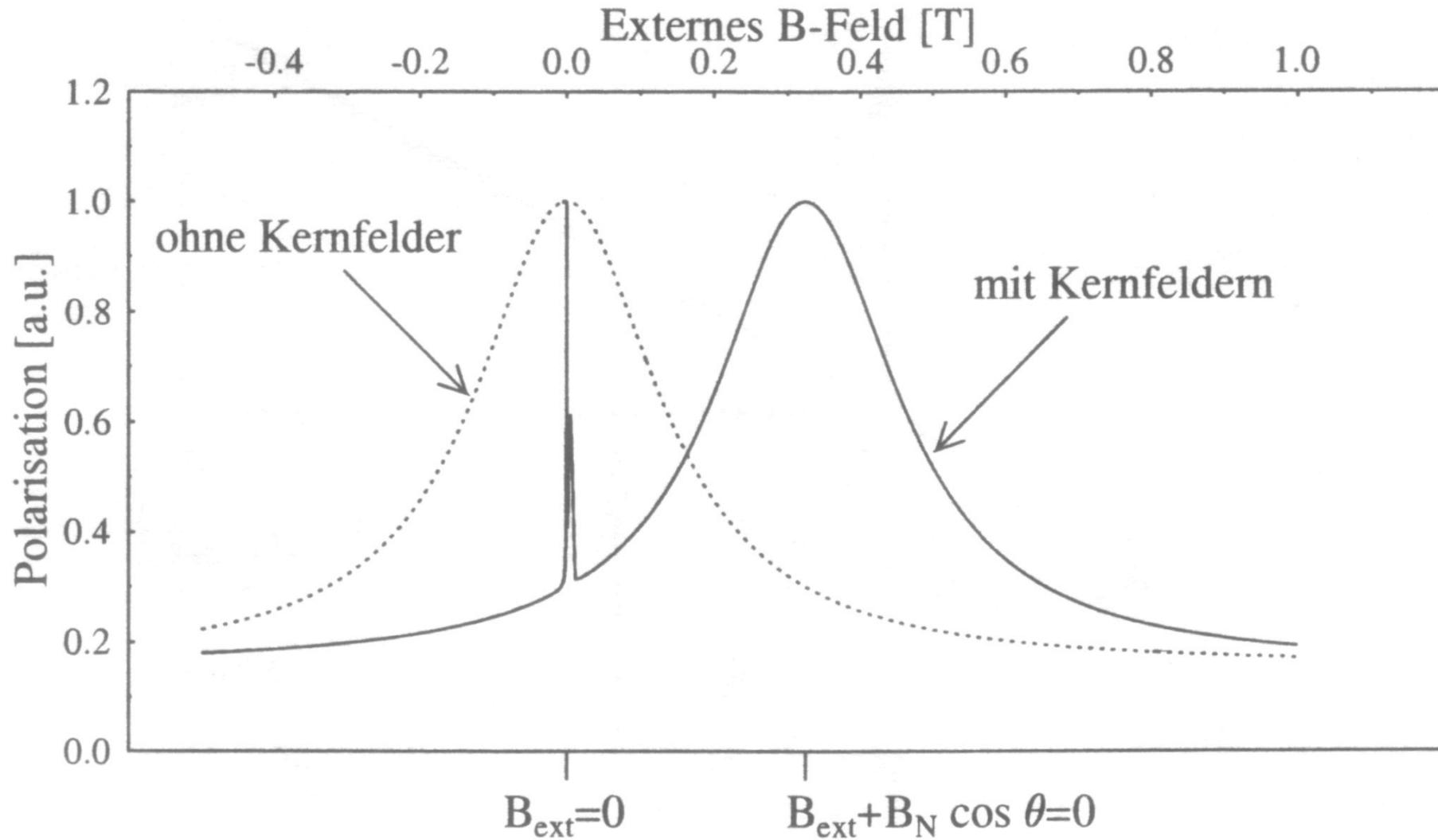
$$\rightarrow B_{N\parallel} = B_N \cos \theta$$

$$\rightarrow B_{\text{eff}} = B_{\text{ext}} + B_N \cos \theta$$

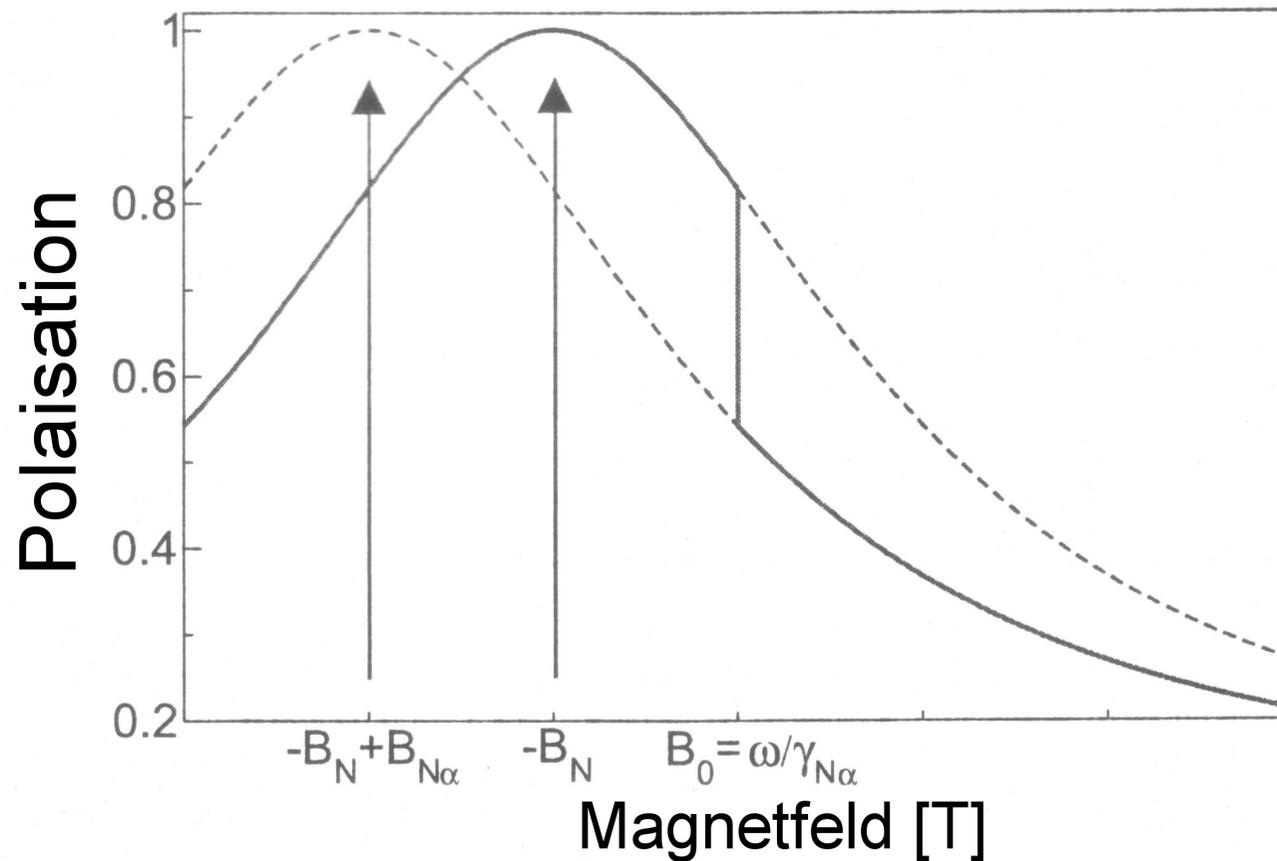
$\rightarrow$  Verschiebung der  
Hanle-Kurve



