
 Magnetresonanztomographie

**Grundlagen  
Magnetresonanztomographie**

Lukas Scheef / Henning Boecker  
FE Funktionelle Neurobildgebung, Experimentelle Radiologie,  
Radiologische Universitätsklinik  
Sigmund-Freud-Str. 25 , D-53105 Bonn


1

 Magnetresonanztomographie


**GLIEDERUNG**

1. Physikalische Grundlagen MRT
2. Bilderzeugung
3. Erzeugung der grundlegenden Bildkontraste
4. (weitere Bildkontraste)

2


**Magnetresonanztomographie**


**Was ist Magnetresonanztomographie?**





„Die **Magnetresonanztomographie MRT**, kurz auch **MR**, ... ist ein **bildgebendes Verfahren**, das vor allem in der medizinischen Diagnostik zur Darstellung von Struktur und Funktion der Gewebe und Organe im Körper eingesetzt wird. Es **basiert** physikalisch auf den Prinzipien der **Kernspinresonanz** (engl. **Nuclear Magnetic Resonance**, NMR), ... , und wird daher auch als Kernspintomographie bezeichnet (umgangssprachlich gelegentlich zu Kernspin verkürzt). Die ebenfalls zu findende Abkürzung MRI stammt von der englischen Bezeichnung Magnetic Resonance Imaging...

Im Gerät wird keine belastende Röntgenstrahlung oder andere ionisierende Strahlung erzeugt oder genutzt. Allerdings sind die Wirkungen der magnetischen Wechselfelder auf lebendes Gewebe nicht vollständig erforscht.“

<https://de.wikipedia.org/wiki/Magnetresonanztomographie> vom 30.06.2015


**Magnetresonanztomographie**

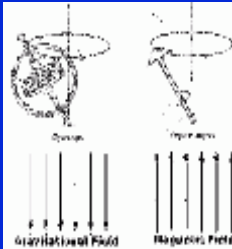

**Nuclear Magnetic Resonance**


F. Bloch    Nobel-Preis in Physik (1952)    E. Purcell

Die Kerne einiger Elemente absorbieren und (re)emittieren Hochfrequenzenergie, wenn diese in ein Magnetfeld gebracht werden.


Atome mit ungerader Anzahl an Protonen/Neutronen haben ein **Drehmoment** in einem Magnetfeld (**SPIN**)

Nuclear:    Eigenschaften des Kerns  
Magnetic:    Magnetisches Feld notwendig  
Resonance:    Interaktion zwischen Kern und Hochfrequenz-Pulsen



Magnetresonanztomographie

**Welche Elemente haben nun einen Kernspin?**



Atomkerne mit einer ungeraden (unpaaren) Nukleonenzahl haben einen „Nettokernspin“

Beispiele:

- Wasserstoff  $^1\text{H}$
- Helium  $^3\text{He}$
- Lithium  $^7\text{Li}$
- Kohlenstoff  $^{13}\text{C}$
- Fluor  $^{19}\text{F}$
- Natrium  $^{23}\text{Na}$
- Phosphat  $^{31}\text{P}$

5

Magnetresonanztomographie

**Aber was ist ein Kernspin?**

Der Kernspin  $I$  ist der Gesamtdrehimpuls eines Atomkerns um seinen Schwerpunkt, aus der Summe der Spins und der Bahndrehimpulse der Kernbausteine.

$$\vec{I} = \sum_{i=1}^A (\vec{s}_i + \vec{\ell}_i)$$

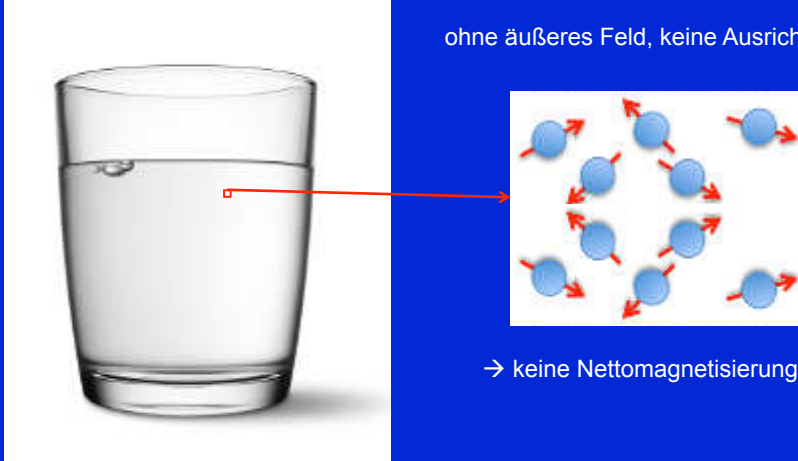
**Wie kann man sich nun den Kernspin praktisch vorstellen?**

