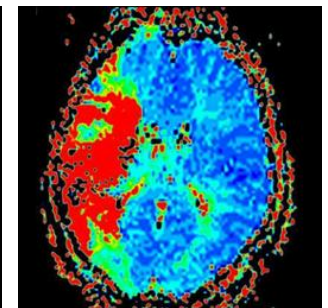
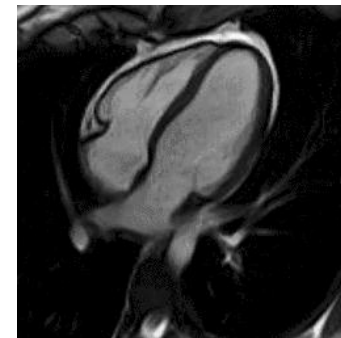
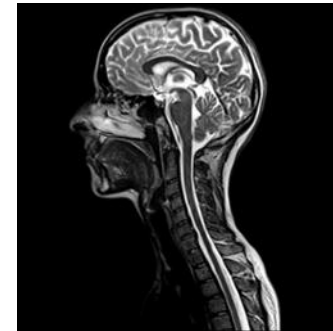


Grundlagen der MRT (MRI) — Grundprinzip, Messtechnik





Frage: Bestandteile eines MRT Gerätes

- ✓ supraleitender Elektromagnet (~ 1 Tesla — ~ 9 T) — homogenes Magnetfeld;
- ✓ Gradientenspulen zur Erzeugung der Feldgradienten (in x-, y, z-Richtungen) für Ortskodierung der Signale aus den einzelnen Volumenelementen (Amplitude: 1,5-10 **mT/m**, Anstiegszeit: $\sim 0,1$ ms — 1 ms);
- ✓ HF-Anlage zur Erzeugung der speziellen elektromagnetischen Impulse im RW-Bereich (~ 20 ~ 200 MHz, \sim kW);
- ✓ Empfangsspule(n) zur Registrierung des erzeugten Resonanzsignals;
- ✓ **Shimspulen um die Inhomogenitäten des Hauptmagnetfeldes, und dadurch die Bildverzerrungen, auszugleichen (bei offenen Geräten spielt es ganz wichtige Rolle);**
- ✓ Elektronik für Steuerung und Datenverarbeitung/Speicherung

Frage: Bildtypen auf Grund MRT

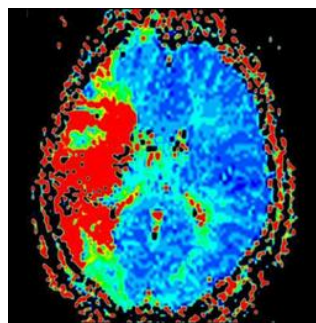
- ✓ anatomische (strukturelle) Aufnahmen von Geweben, Organen;
- ✓ Informationen über Mikrostruktur und Funktion (z.B. Durchblutung)
- ✓ spezielle Verfahren:
 - Echtzeit-MRT (real-time-MRT),
 - Magnetresonanzangiographie (MRA)- Anwendung von paramagnetischen Kontrastmitteln
 - funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT oder fMRI) des Gehirns,
 - die Perfusions-MRT zur Untersuchung der Gewebedurchblutung,
 - die Diffusions-MRT und Diffusions-Tensor-Bildgebung (DTI) (z.B.: für eine virtuelle Rekonstruktion von Nervenfaserverbindungen),
 - MR-Elastographie zur Erkennung von: a.) Tumoren (auf Grund der Unterschiede in elastischen Eigenschaften der gutartigen und bösartigen Tumoren); b.) Elastizität von Koronararterien (s. auch bei US)



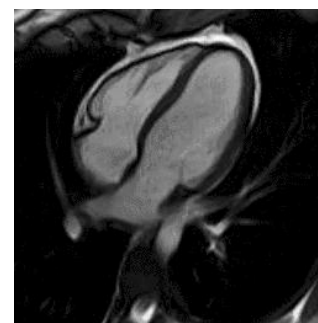
T₂



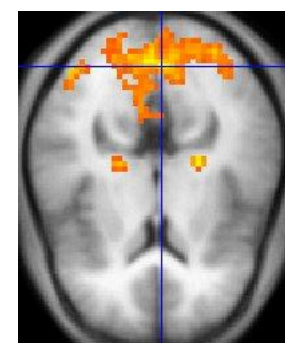
MRA



PWI



rt-MRT



fMRT

Kontrast (Begriffsklärung)

aus Wikipedia, der freien Enzyklopädie

Kontrast bezeichnet:

eine Eigenschaft der Grenze zwischen zwei Gebieten mit unterschiedlichen visuellen Eigenschaften (z. B. Leuchtdichte, Farbe)

in der Musik Unterschiede, z. B. im [Tongeschlecht](#), [Tempo](#), [Taktart](#) und/oder [Artikulation](#)

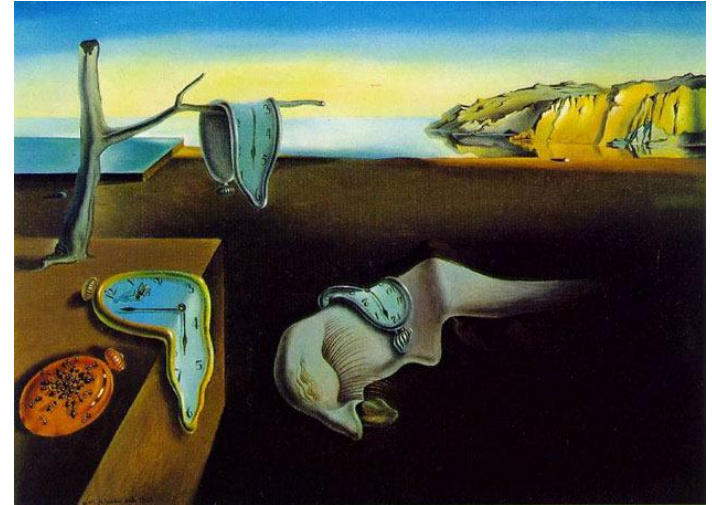
[Kontrast \(Linguistik\)](#), ein sprachliches Merkmal, das einen Unterschied kennzeichnet

[Kontrast \(Band\)](#)

in der [Varianzanalyse](#) eine Linearkombination der Gruppenmittelwerte, welche die Bedingung erfüllt, dass die Summe ihrer Koeffizienten 0 ergibt.