# Verschiebung der Hanle-Kurve



# ODNMR (optisch detektierte Kernspin-Resonanz)



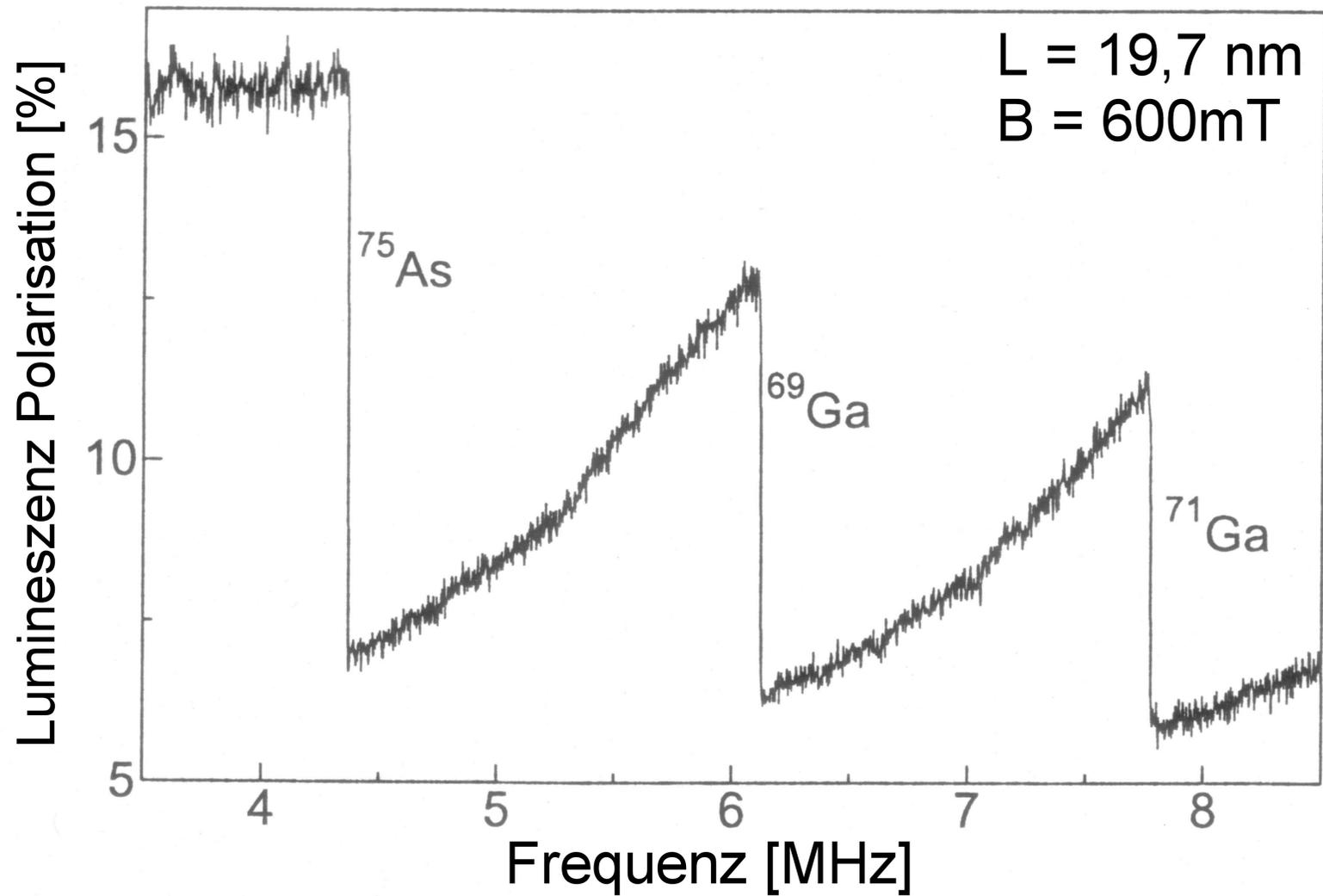
durchgezogene Linie: verschobene Hanle-Kurve

Bei Resonanz verschwindet die Kernspinpolarisation (der Komponente  $\square$ )

