

# Physik für Studierende der Medizin im 1. Fachsemester

(PFMF-V); 09410100

Dienstag mit Freitag 8.15-9.00

## Magnetresonanz – Teil 2

am 02.06.2021

Dr. Simon Moser  
Lehrstuhl für Exp. Physik IV,  
Universität Würzburg  
[simon.moser@physik.uni-wuerzburg.de](mailto:simon.moser@physik.uni-wuerzburg.de)



# Kompassnadeln in einem Magnetfeld

Spin  $\vec{J}$



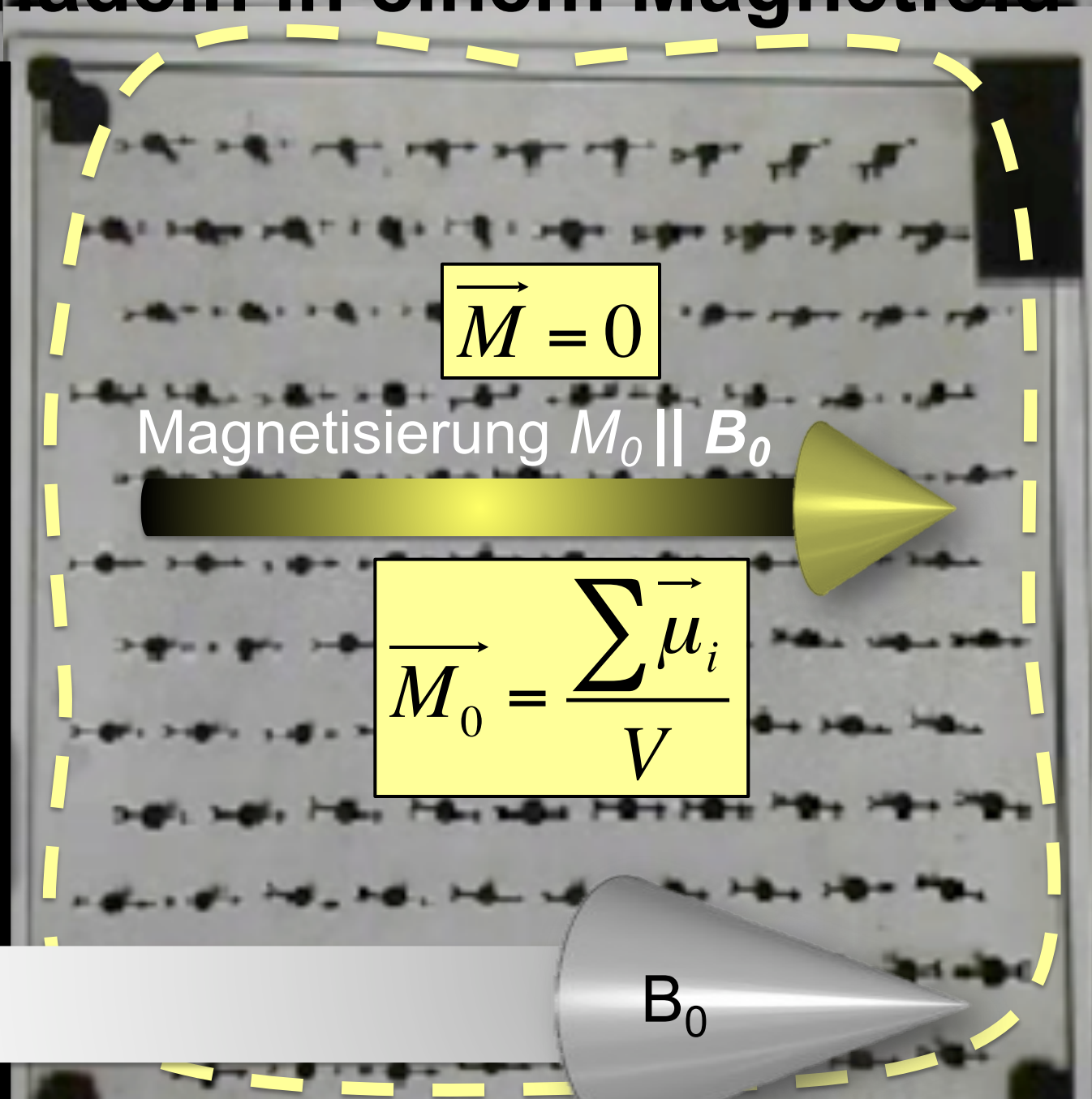
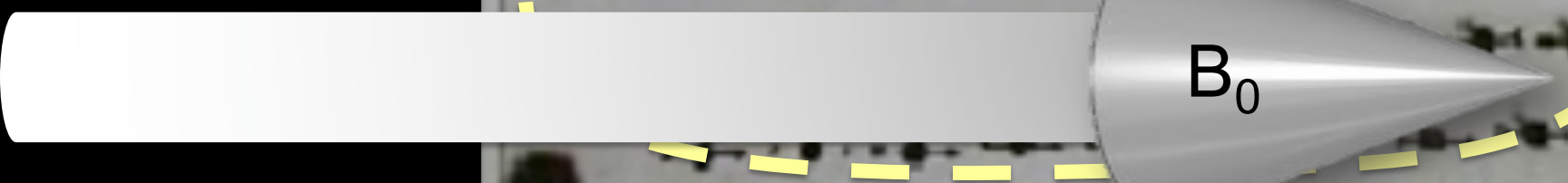
$$\vec{\mu} = \gamma \cdot \vec{J}$$

$$\vec{M} = 0$$

Magnetisierung  $M_0 \parallel B_0$

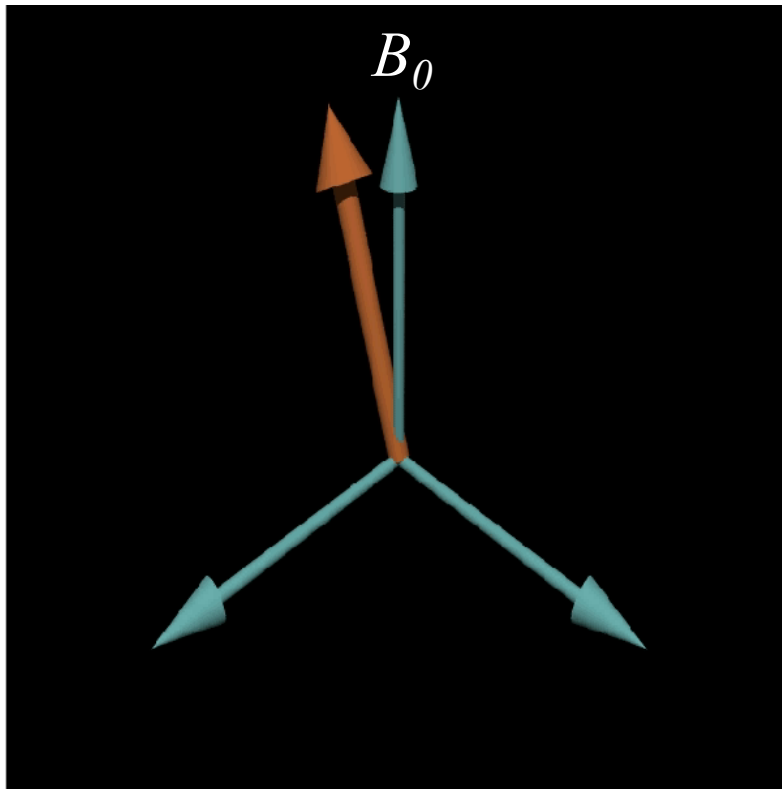
$$\vec{M}_0 = \frac{\sum \vec{\mu}_i}{V}$$

$B_0$



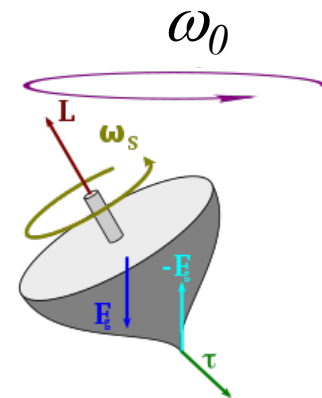
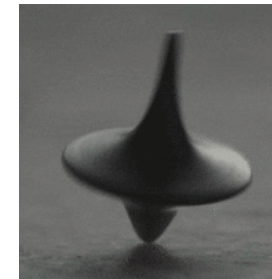
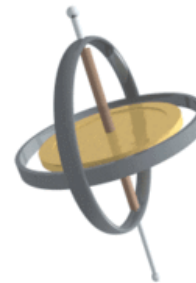
# Kernspins & Kreisel