Frage: Kontrast bei bildgebenden Verfahren

Der Kontrast ist ein Unterscheidungsmerkmal für die Differenzen zwischen zwei Bildpunkten.

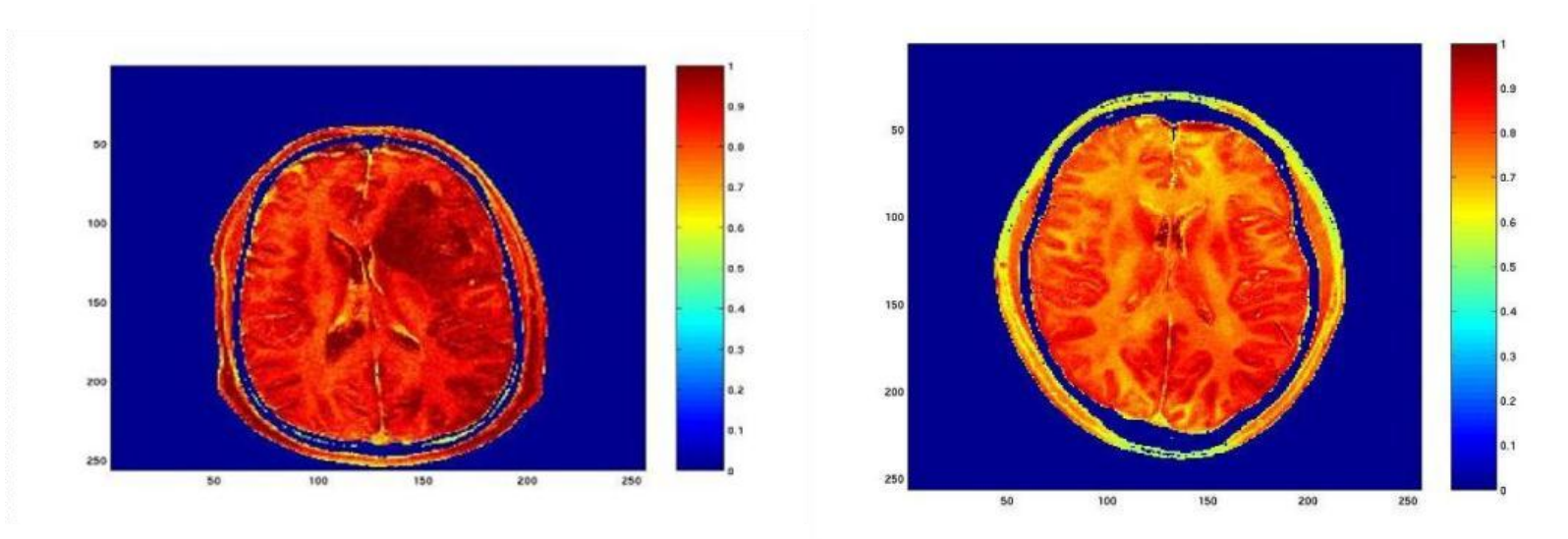


Frage: Verallgemeinerung des Bildbegriffes

- Bild ist ein meistens zweidimensionaler Informationsträger, Speicher;
- Die Informationen sind in **elementaren Bildpunkten** (auf E.: Pixel) aufgetragen;
- Die Quelle der Informationen sind die darzustellenden physikalischen Eigenschaften.

Frage: Welche physikalischen Eigenschaften sind für MRT-Bilder benutzt?

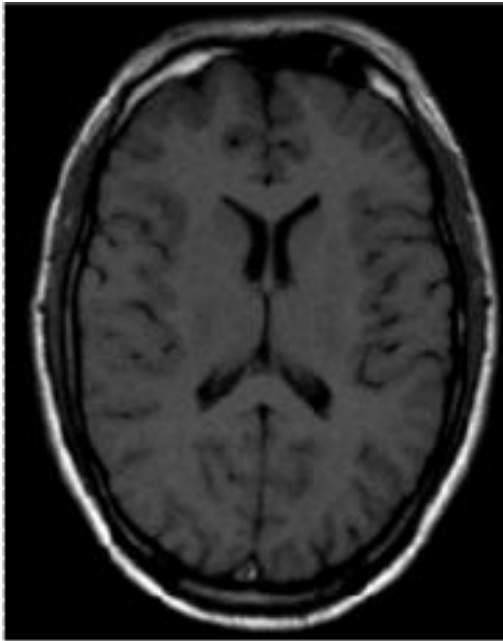
- **Protonen-Dichte** bei gewöhnlichen, Proton-MRT, Aufnahmen;
- Dichte der in der Untersuchung benutzten **paramagnetischen** Atomkerne;
- **T_1 -Relaxationszeit**;
- **T_2 -Relaxationszeit**