Die Hanle-Kurve verschiebt sich um Betrag der Resonanz

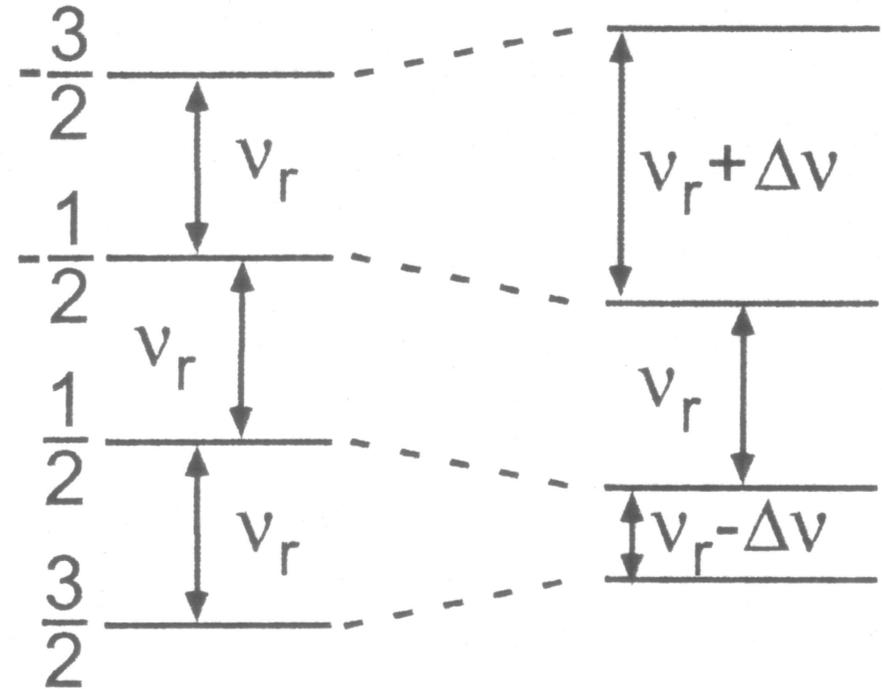
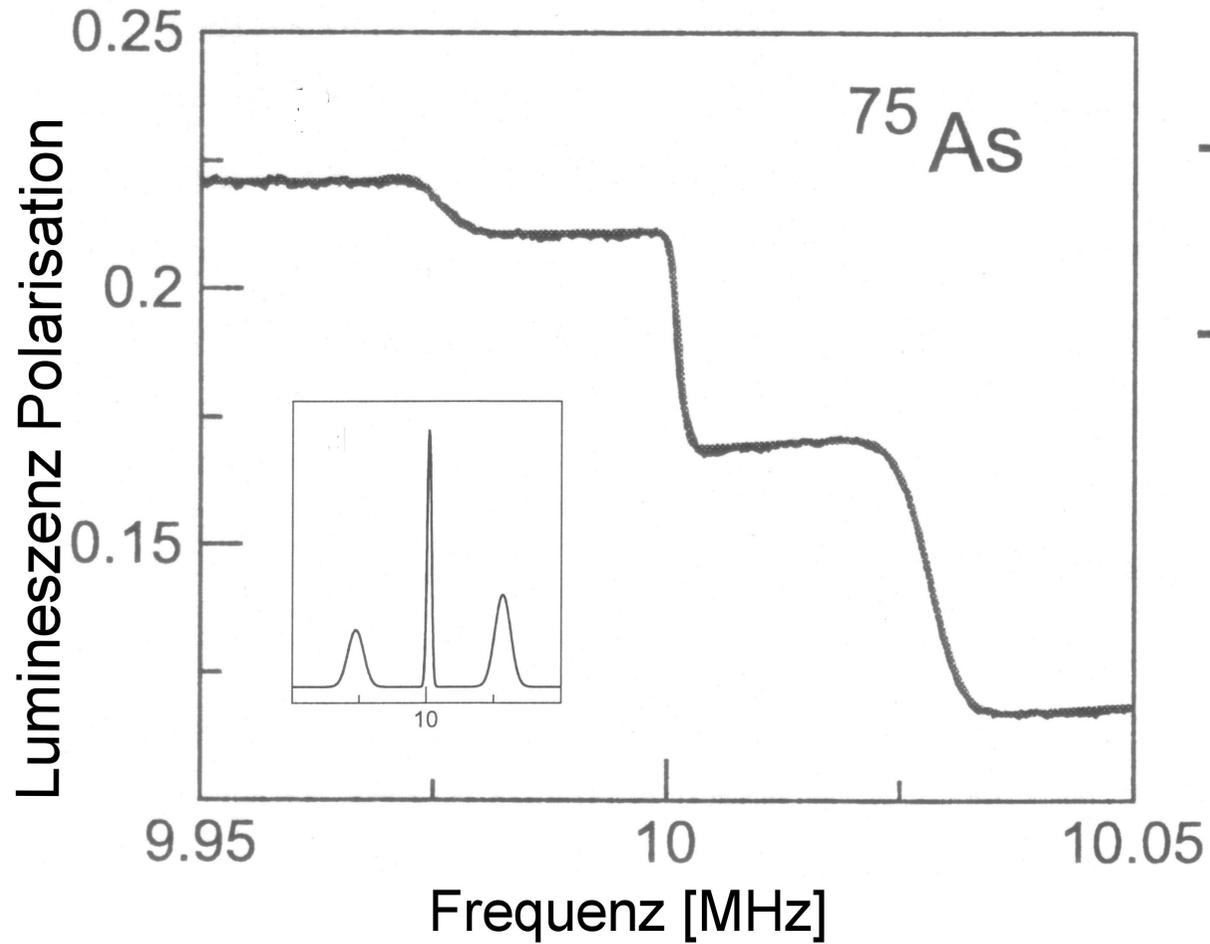
➔ Scharfe Kante