## Verhalten im Magnetfeld II: Larmorbedingung



$$\omega_0 = \gamma B_0$$

$\omega_0 =$  Larmorfrequenz  
 $\gamma =$  Kernkonstante  
 $B_0 =$  Magnetfeld



Magnetisierung  $M$  im Magnetfeld dreht sich (präzediert) um die Magnetfeldachse

# NMR-Signalinduktion: Faraday-Effekt

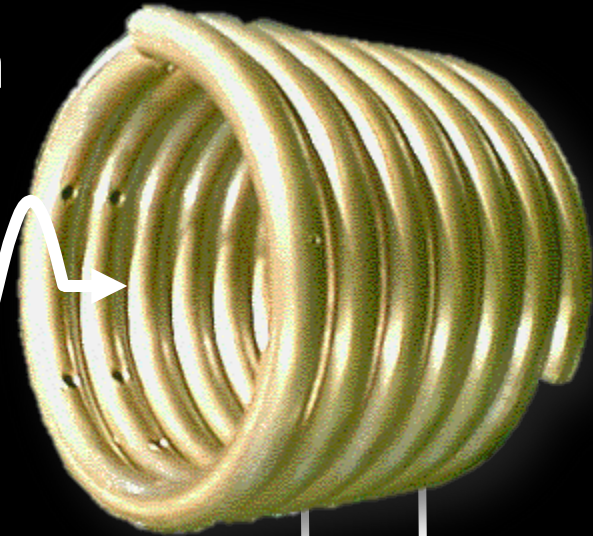
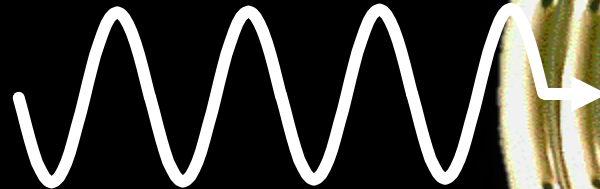
Präzedierende Magnetisierung  $M_{xy} \perp B_0$   
produziert ein Induktionssignal  $U_{ind}$



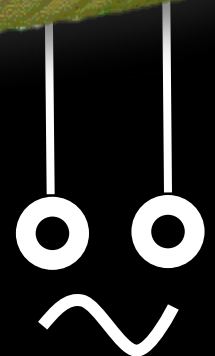
$B_0$

Faraday  
Signalinduktion

HF-Spule



$$U_{ind} = -\frac{\partial \phi(t)}{\partial t} \propto \omega_0$$

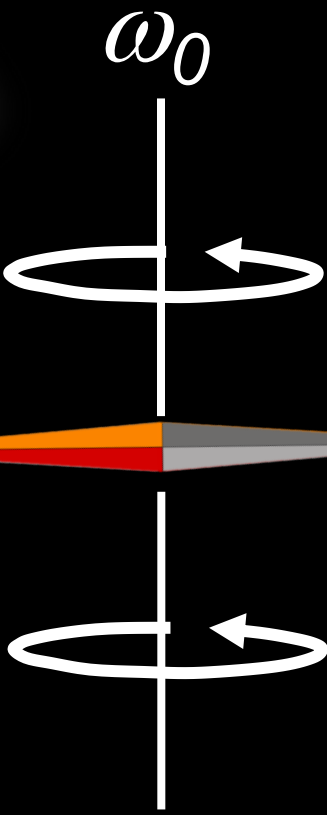


# NMR-Signalinduktion: Faraday-Effekt

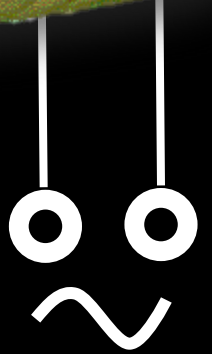
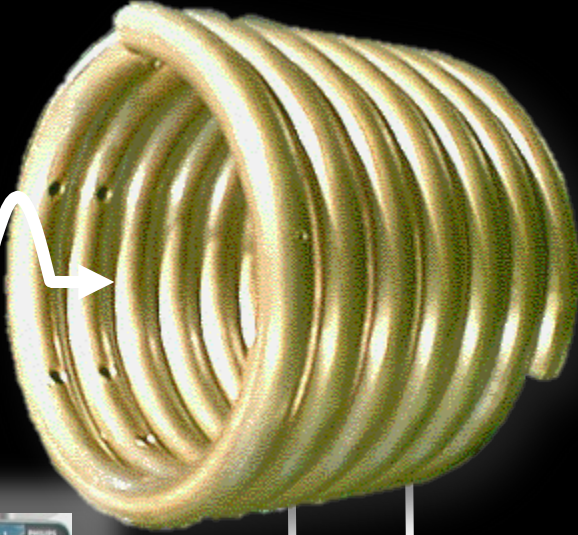
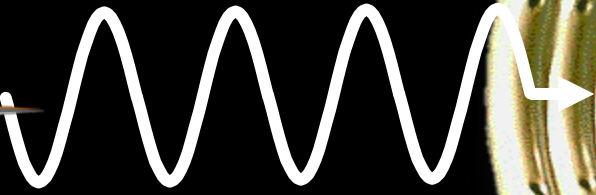
$$\omega_0 = \gamma \cdot B_0$$