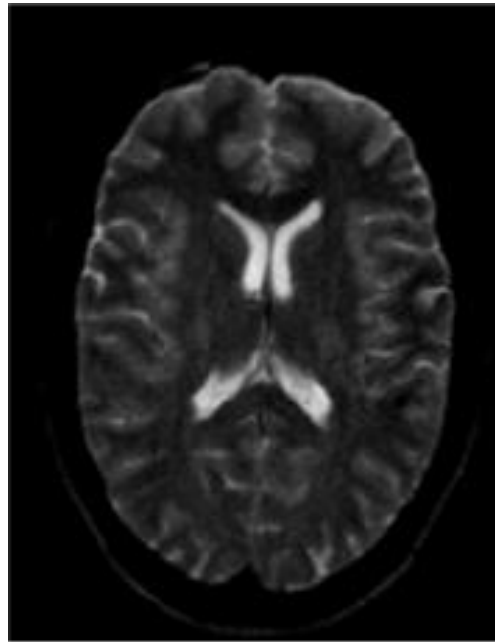
„Wasserkarte“ eines Patienten mit Hirntumor (links) im Vergleich zu einem gesunden Probanden (rechts). Der Wasserinhalt ist im Bereich des Tumors als auch im kompletten Gehirn im Vergleich zum Hirn eines gesunden Probanden stark erhöht.

<http://www.fz-juelich.de>; **Bilderzeugung auf Grund Protonendichte**

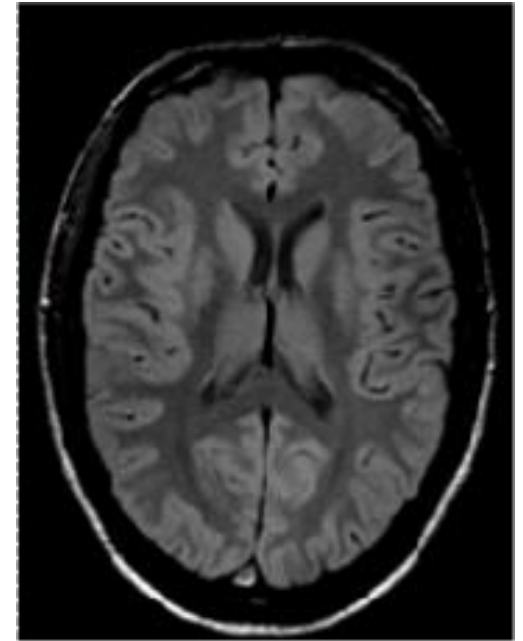
Kontrastverfahren



T_1



T_2



PD

Frage: Kontrast bei bildgebenden Verfahren

Der Kontrast ist ein Unterscheidungsmerkmal für die Differenzen zwischen zwei Bildpunkten.



Fragen zu beantworten:

- **Was ist die physikalische Grundlage der MRT?**
- **Wie kann man die Protonendichte messen/bestimmen?**
- **Welche sind die paramagnetischen Atomkerne?**
- **Was sind diese Relaxationszeiten?**
- **Wie kann man der unterschiedlichen gemessenen Größen nach kontrastieren?**

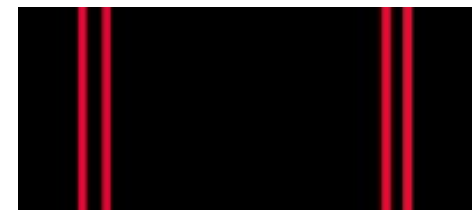
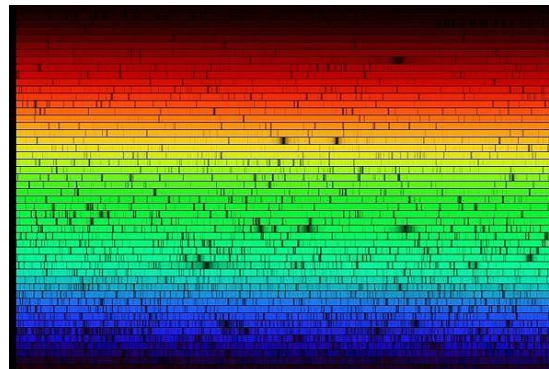
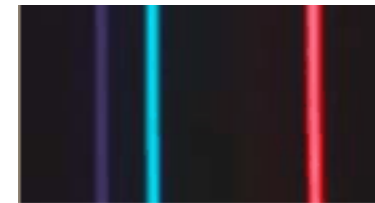
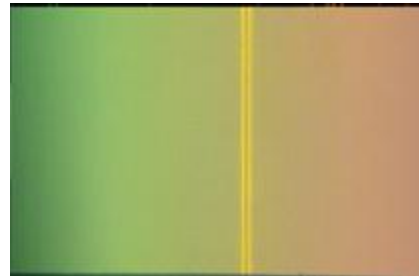
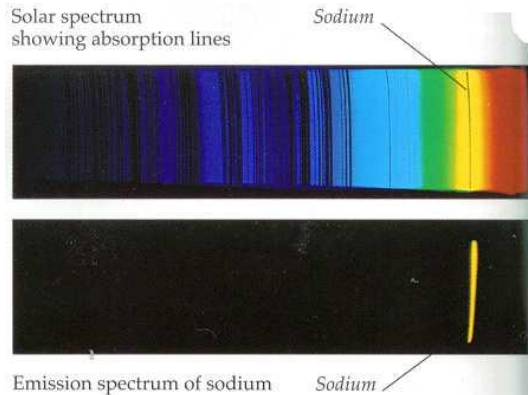
Frage: Unterschied zwischen gequantelten und klassischen Systemen

(In der Physik versteht man unter Quantisierung den Übergang einer klassischen Theorie der Physik in die entsprechende quantentheoretische Darstellung.)

Dieser Übergang beinhaltet unter anderem, dass ***Energie*** zwischen Systemen nur ***in Quanten ausgetauscht werden kann*** und ***dass stationäre Systeme diskrete Energieniveaus aufweisen***. Bislang sind Quantisierungen bei den folgenden physikalischen Größen bekannt: ***Materie, Licht, Energie, Ladung, Impuls, Drehimpuls, Widerstand***.