# ODNMR

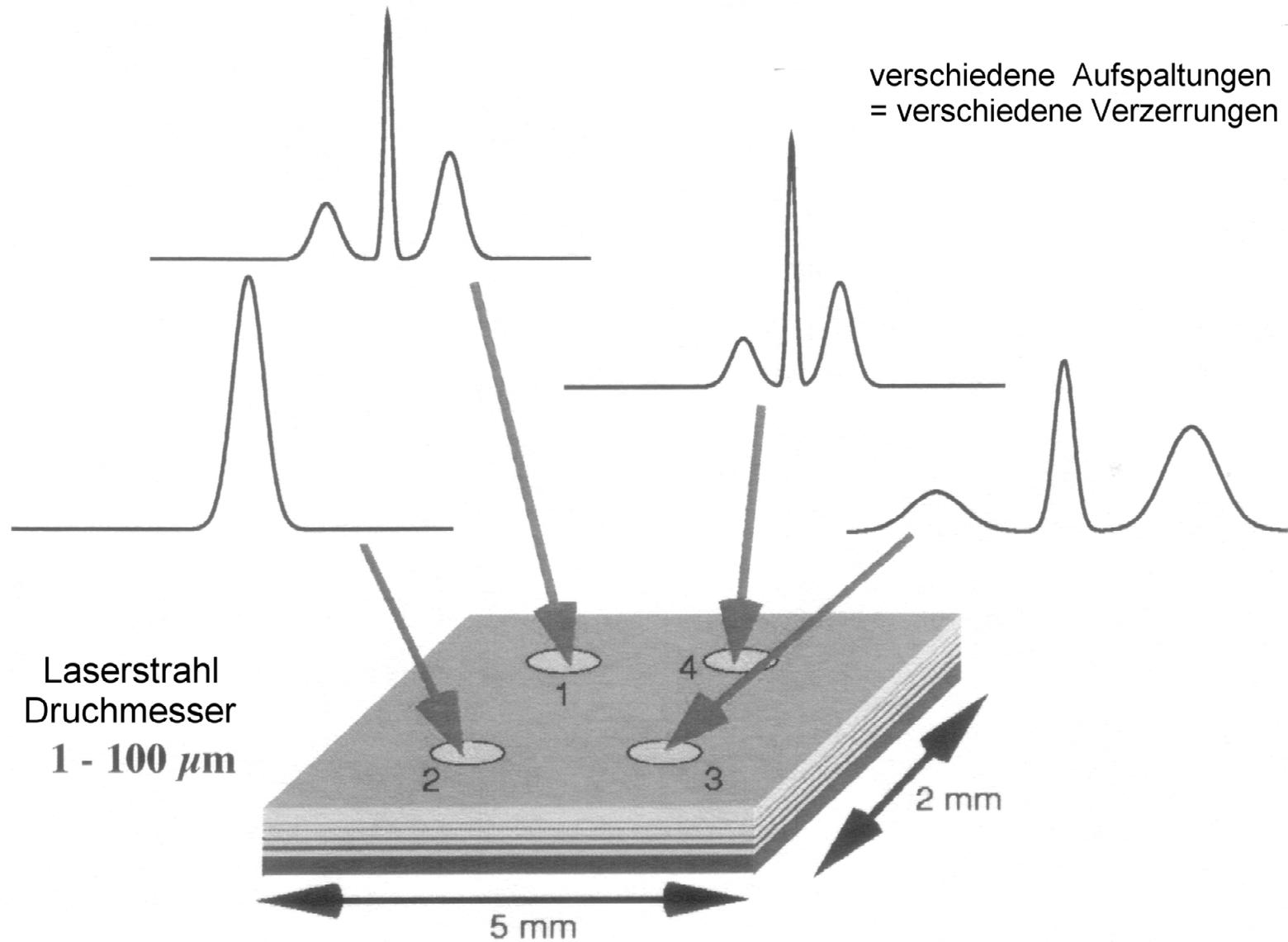


typisches ODNMR-Spektrum

# ODNMR (Quadropolaufspaltung)



# ODNMR



# Spektrales Lochbrennen

Zwei Laser

Pumplaser → Übergänge zwischen den Zuständen der Hüllenelektronen  
→ zeitunabhängige Population der Niveaus