Anschaulich verhalten sich Atome mit einem Kernspin wie eine Mischung aus Stabmagnet und Kreisel:

1. Stabmagnet → Ausrichtung in einem äußeren Magnetfeld
2. Kreisel → präzediert, wenn aus der Gleichgewichtslage gebracht

6

**Magnetresonanztomographie**



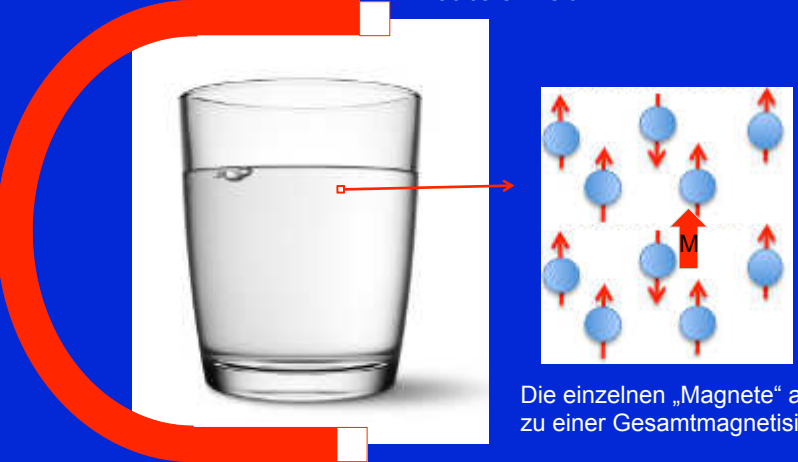
ohne äußeres Feld, keine Ausrichtung

→ keine Nettomagnetisierung  $M = 0$

Was passiert, wenn wir das Glas Wasser in ein Magnetfeld bringen?

7

**Magnetresonanztomographie**



Ausrichtung parallel oder antiparallel zum äußeren Feld!

Die einzelnen „Magnete“ addieren sich zu einer Gesamtmagnetisierung  $M$

Warum richten sich nicht alle parallel zum Feld aus ?

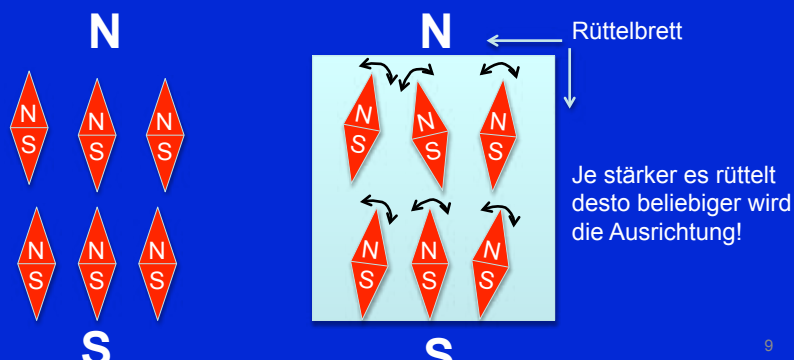
8

**Magnetresonanztomographie**

Die Brown'sche Molekularbewegung führt dazu, dass es zu einen ständigen Umklappen der Spins in die Gegenrichtung kommt. Je weiter wir vom absoluten Nullpunkt entfernt sind desto geringer ist die Nettomagnetisierung!