Frage: Beweise für Quantisierung (u.a.):

- Anregungs-/Absorptionsspektren von atomaren Systemen unter idealem wechselwirkungsfreien Zustand;
- Spektren von α -, γ -Strahlungen (β -Strahlung steht nicht im Widerspruch!)
- usw.



Frage: Wie ist der Drehimpuls (\underline{L}) in der klassischen Physik definiert?

Der Drehimpuls eines Massenpunktes ist definiert als **Kreuzprodukt zwischen Ortsvektor (\underline{r}) und Impuls ($\underline{m \cdot v}$)** (senkrechte Komponente tragen bei):



\underline{L} : Erhaltungsgröße!

$$\ell = |\underline{L}| = r \cdot m \cdot v = m \cdot r \cdot v = m \cdot r \cdot r\omega = m \cdot r^2 \cdot \omega$$

$$\ell = m \cdot r^2 \cdot \omega$$

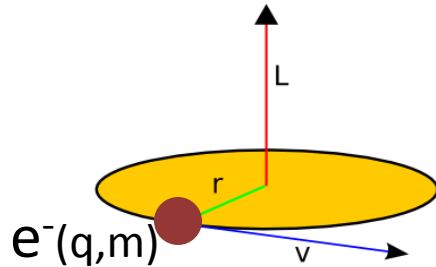
m: Masse des Körpers/Teilchens;

ω : Kreisfrequenz;

r: Radius der Bahn



der Bahndrehimpuls



Frage: Warum besitzen die Elektronen eines Atoms/Moleküls Drehimpuls?

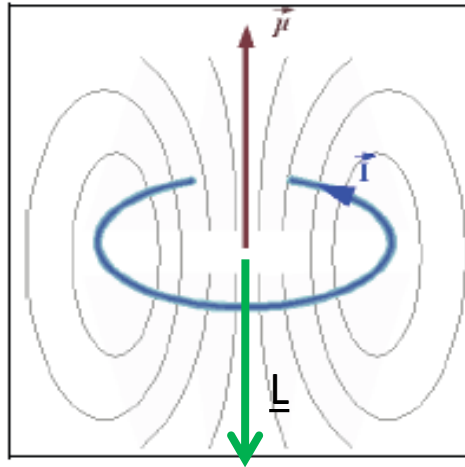
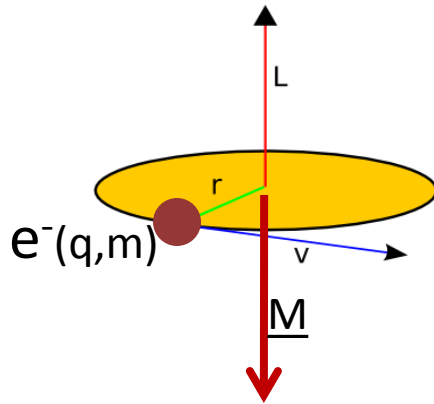
- ✓ Bahnenstruktur z.B.: H: 1s; He: 1s²; ¹²₆C: 1s²2s²2p²,....
!ABER!!!
- s — sharp; p — principal;
d — diffuse; f — fundamental
- Bei s-Bahnen $\underline{L}=0$ (unabhängig von Besetzungszahl; kugelsymmetrische Bahn)
 - Bei vollbesetzten weiteren Bahnen $\underline{L}=0$, sonst ist $\underline{L}\neq 0$

Frage: Was für Werte kann der Drehimpuls bei atomaren Systemen aufweisen?

An sehr kleinen physikalischen Systemen wie Atomen zeigt sich, dass der Drehimpuls quantisiert ist. Sein Betrag kann nur ganz- oder halbzahlige Vielfache, m_L , des Planckschen Wirkungsquantums annehmen: $L_z = m_L \cdot h$



das magnetische Moment (\underline{M} oder $\underline{\mu}$)



$$|\underline{\mu}| = \frac{q}{2} \omega r^2$$

für Elektron: $\underline{\mu}$ und \underline{L} sind entgegengerichtet wegen **negativer Ladung des Elektrons**

$$|\underline{\mu}| = \frac{q}{2} \cdot \frac{m \omega r^2}{m} = \frac{q}{2m} \cdot \underline{L}$$

Frage: Warum besitzen die Elektronen eines Atoms/Moleküls magnetisches Moment?

✓ Bahnenstruktur z.B.: H: 1s; He: 1s²; ¹²₆C: 1s²2s²2p²,....

!ABER!!!

- Bei s-Bahnen $\underline{M}=0$ (unabhängig von Besetzungszahl, kugelsymmetrische Bahn)
- Bei vollbesetzten weiteren Bahnen $\underline{M}=0$, sonst $M \neq 0$!

Frage: Ist das magnetische Moment eines Elektrons auf einer Bahn gequantelt?

- ✓ Ja.
- ✓ **für Bahnen: m_l ist ganzzahlig!**
- ✓ **!ABER! für s -Bahnen ist es Null.**

$$|\mu| = \frac{q}{2m} \cdot L \Rightarrow \frac{q}{2m} \cdot m_l \cdot h$$



Frage: Warum besitzen die Elektronen/Nukleonen eines Atoms/Moleküls Drehimpuls?

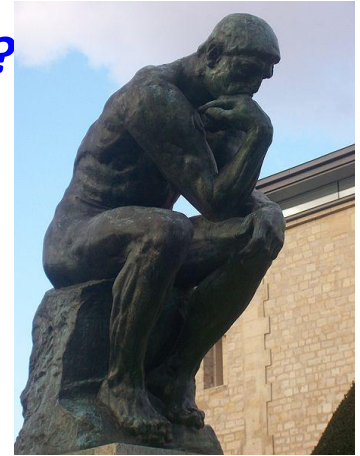
- ✓ Bahnenstruktur für Elektronen (s. oben)
- ✓ **+ Eigendrehimpuls = SPIN**

Der Spin ist gequantelt. Der Betrag **seiner Projektion auf eine vorgegebene Richtung** kann nur ganz- oder halbzahlige Vielfache des Planckschen Wirkungsquantums annehmen; **seine Einheit ist J·s!!**

Frage: Was für einen Spin besitzen die „elementaren“ Teilchen?