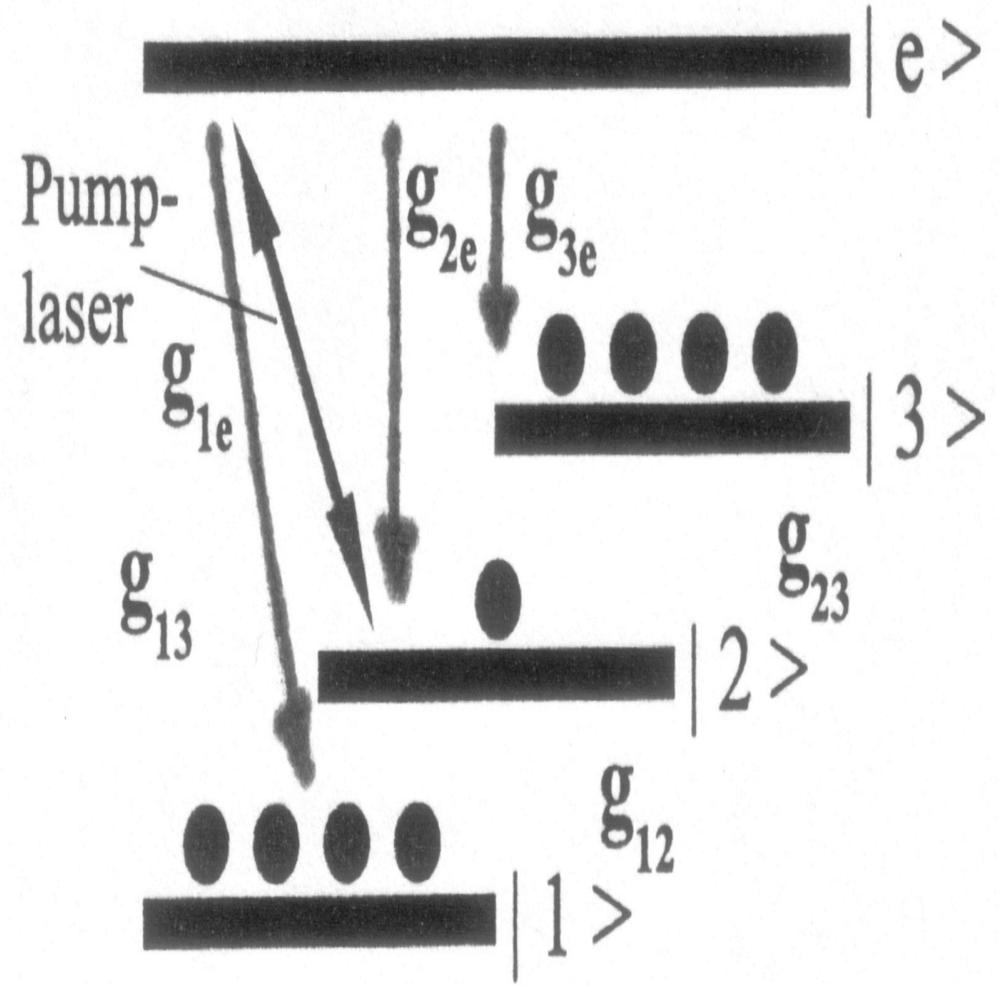
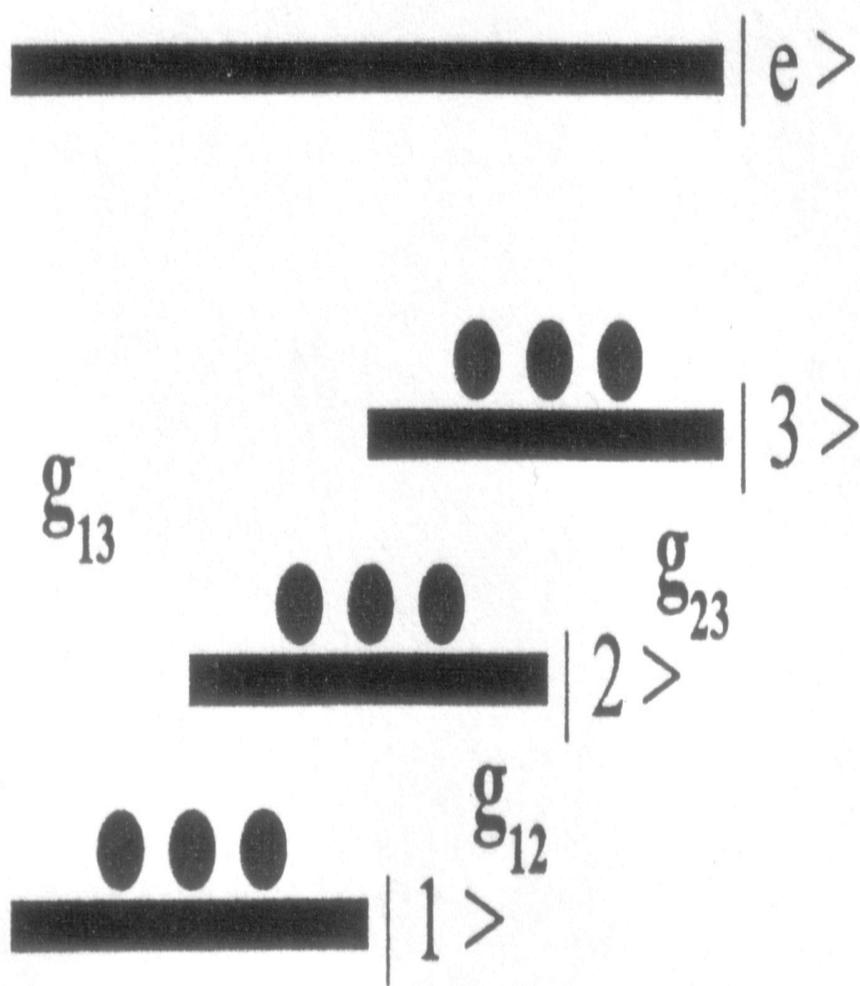
Testlaser → Variation der Frequenz  
→ schnelles Abtasten ( $\sim 2\text{GHz/s}$ ) damit der Teststrahl kaum Einfluss auf der Population der Niveaus ausübt.

Mit einer Photodiode wird die Transmission des Testlasers in Abhängigkeit seiner Frequenz aufgezeichnet.

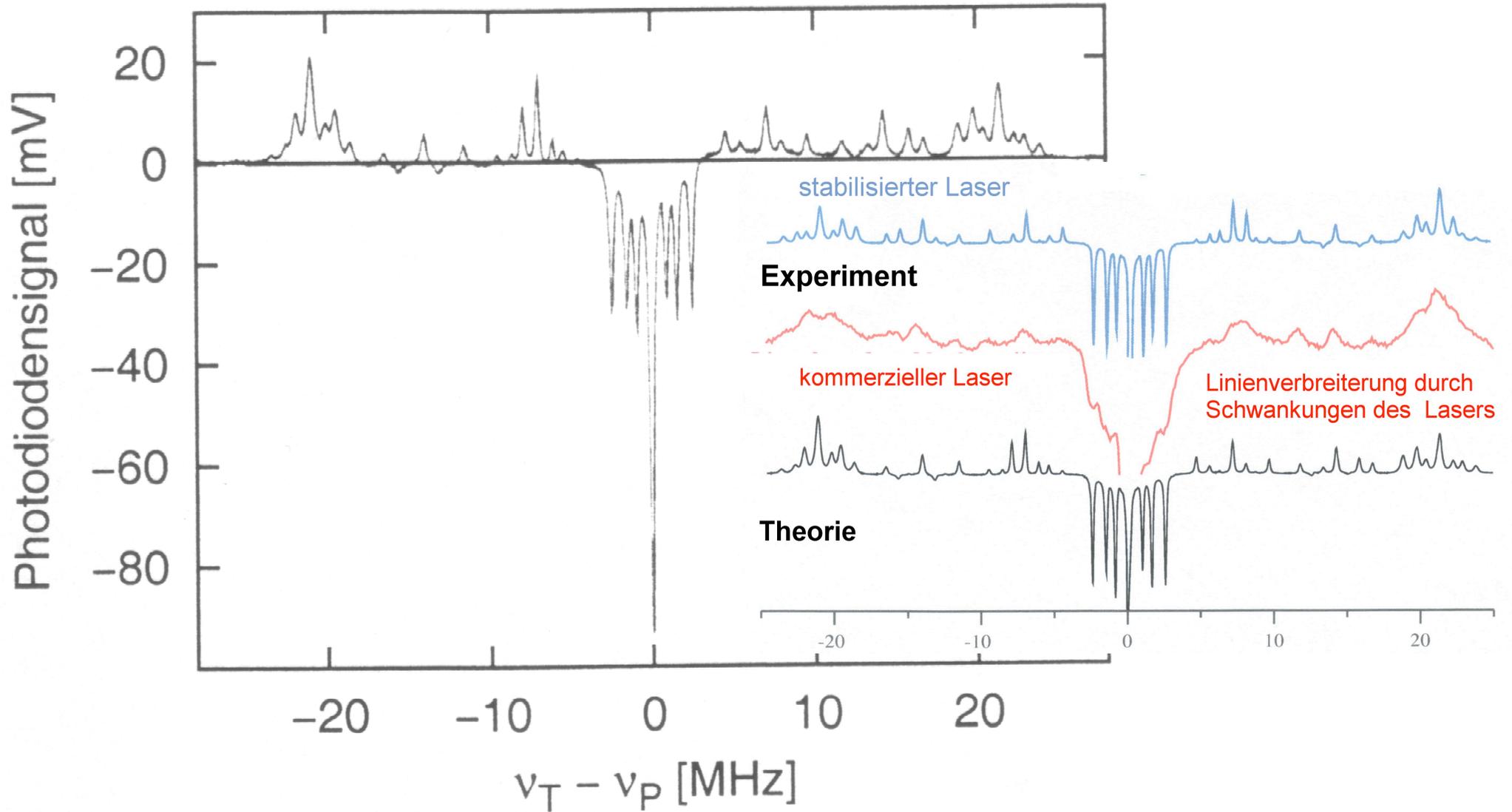
Bei Lochbrennspektroskopie werden zwei Messungen gemacht, wobei im einen Fall der Pumplaser aktiv ist und im anderen Fall nicht.