→ bei Körpertemperatur ~0.0003% der Protonen/T parallel zum Feld

**Analogie:** Kompenden auf einem Rüttelbrett



9

**Einschub ...**

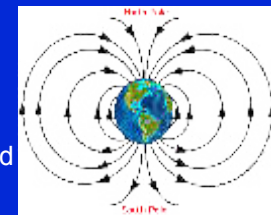
**Einheiten der magnetischen Feldstärke**

Tesla und Gauss sind Einheiten der magnetischen Feldstärke:

$1\text{Tesla} = 10,000\text{ Gauss}$

Größenordnungen:

- Magnetfeld der Erde: ~0.5 Gauss
- Feldstärke MRT Systeme: 1.5 – 3T
- MRT-Feld 30.000 - 60.000 X Erdfeld



Magnetresonanztomographie

Physikalisch hängt die Nettomagnetisierung von der Energiedifferenz beider Energieniveaus im Vergleich zur Größe der thermischen Energie ab...

$\gamma = \text{gyromagnetisches Verhältnis}$

11

Magnetresonanztomographie

**Was hat nun der Kernspin mit einem Kreisel zu tun?**

Kreisel im Schwerfeld der Erde

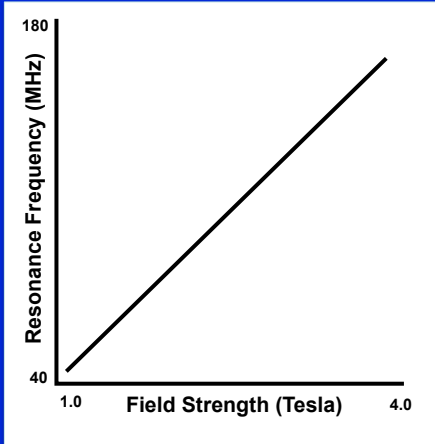
Die Protonen rotieren („präzedieren“) um die Feldlinien des äußeren Magnetfeldes mit einer bestimmten, von der Stärke des erzeugten Magnetfeldes abhängigen Frequenz (= **Lamorfrequenz**).

12

Universität  
Südkarlsruhe

## Magnetresonanztomographie

### Wie schnell drehen sich die SPINS?



Der SPIN hängt von der Feldstärke ab:

Larmor-Gleichung:

$$f = \gamma B_0$$

Für Wasserstoff:  $\gamma = 42.58 \text{ MHz/T}$

bei 1.5T:  $f = 63.76 \text{ MHz}$

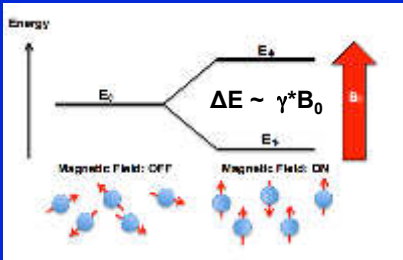
bei 3T:  $f = 127.7 \text{ MHz}$

$\gamma = \text{Gyromagnetisches Verhältnis}$

Universität  
Südkarlsruhe

## Magnetresonanztomographie

### Wie lässt sich die "Ausbeute" erhöhen?



→ Einstrahlen der benötigten Energie!

$$\Delta E \sim \gamma \cdot B_0$$

→ HF-Puls mit Larmorfrequenz

- Ein Radio - (RF) oder Hochfrequenzpuls (HF) wird absorbiert, sofern seine Frequenz der Larmor-Frequenz entspricht.
- Die Absorption der Hochfrequenzenergie führt zu einem Übergang in einen energetisch ungünstigeren Zustand = **Anregung** = Ausrichtung gegen das Magnetfeld.
- Ein HF-Puls mit einer anderen Frequenz führt zu keiner Zustandsänderung.

→ Das sind Eigenschaften von Resonatoren.

Universität  
Stuttgart

### Magnetresonanztomographie

**Was passiert, wenn die Larmorfrequenz eingestrahlt wird?**

The diagram illustrates the process of nuclear excitation. On the left, an energy level diagram shows two states,  $E_{\downarrow}$  and  $E_{\uparrow}$ , with an energy gap  $\Delta E = \gamma \cdot B_0$ . When the magnetic field is off, spins are randomly oriented. When the field is on, they align along the z-axis. An RF pulse (represented by a wavy arrow) causes a transition of spins from the lower to the upper energy state. This is visualized in the Bloch sphere (middle) where the magnetization vector  $M$  is tipped away from the z-axis. The resulting vector diagram (right) shows the magnetization vector  $M$  precessing around the z-axis at an angle  $\alpha = 60^\circ$ .