HF-Spule



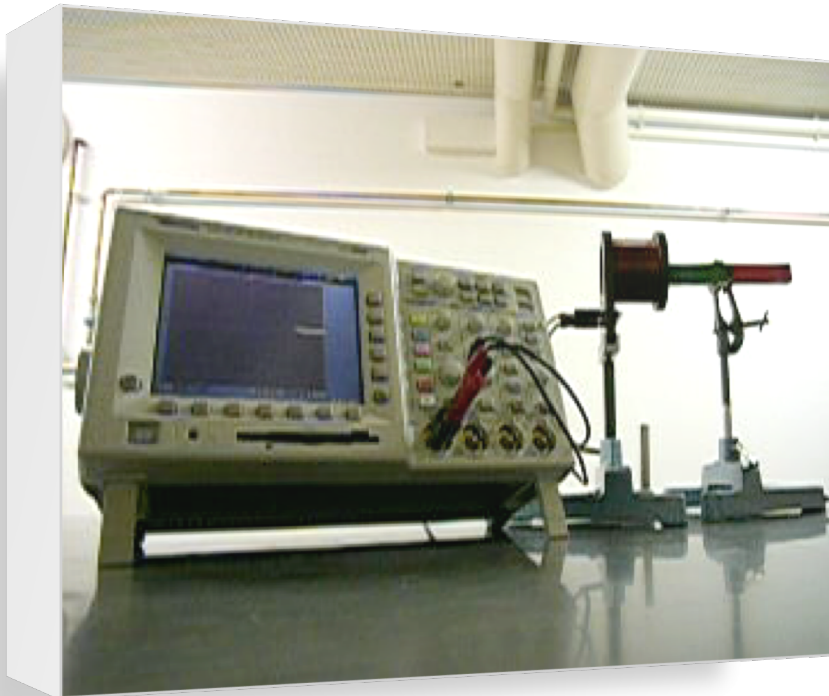
Faraday  
Signalinduktion



# NMR-Signalinduktion: Faraday-Effekt

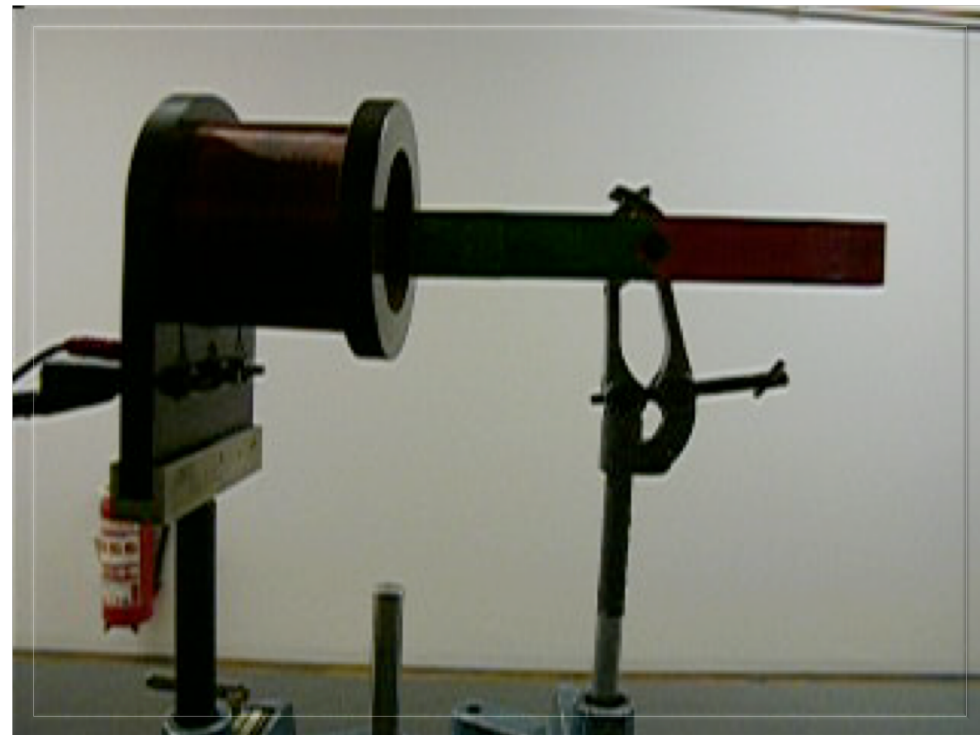
## *Resonanzprinzip & Induktionssignal*

**Oszilloskop**



**HF-Spule**

**Magnet**

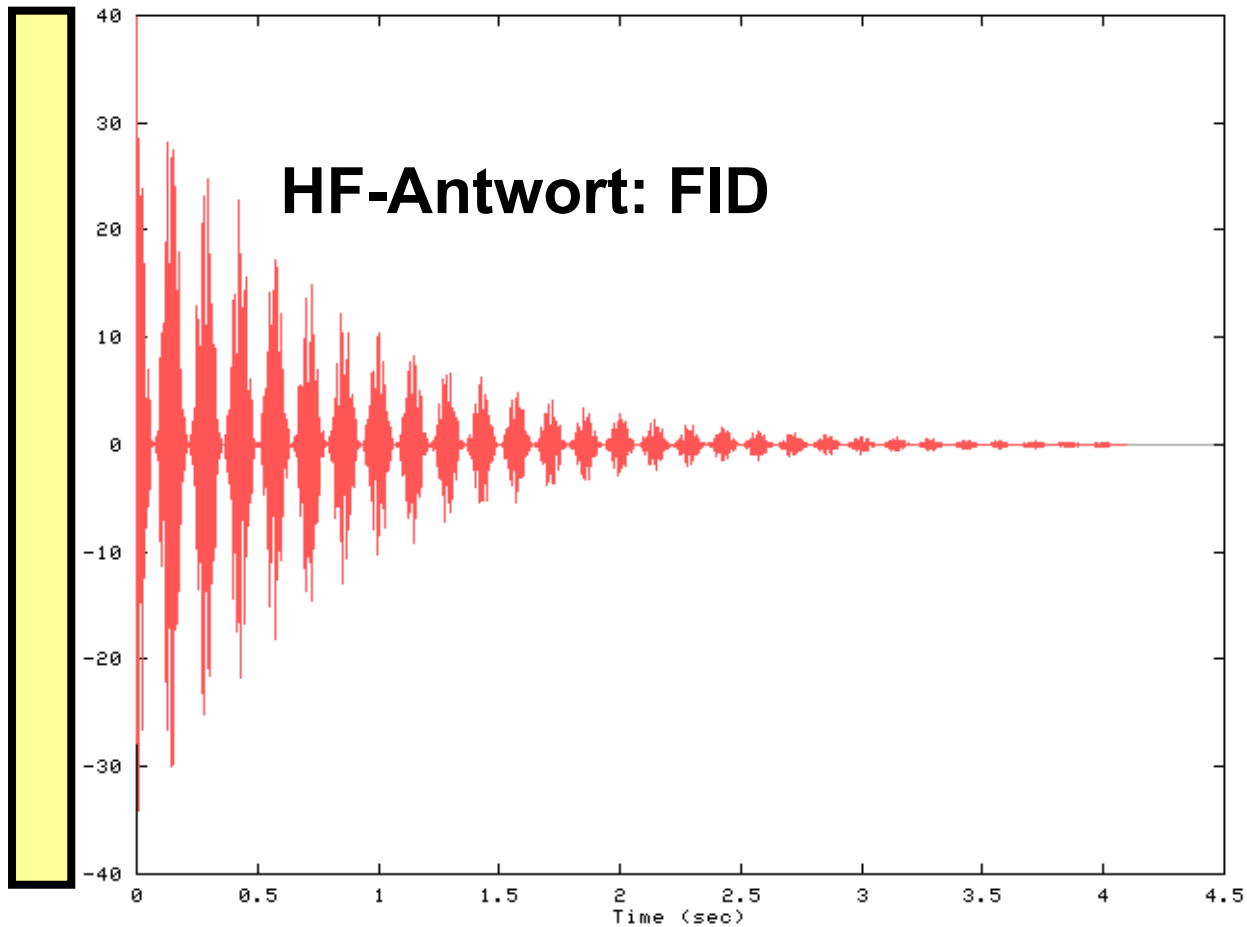


**Induktionssignal: FID**  
(Free Induction Decay)



# MR: HF-Anregung und Free Induction Decay

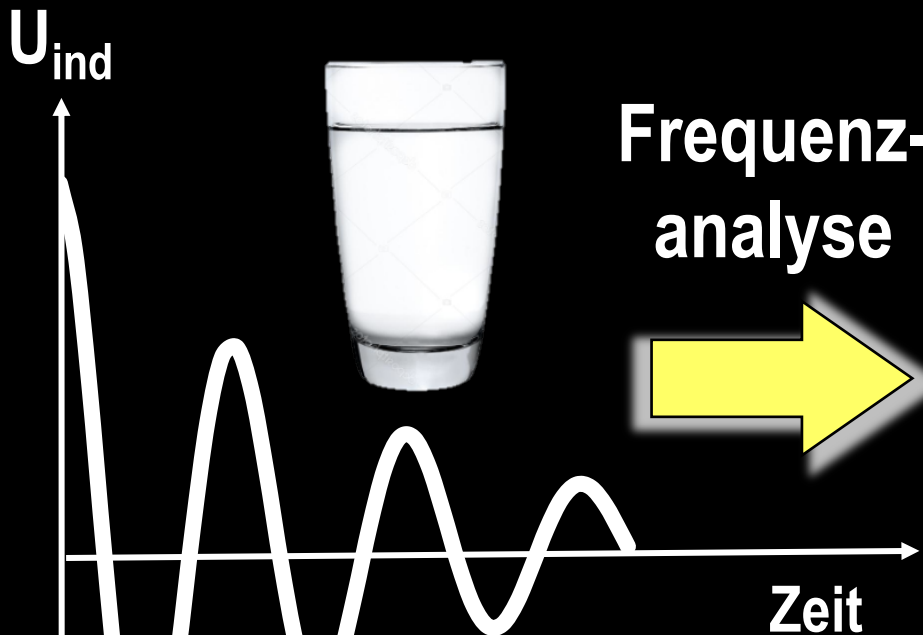
## HF-Anregung



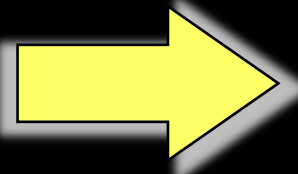
# Das NMR-Signal von H<sub>2</sub>O

NMR-Zeitsignal:

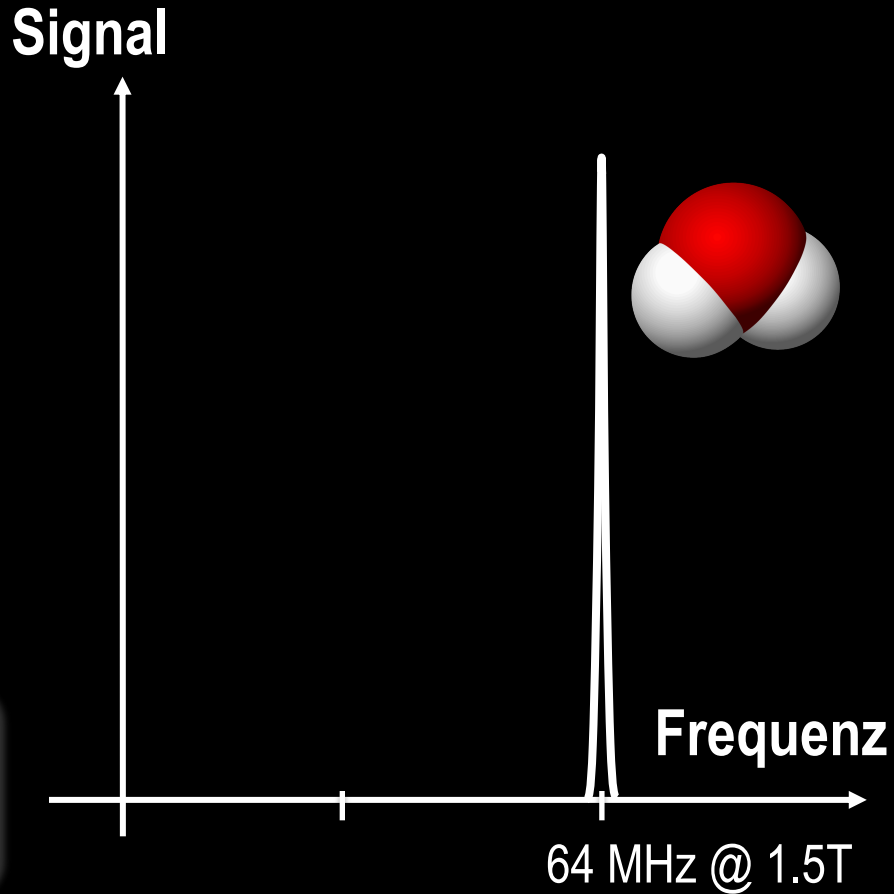
NMR-Frequenzsignal:



Frequenz-analyse



$$\omega_0 = \gamma \cdot B_0$$



# NMR: Die „Zutaten“



1) Spins



Magnetisches Moment

2) Hauptmagnetfeld



Ausrichtung & longitudinale Magnetisierung & Präzession

3) Hochfrequenz-Spule  
Anregung/Detektion



Erzeugung transversaler Magnetisierung & NMR-Signal-Induktion & NMR-Signalstärke

4) Relaxationszeiten

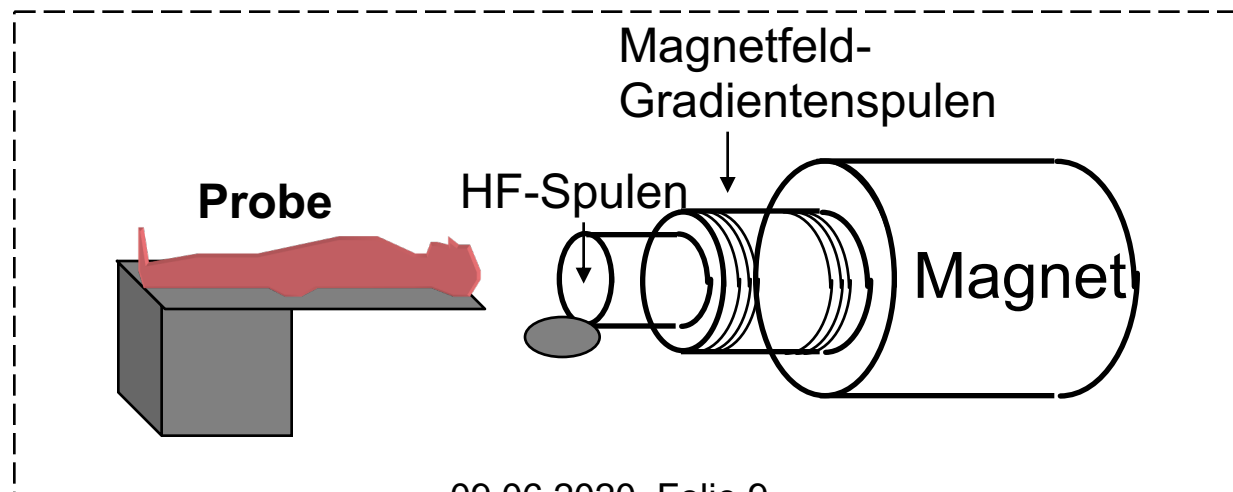


T1 & T2 Kontrast

5) Gradienten

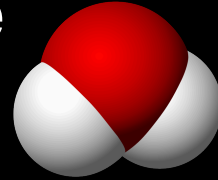


Ortskodierung /MR-Bild



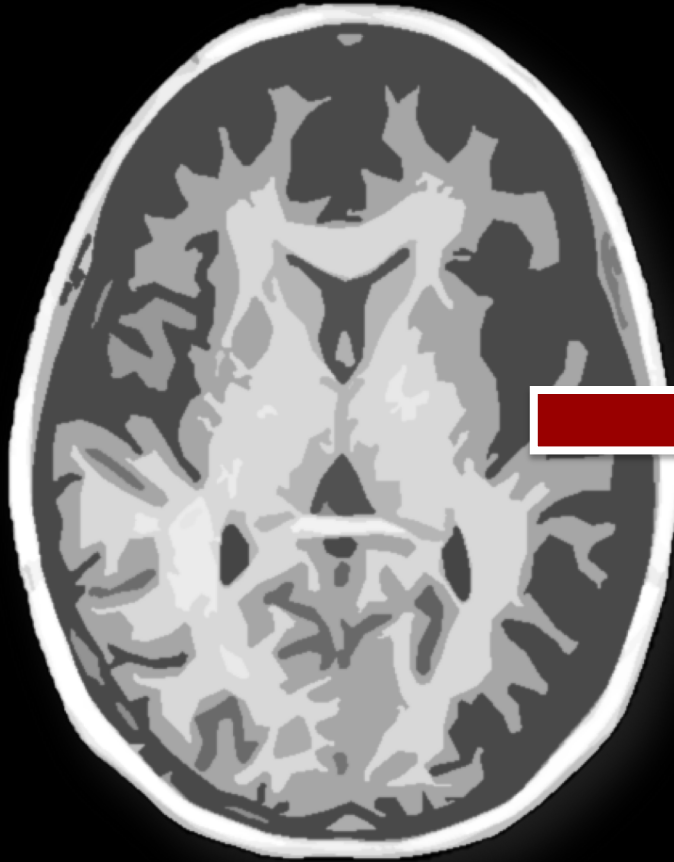
# Vom Spin zum Bild

Magnetisiertes Gewebe



FID-Signal

MRT-Bild



$$\omega_0 = \gamma \cdot B_0$$

# Singende Spins & NMR Bildgebung

## *Lauterbur's Milestone Beitrag*



**P. Lauterbur**



**N**

**Schlüsselidee:**  
**Magnetfeldgradienten**

$$\omega_0 = \gamma B_0$$