Das Differenzspektrum stellt dann die Auswirkung des Pumplasers dar.

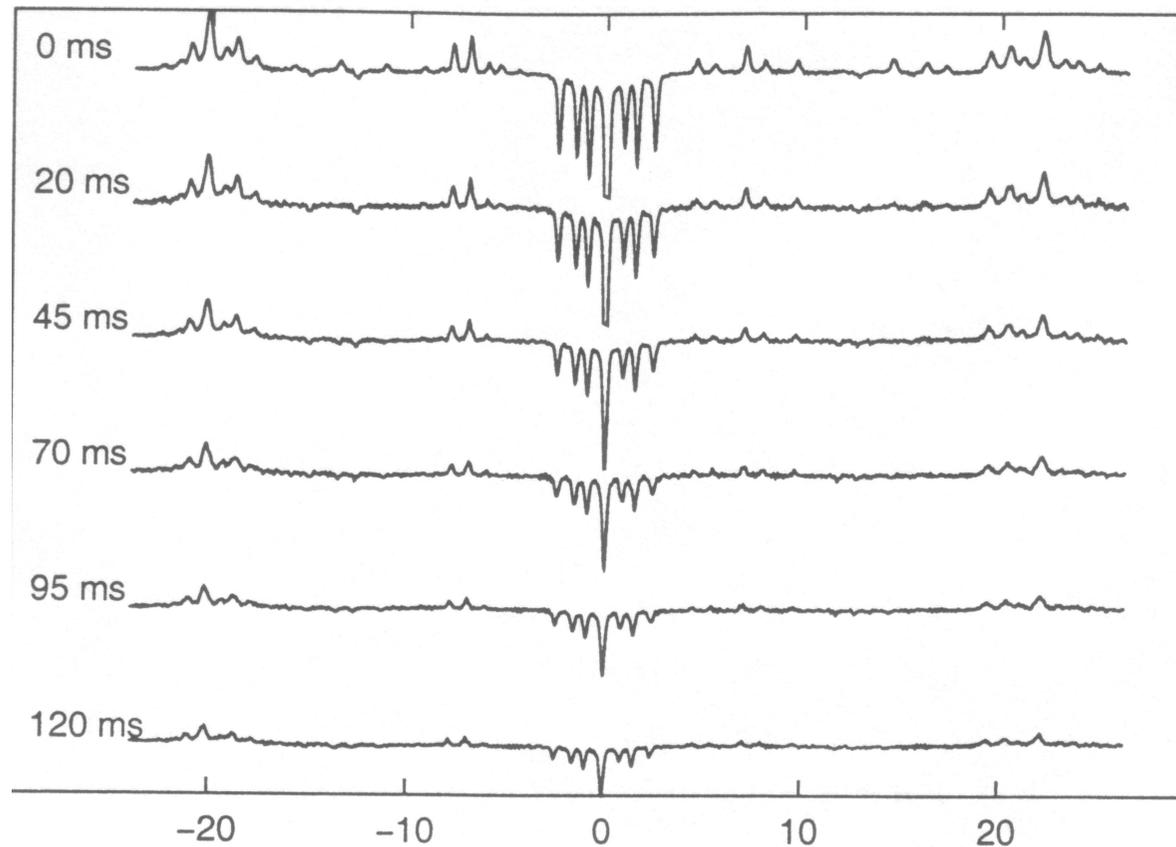
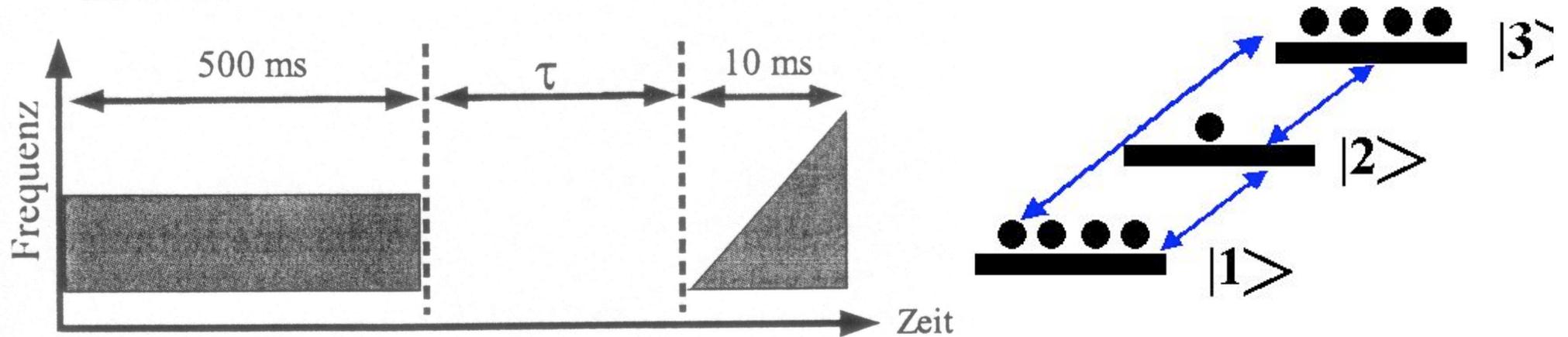
# Spektrales Lochbrennen