Universität  
Stuttgart

### Magnetresonanztomographie

**Was passiert, wenn die Larmorfrequenz nicht mehr eingestrahlt wird?**

The diagram shows the relaxation of magnetization after the RF pulse is turned off. It starts with the magnetization vector  $M$  tipped at an angle  $\alpha = 90^\circ$  (Excitation). When the RF pulse is turned off, the magnetization vector precesses around the z-axis. The longitudinal component of magnetization recovers towards its equilibrium value  $M_0$  through  $T_1$ -relaxation. The transverse component of magnetization decays due to  $T_2$ -relaxation, which is caused by dephasing of the spins.




Magnetresonanztomographie

## Woher kommt das MRT-Signal?

**In "Ruhe":**


- Ausrichtung der Protonen in einem äußeren magnetischen Feld parallel zu den Feldlinien.
- niedrigster Energiezustand

**Einstrahlung von HF (mit der Larmor-Frequenz):**

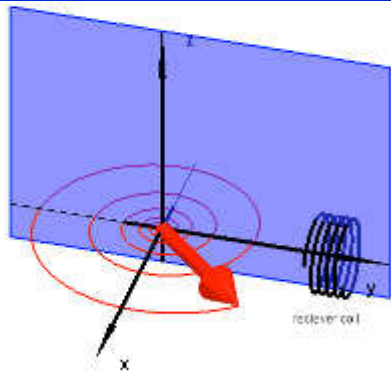
- Absorption der Energie und umklappen der Protonen antiparallel zum Feld
- hoher Energiezustand

**Nach der Einstrahlung der HF:**

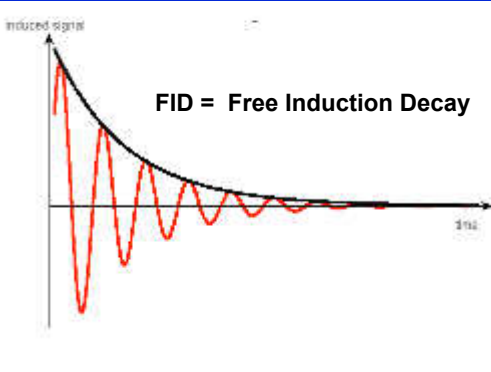
- Langsames Zurückklappen der Protonen in den Ausgangszustand
- Beim Umklappen wird HF mit der Larmor-Frequenz abgestrahlt


Magnetresonanztomographie

## Wie misst man das MRT-Signal?




receiver coil



induced signal

**FID = Free Induction Decay**

time

 Magnetresonanztomographie

## Wasserstoff ist das Hauptelement für MRI


Warum Wasserstoff?

- Wasserstoff ist das häufigste Atom im Körper (63% aller Atome).
- Elements mit einer geraden Ordnungszahl haben keinen Spin und können somit nicht abgebildet werden ( $^4\text{He}$ ,  $^{12}\text{C}$ ).
- $^{23}\text{Na}$  und  $^{31}\text{P}$  sind relativ häufig und können mit MR erfasst werden.

Die Larmor-Frequenz variiert zwischen den Elementen:

- $^{13}\text{C}$  = 10.7 MHz/T
- $^{19}\text{F}$  = 40.1 MHz/T
- $^{31}\text{P}$  = 17.7 MHz/T

→ Durch die Verwendung von HF-Pulsen geeigneter Frequenz können selektiv Elemente angeregt und damit untersucht werden.