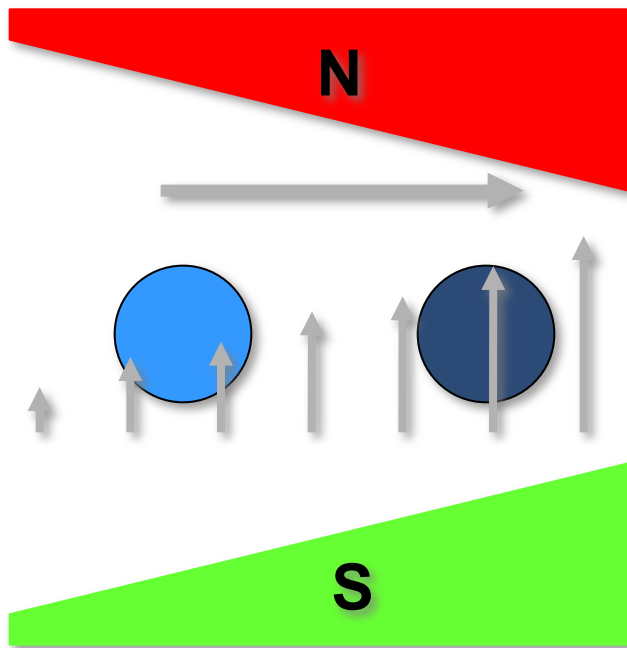
**S**

**KEINE räumliche  
Information !**

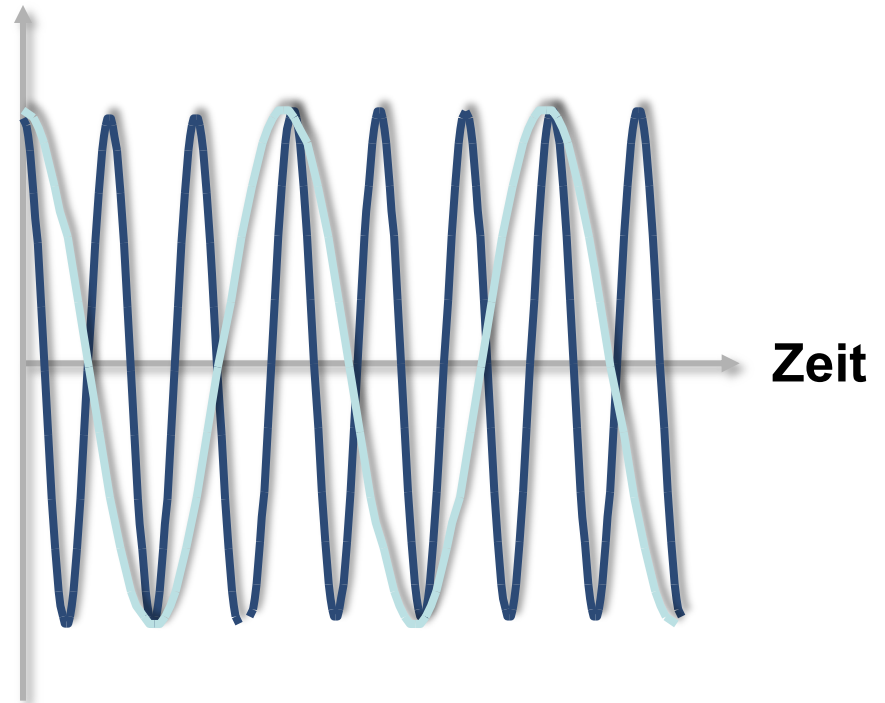
# Singende Spins & NMR Bildgebung

*Magnetfeldgradienten*

$$\omega_0 = \gamma B_0$$



Zeitsignal

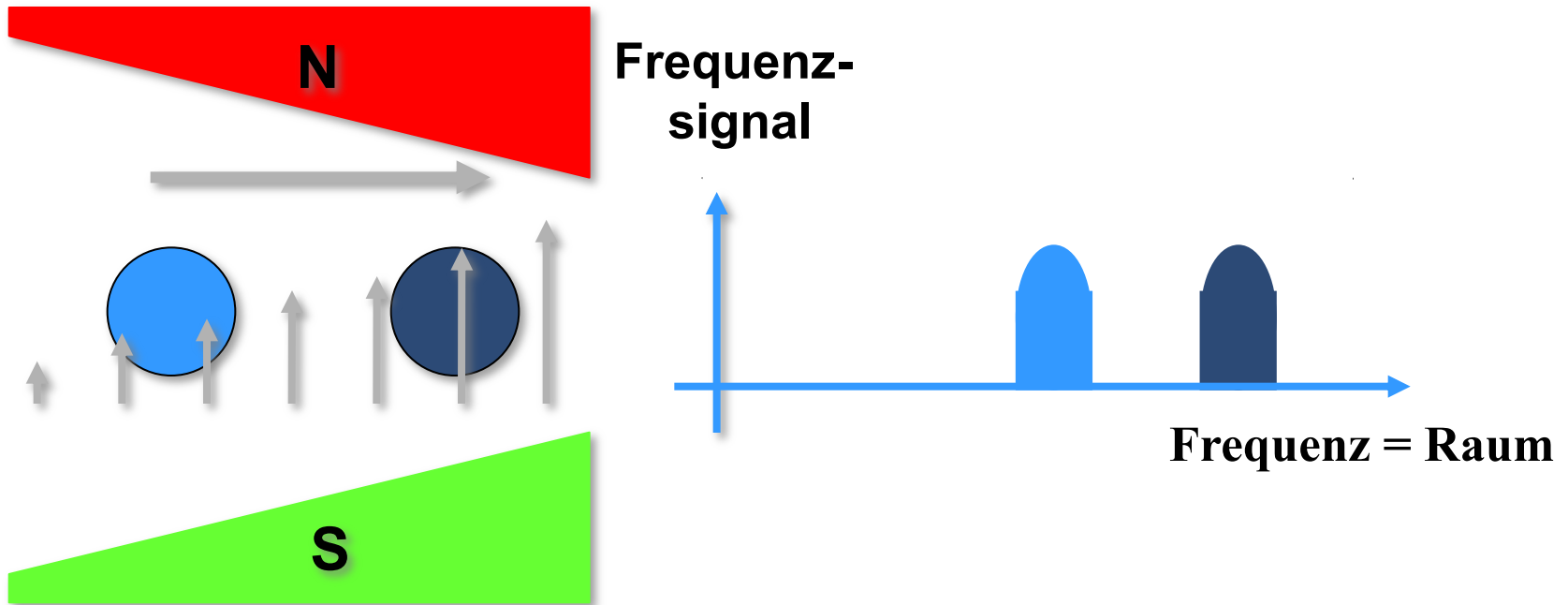


**Magnetfeldgradient  $G$ :**  
Eindeutige Zuordnung von Raum zu Frequenz

# Singende Spins & NMR Bildgebung

*Magnetfeldgradienten*

$$\omega_0 = \gamma B_0$$

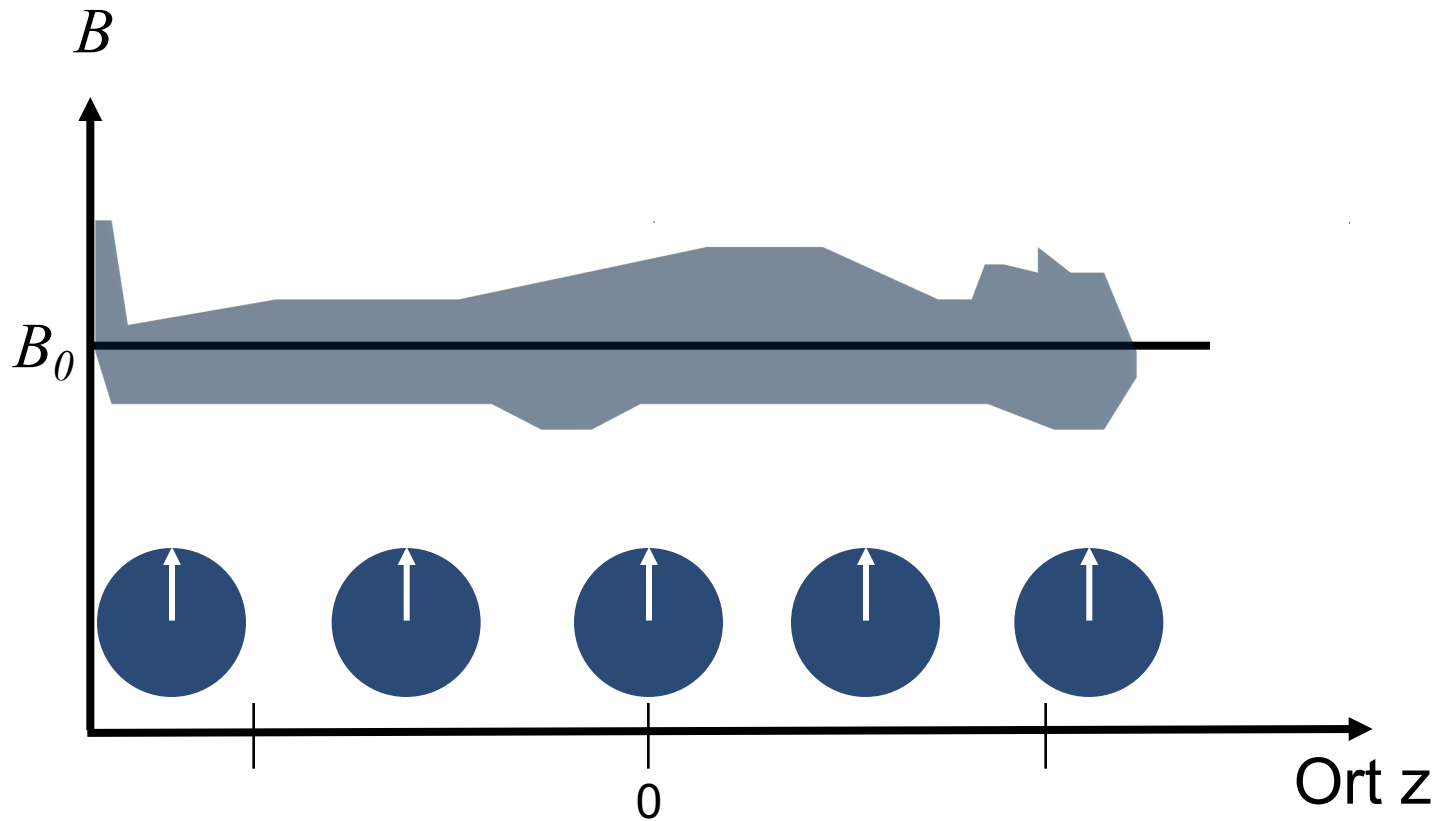


**Magnetfeldgradient  $G$ :**  
Eindeutige Zuordnung von Raum zu Frequenz

# Spins in einem Magnetfeld

Larmorfrequenz:

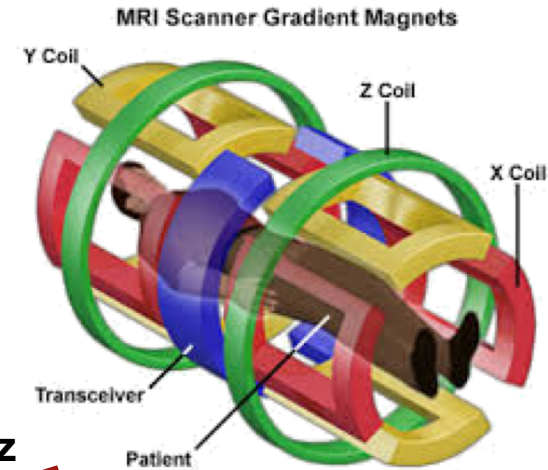
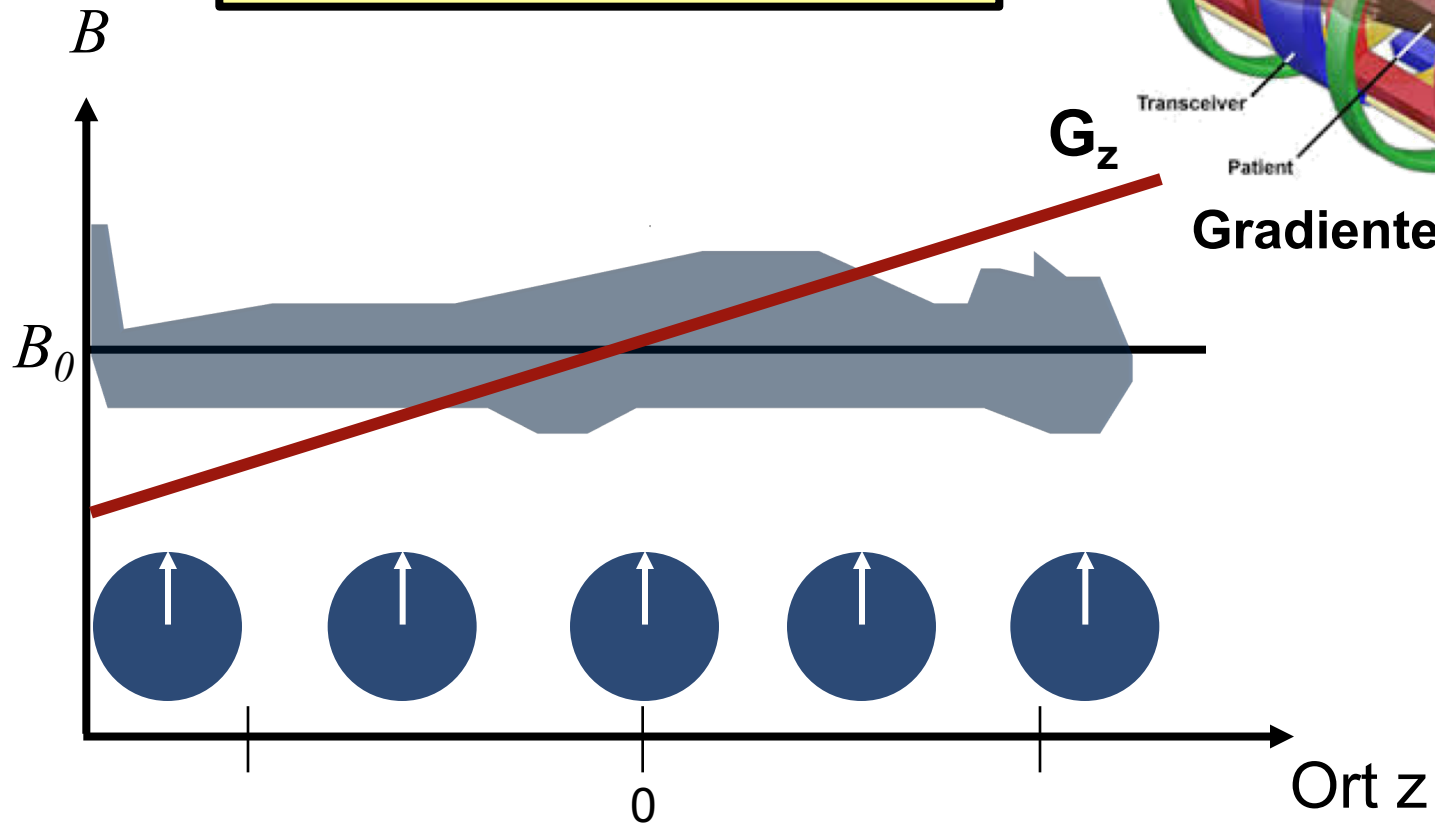
$$\omega_0 = \gamma \cdot B_0$$



# Magnetfeldgradienten

Larmorfrequenz:

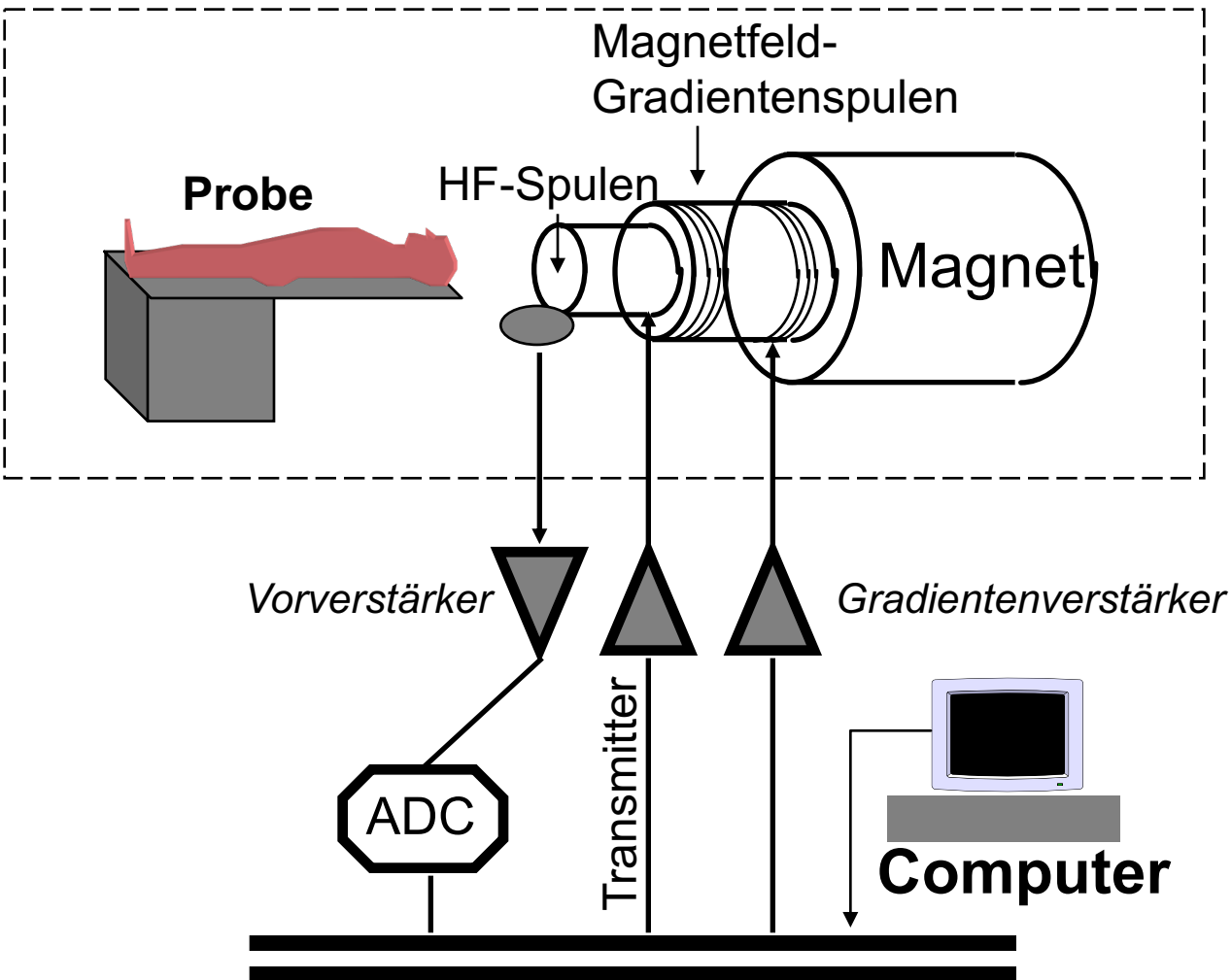
$$\omega(z) = \gamma \cdot (B_0 + G_z \cdot z)$$