# Spektrales Lochbrennen

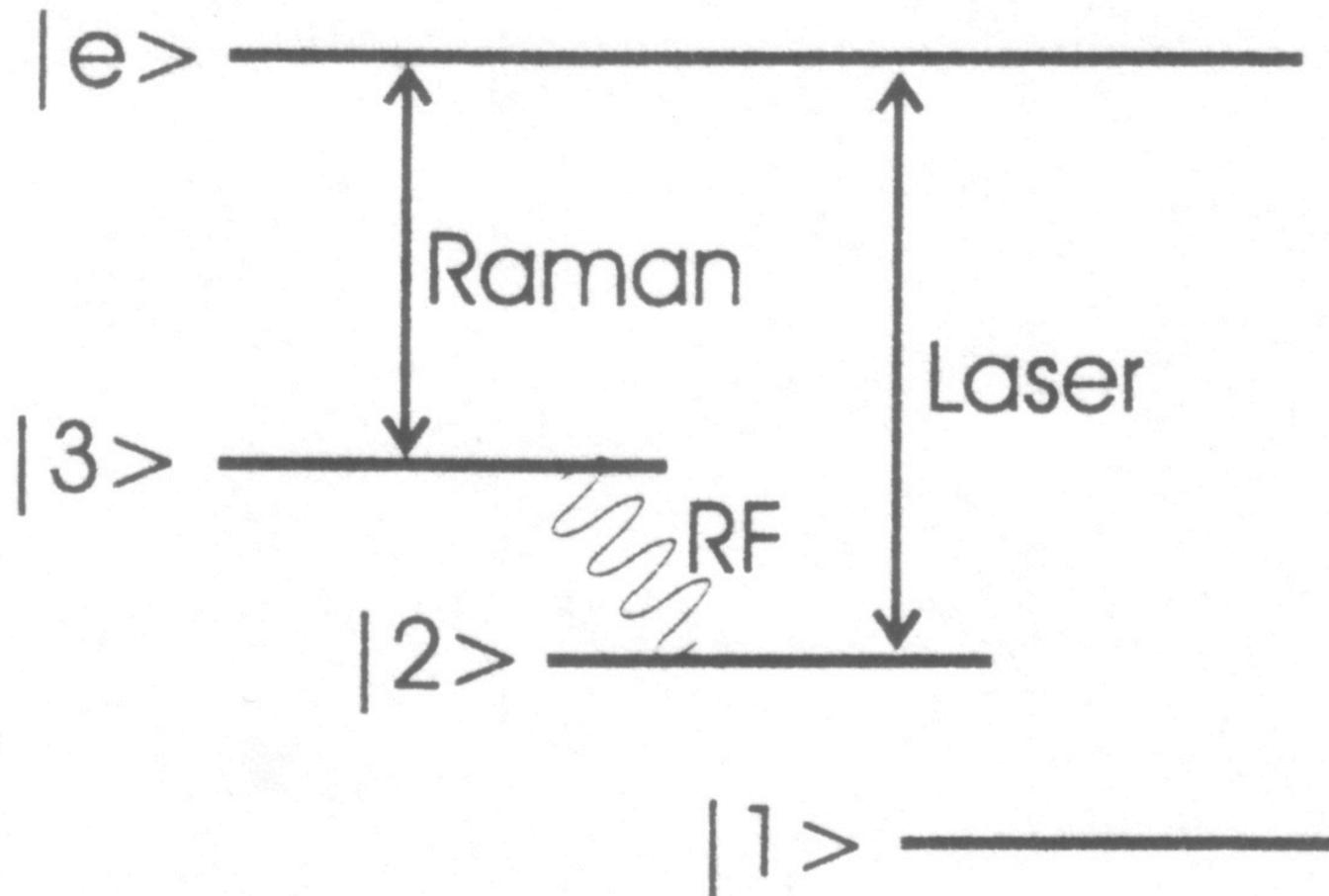


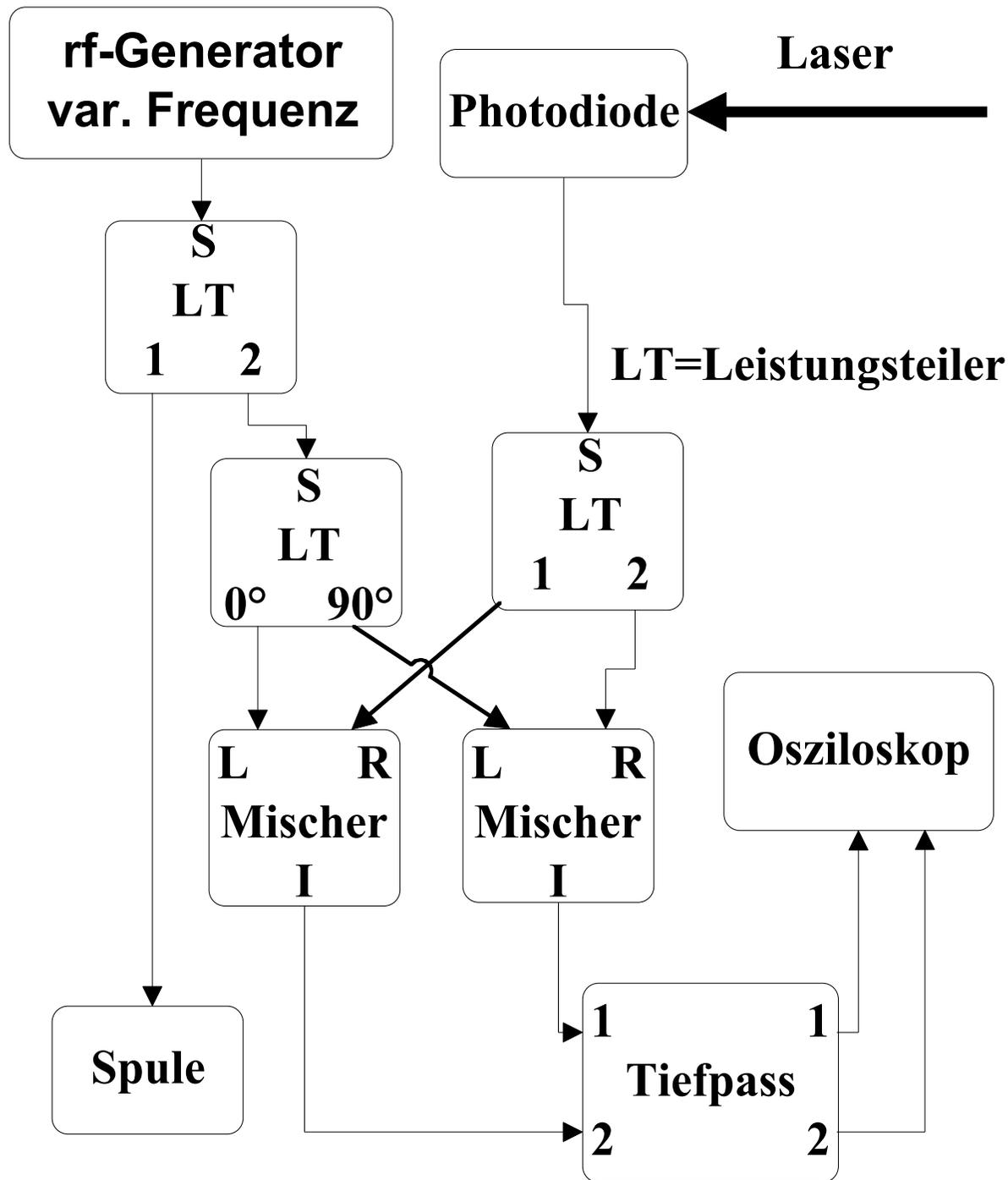
# Zeitabhängige Lochbrennspektroskopie



# Kohärente Ramanstreuung

- sehr genaue Bestimmung der Energieabstände von Energieniveaus
- Die Stabilität des Lasers nicht von entscheidender Bedeutung