Elektron, Positron, Proton, Neutron,... $1/2 \{Js\}$

Photonen: 1



Frage: Verknüpft sich der Spin mit magnetischem Moment?

✓ Ja.

✓ **zusätzlich: gequantelt!**

✓ **m_s : Spin-Quantenzahl**

✓ **m_s : $+1/2$; $-1/2$**

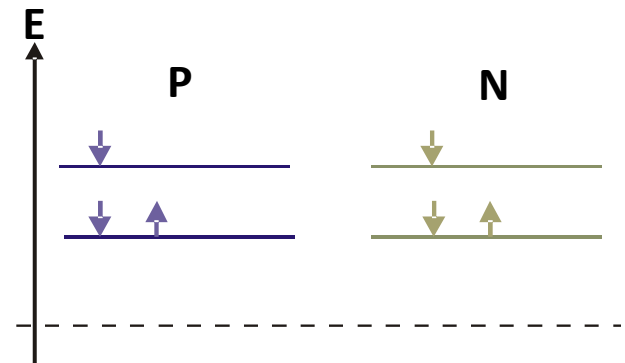
$$|\mu| = \frac{q}{2m} \cdot \underline{S} = \frac{q}{2m} \cdot m_s \cdot h$$

Frage: Wie setzt sich der Spin in Atomkernen zusammen?

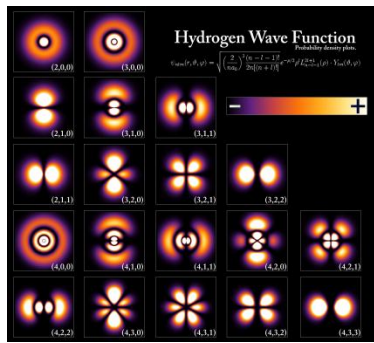
✓ getrennte Schalenstruktur für Protonen und Neutronen.

✓ zusätzlich: gequantelt!

✓ m_s : $m_{s,p} + m_{s,n}$



z.B.: $m_{s,p} + m_{s,n} = 1/2 + 1/2 = 1$



Frage: Was bedeutet die Energieentartung?

- für Elektronen eines Atoms:
 - ✓ ohne äußere Wechselwirkung/Einwirkung ist die Energie durch die Haupt-, und Nebenquantenzahlen bestimmt;
 - ✓ **der Energiezustand ist in diesem Fall unabhängig von weiteren Quantenzahlen!**
- für Atomkerne:
 - ✓ **unabhängig von Spinzuständen der Protonen und Neutronen besitzt der Atomkern dieselbe Energie**

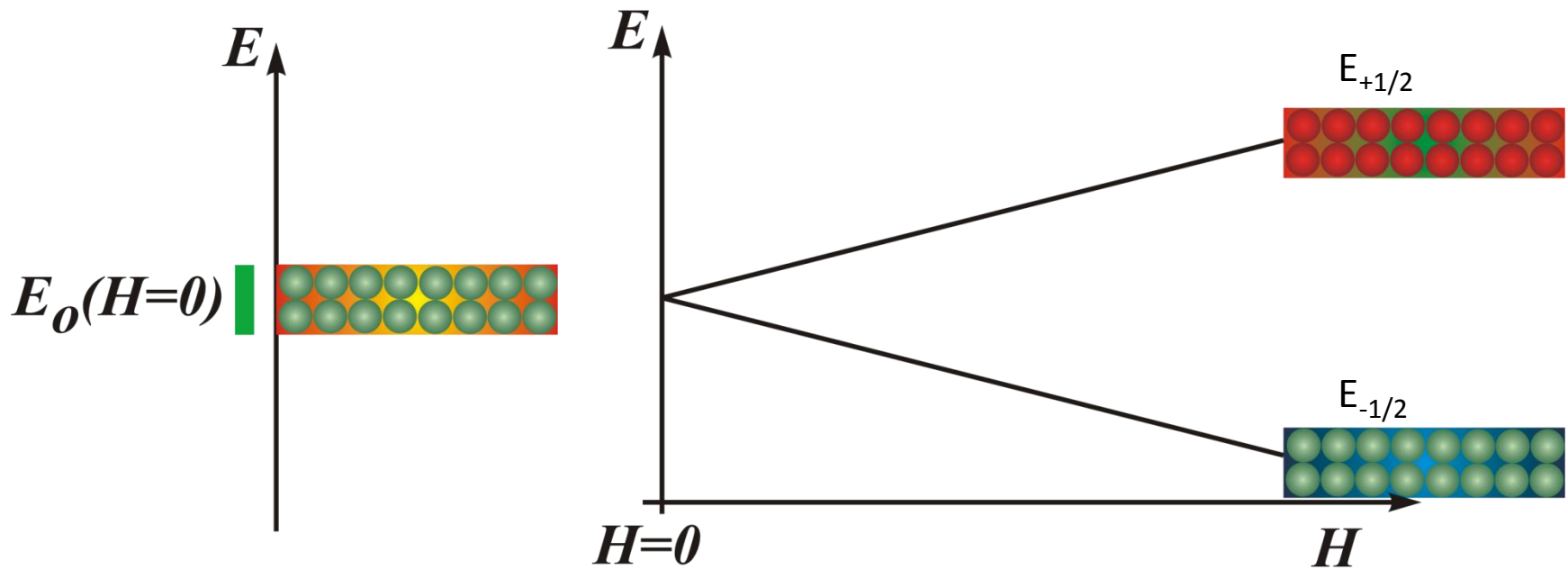
Frage: Wie kann die Energieentartung aufgehoben werden?