Gradientenspulen

# Kernspintomograph

## Geräteaufbau



# Kernspintomographie

## *Eigenschaften*

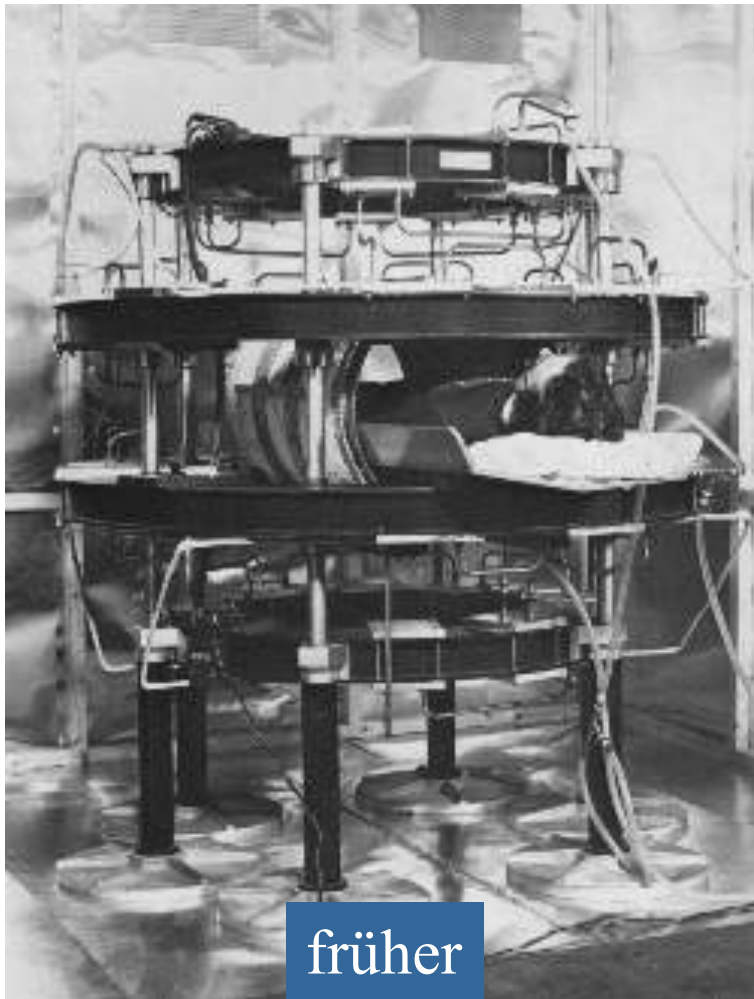


- zerstörungsfrei
- schmerzfrei
- nebenwirkungsfrei
- beliebig oft wiederholbar
- beliebige Schichtführung
- hoher Informationsgehalt
- hoher Gewebekontrast
- keine Herzschrittmacher

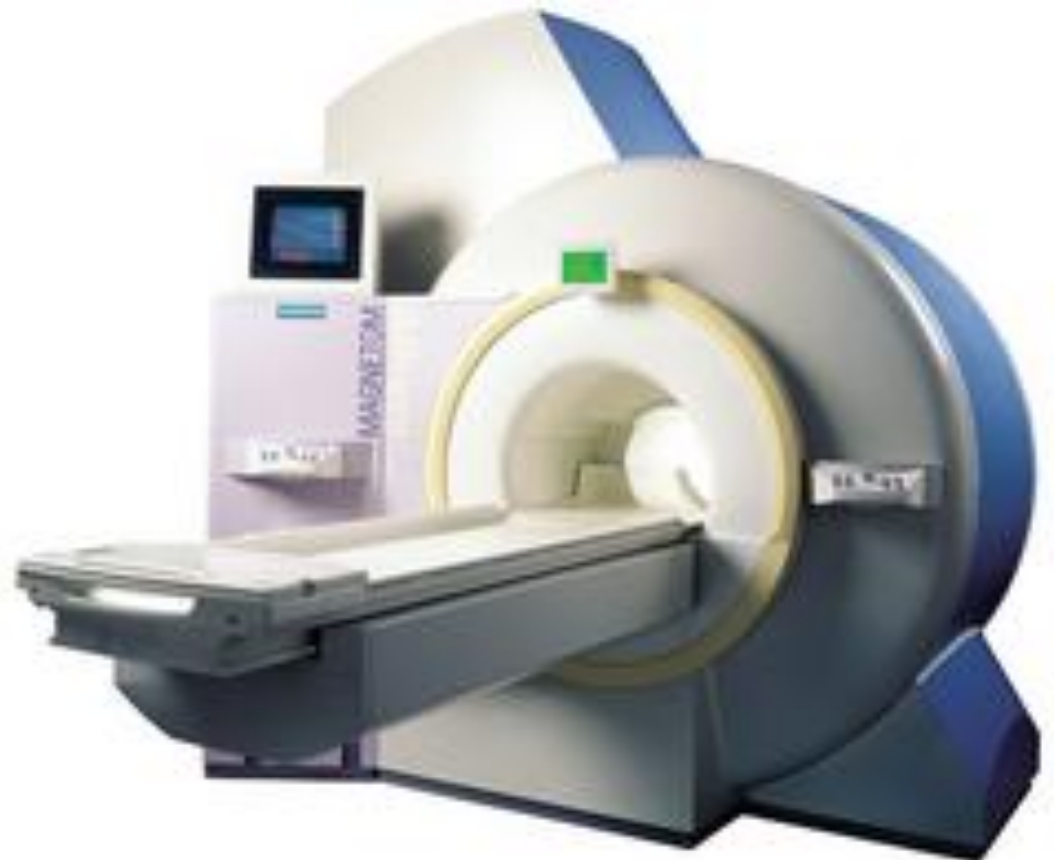
Forschungsmethode der Biophysik/Medizin zur  
Untersuchung von Pflanzen, Tieren und Menschen