# Kohärente Ramanstreuung

(Demodulationsschaltung)

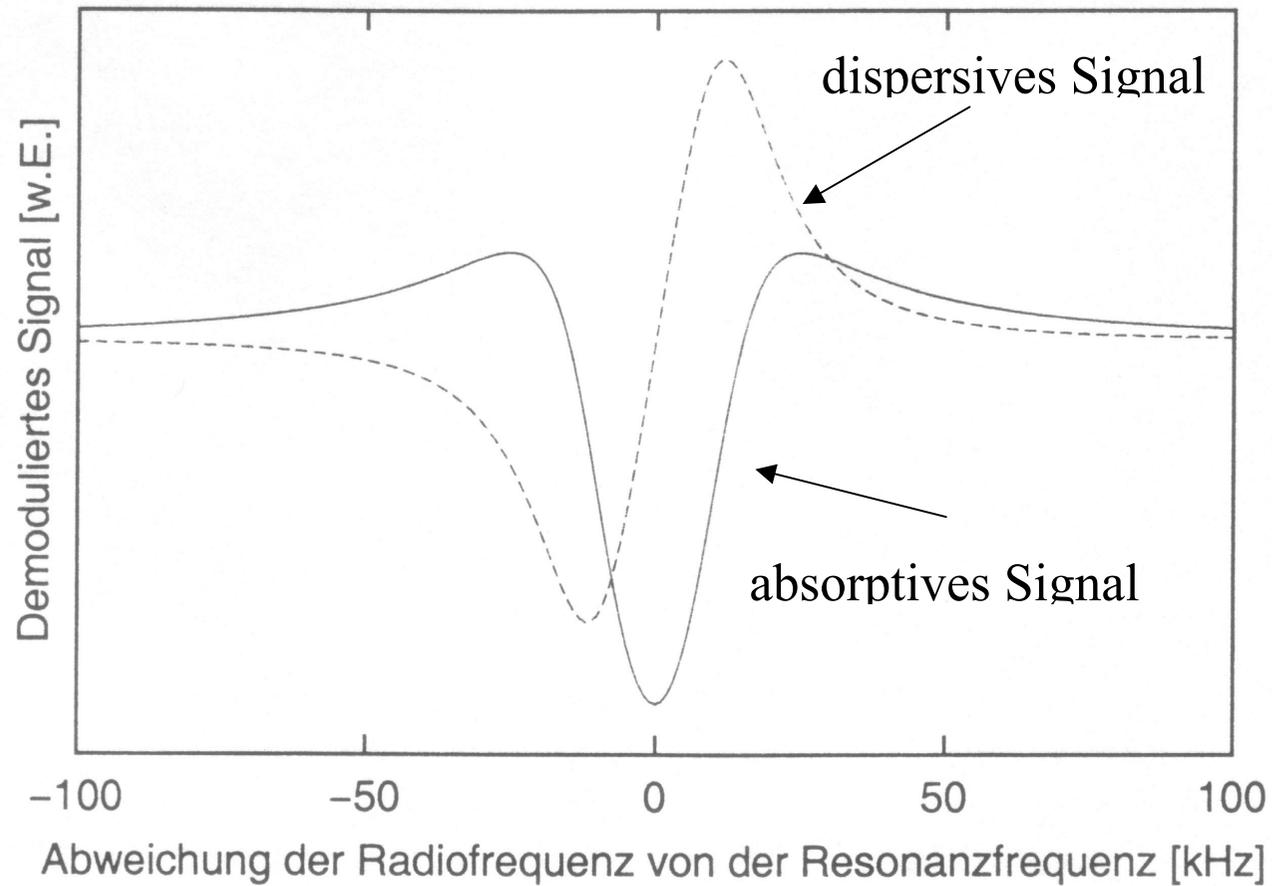
Modulation der Laserstrahl mit dem Ramanbeitrag

$$\rightarrow \square_L \square_R = \square_{rf}$$

→ Demodulation mit  $\square_{rf}$

→ null falls beide Frequenzen gleich sind

# Kohärente Ramanstreuung



# Kohärente Ramanstreuung