- Wenn sich die emittierende Materie in einem externen Magnetfeld befindet, können die Spektrallinien aufspalten (Beobachtung von P. Zeeman (1896)) — **Zeemansche Aufspaltung**.
- Die Anzahl der unterschiedlichen Energieniveaus hängt von der Größe der Magnetische- und Spinquantenzahl ab.
- Im Allgemeinen, ist die Spinzahl gleich m_s , ist die Anzahl der Energieniveaus gleich $(2m_s+1)$. z.B: $m_s=1/2$, Anzahl der Niveaus = 2; $m_s=1 \rightarrow n=3$
- **In Richtung des Magnetfeldes ist der Spin (und auch der Bahndrehimpuls) gequantelt!**



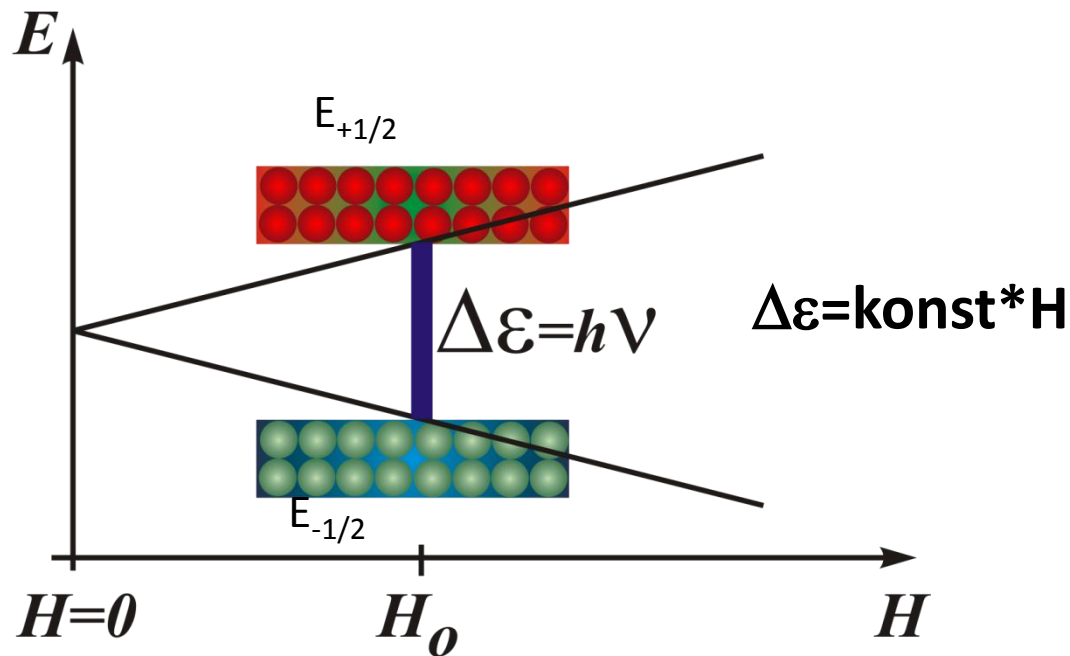
Frage: Was ist das Grundphänomen für MRT?

- Der Wasserstoffatomkern besteht aus einem Proton
- $m_{s,p}=1/2 \rightarrow (2m_s+1)=2 \rightarrow n_E=2$; $E_{-1/2}$ und $E_{+1/2}$;
- im Magnetfeld tritt die Aufspaltung der entarteten Energieniveaus auf: Grundniveau und Anregungsniveau
- die Größe der Aufspaltung hängt von der Feldstärke ab
- zwischen den Energieniveaus kann man Übergänge durch Bestrahlung mit geeigneter elektromagnetischer Strahlung induzieren



Frage: Wie groß ist die Energiedifferenz zwischen zwei Niveaus für eine Spinquantenzahl von m_s ?

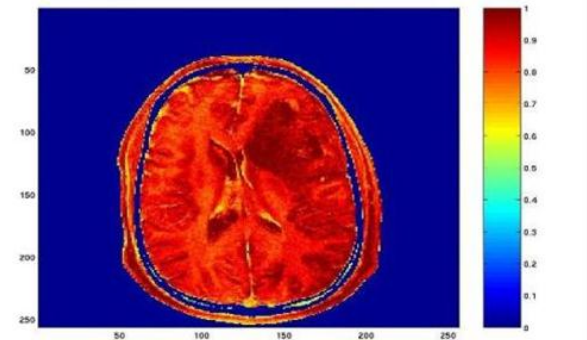
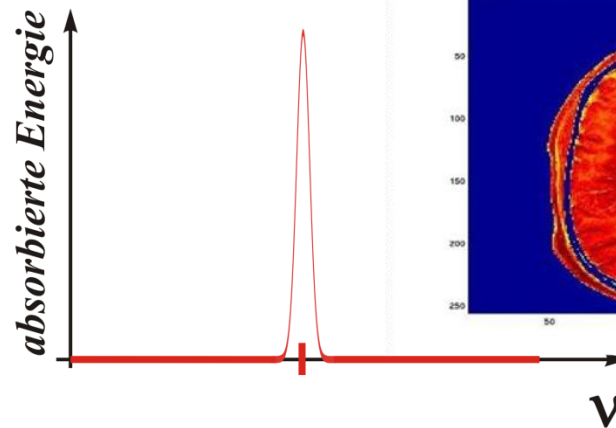
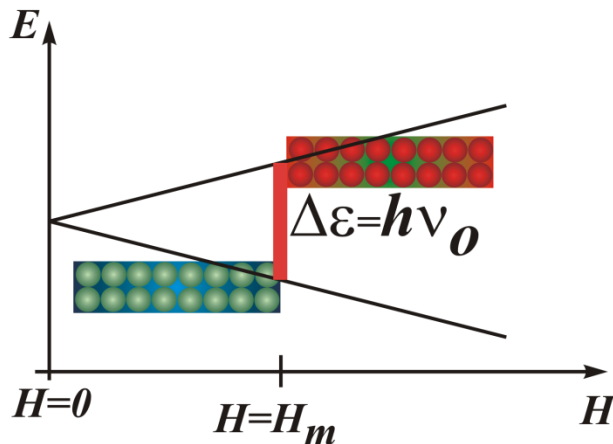
- ✓ $\Delta\varepsilon = \text{konst} * \Delta m_s * H$
- ✓ Δm_s darf nur Eins sein!
- ✓ Auf Grund des Drehimpulserhaltungssatzes: $\Delta\ell=0$; das absorbierte Photon besitzt einen Drehimpuls $1\hbar$