 Magnetresonanztomographie

## GLIEDERUNG

1. Physikalische Grundlagen MRT
- 2. Bilderzeugung**
3. Erzeugung der grundlegenden Bildkontraste
4. (weitere Bildkontraste)

20

Universität  
Südkarlsruhe

## Magnetresonanztomographie

### Wie werden die Bilder erzeugt?

- Um räumliche Bilder zu erhalten ist es notwendig an unterschiedlichen Orten unterschiedliche Signale zu erzeugen.
- Einfachste Lösung:  
Überlagerung von zusätzlichen Magnetfeldern:  
sog. Gradienten
- Gradienten erhöhen bzw. erniedrigen die lokale Feldstärke (im Vergleich zu direkter Nachbarschaft)
- Lauterbur: erste MR-Bilder, 2003 Nobel-Preis




Lauterbur

Universität  
Südkarlsruhe

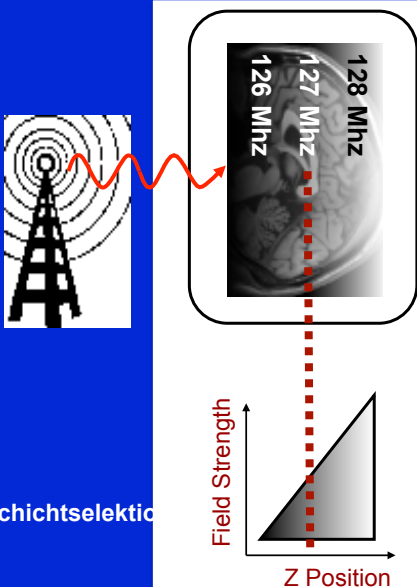
## Magnetresonanztomographie

### Grundprinzip:

Feldabhängigkeit der Larmorfrequenz

$$f = \gamma B_0$$

- Gradienten erhöhen oder erniedrigen lokal das magnetische Feld.
- Die Larmor-Frequenz ist feldabhängig → Larmor-Frequenz variiert entlang des Gradienten
- HF-Puls regt nur den Bereich an, in dem die lokale Feldstärke der Larmor-Frequenz entspricht → Schichtselektion



126 MHz  
127 MHz  
128 MHz

Field Strength

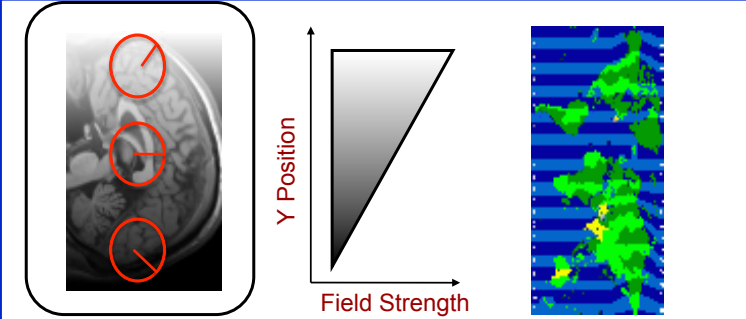
Z Position

Universität  
Südkarlsruhe

## Magnetresonanztomographie

### Phasenkodiergradient

- Zwischen HF-Pulsen und der Aufnahme der emittierten Strahlung werden zusätzliche Gradienten geschaltet
- Kodierung des Ortes in Gradientenrichtung anhand der Phase
- Analogie:** Phasen-Kodierung lässt sich mit **Zeitzone**n vergleichen. Die Uhren in verschiedenen Zonen gehen gleich schnell, sind aber zeitlich gegen einander um einen festen Betrag verschoben.



Universität  
Südkarlsruhe

## Magnetresonanztomographie

### Frequenzkodierungsgradient

- Anwendung eines finalen Gradienten während der Bildaufnahme:
- Die Schicht emittiert die Larmor-Frequenz, die jedoch von der lokalen Feldstärke abhängt → die Zeilen, bei denen ein höheres Feld herrscht emittieren eine höhere Frequenz im Vergleich zu den Regionen mit niedriger Feldstärke.
- Frequenzkodiergradient = ReadOut-Gradient



 **Magnetresonanztomographie**

### Wie entsteht nun das Bild?

- Nach der Anregung und Schalten der Gradienten werden von allen angeregten Kernen ein HF-Puls emittiert.
- In Abhängigkeit vom Ort unterscheiden sich die Signale in Ihrer Phase und Frequenz!
- Die Empfangsspule sieht ein Frequenz- & Phasengemisch



The diagram illustrates the MRI signal acquisition process. It shows a radio tower emitting a 127 MHz signal, a brain slice with a vertical dashed red line indicating the slice location, a brain slice with three red circles indicating signal sources, and a brain slice with three red wavy arrows indicating the received signal.