# Kernspintomographie

*NMR-Ganzkörpergerät: 1.5-9.0 Tesla*



früher



heute



# Gerätetyp: Mikroskop

*Würzburger Hochfeldlabor @ 17.6 T*

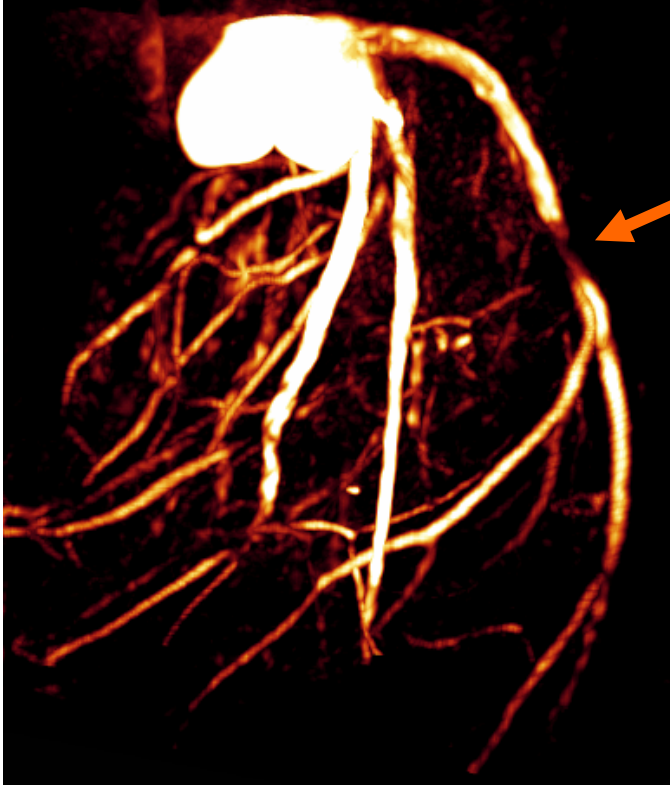


- 17.6 Tesla: ca. 440.000-fach stärker als das Erdmagnetfeld ( $B_{\text{Erde}} \approx 40 \mu\text{T}$ )
- *für Pflanzen & Kleintiere*



# NMR-Mikroskopie

## *Herzkranzgefäße*

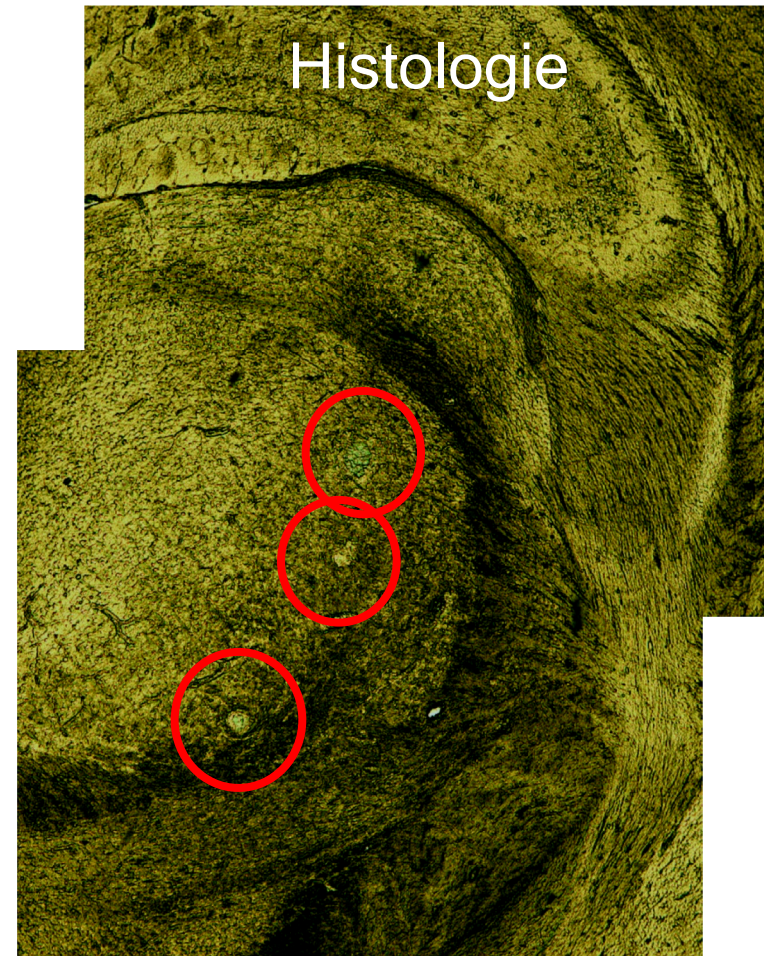


*Gefäßverengung*

# NMR-Mikroskopie

## *Darstellung von Alzheimer Plaques*

In vivo NMR, 45 min



# Kernspintomographie

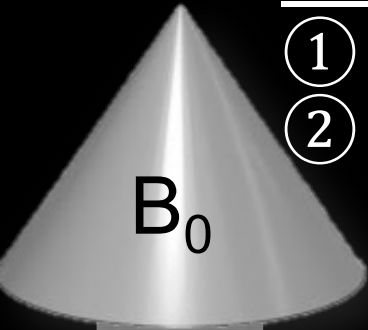
## *Informationsgehalt*

- **Wasserverteilung**
- **Wasserbewegung (Fluss, Diffusion)**
- **Gewebefunktion (Durchblutung, Aktivität etc.)**
- **Relaxationszeiten (T1, T2, T2\* etc)**
- **Chemische Information**
- .....

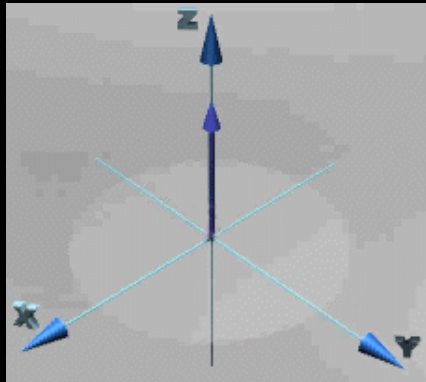
# T<sub>1</sub>-Relaxation in den Grundzustand

Ende:

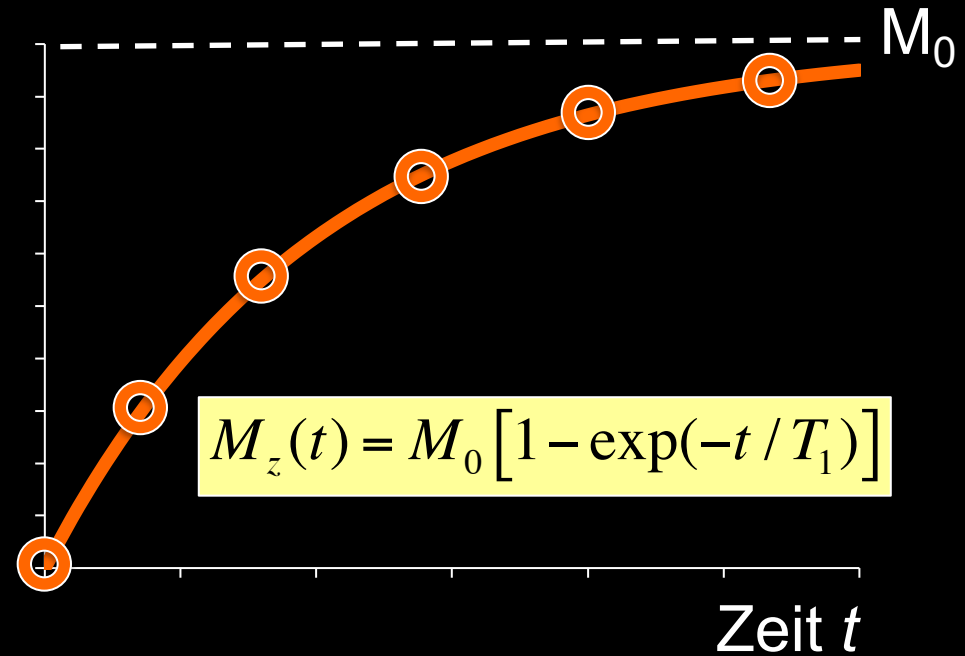
- ① Magnetisierung  $M_0 \parallel B_0$
- ② Keine Magnetisierung  $\perp B_0$



$B_0$



$M_z(t)$



Anfang:

T<sub>1</sub>: Zeit nach der sich 63% der longitudinalen Magnetisierung wieder aufgebaut hat

# Bedeutung der Relaxation

**Ohne Relaxation**



**Mit Relaxation**



# MR: Relaxationszeiten

- Nach **Störung** (HF-Impuls) eines im Gleichgewicht befindlichen magnetisierten Spinsystems, kehrt dieses über verschiedene „**Relaxationsmechanismen**“ in den Ausgangszustand zurück
- Dieser Prozess ist charakterisiert durch
  - ***Präzession der Magnetisierung um  $B_0$***
  - ***longitudinale Relaxation***
  - ***transversale Relaxation***