Charakteristische Größen:

Frequenzbereich	40-200 MHz
Feldstärke (tesla)	~0,9 — ~10
$\Delta\varepsilon$ (J)	$2,65 \cdot 10^{-26}$ — $5,96 \cdot 10^{-25}$
$\Delta\varepsilon$ (eV)	$1,66 \cdot 10^{-7}$ — $3,73 \cdot 10^{-6}$
Besetzungsdifferenz bezogen auf Besetzung des Grundniveaus	$3,2 \cdot 10^{-6}$ — $7,2 \cdot 10^{-5}$
gesamte absorbierte Energie (J) im Falle einer Populationsinversion	$2,55 \cdot 10^{-15}$ — $1,29 \cdot 10^{-12}$

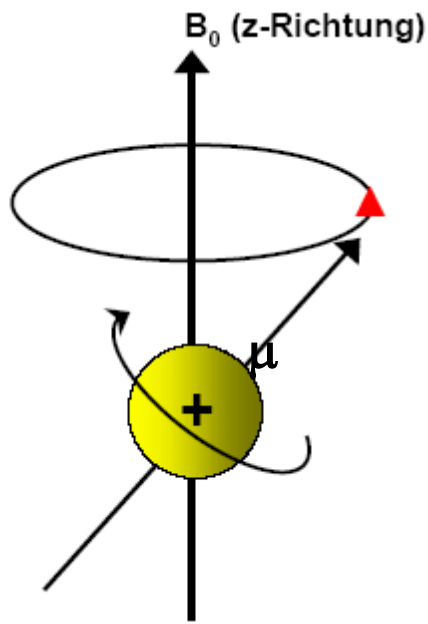
Frage: Wie kann man die Protonendichte bestimmen?



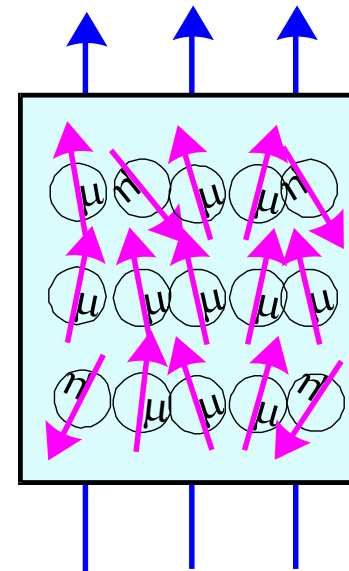
Frage: Was für Atomkerne sind für MRT noch geeignet?

- Atomkerne die von Null unterschiedlichen Spin besitzen
- Ungepaarte Protonen und/oder Neutronen
- z.B.: ^2H , ^{13}C , ^{15}N , ^{17}O , ^{19}F , ^{23}Na , ^{31}P

molekulare Veranschaulichung des magnetischen Moments



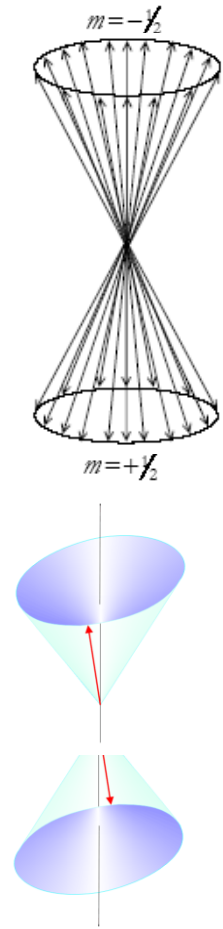
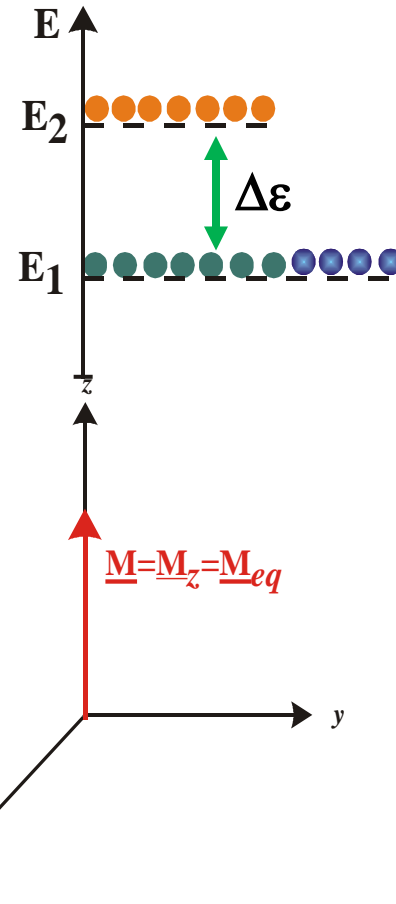
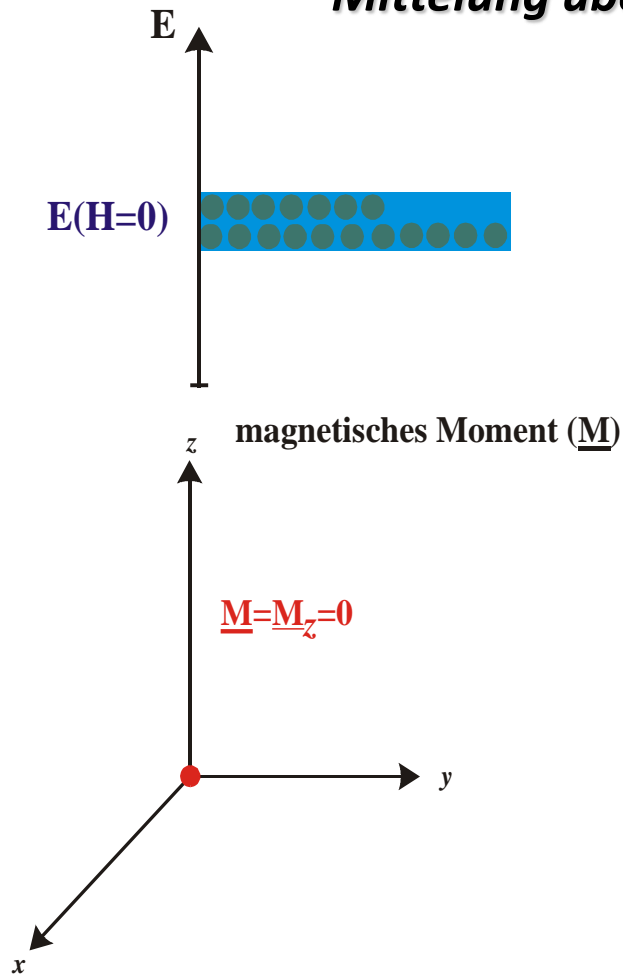
$\underline{H}=0; \underline{M}=0$



$\underline{H}>0; \underline{M}>0$

$$\underline{M} = \sum \mu_i$$

Mittelung über alle Spins zu einem Zeitpunkt.



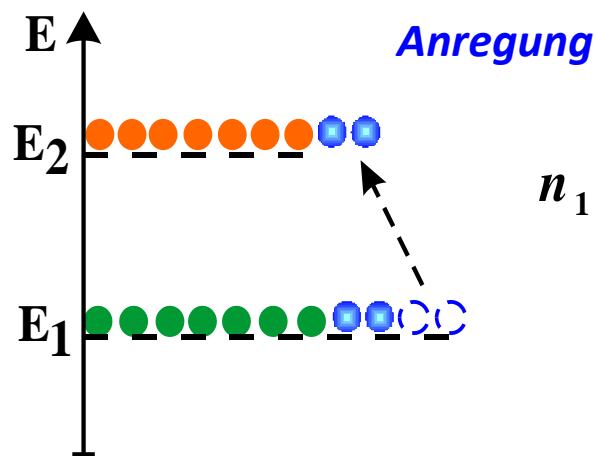
Frage: Wie groß ist die Differenz in Besetzung?

✓ Sie ist durch die Boltzmannsche Verteilung beschrieben.

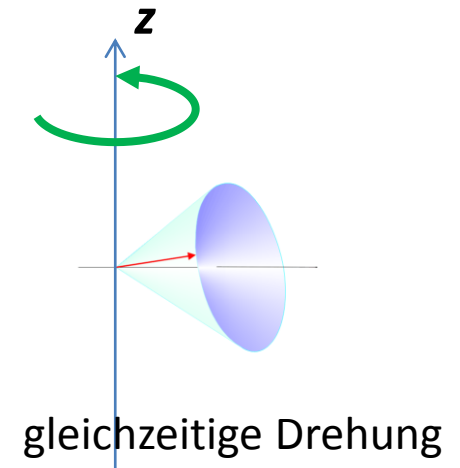
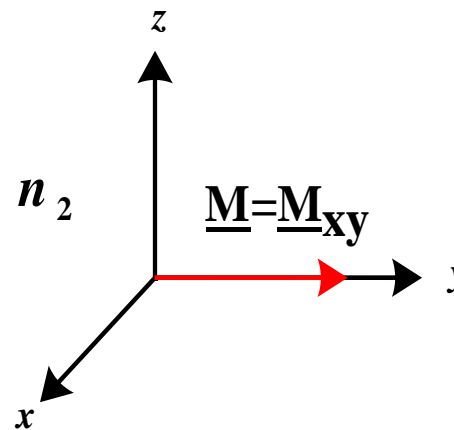
$$\frac{n_2}{n_1} = e^{-\Delta\varepsilon/kT}$$

Frage: Was ist die Konsequenz einer RF-Anregung

- Sie hängt von der durch einen RF-Impuls zugeführten Energiemenge ab
- **90° und 180° Impulse**
- **Registrierung der Signale mit Empfangsspulen nach dem Impuls zu gewisser Zeitspanne.**
- **Signale werden beobachtet entlang x, y (und z) Richtungen während der Entspannung (Relaxation) der angeregten Atomkerne**

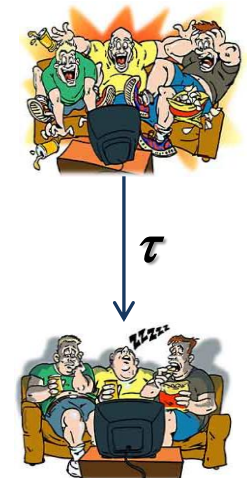


$$n_1 = n_2$$



Frage: Wovon hängt die Relaxation(zeit) ab?

- von Atomsorte
- von Verbindungen in denen sich die untersuchten Atomkerne befinden
 - ✓ chemische Aufbau, Struktur der Moleküle
 - ✓ Wechselwirkung mit eigenen und mit Elektronen der benachbarten Atomen/Molekülen

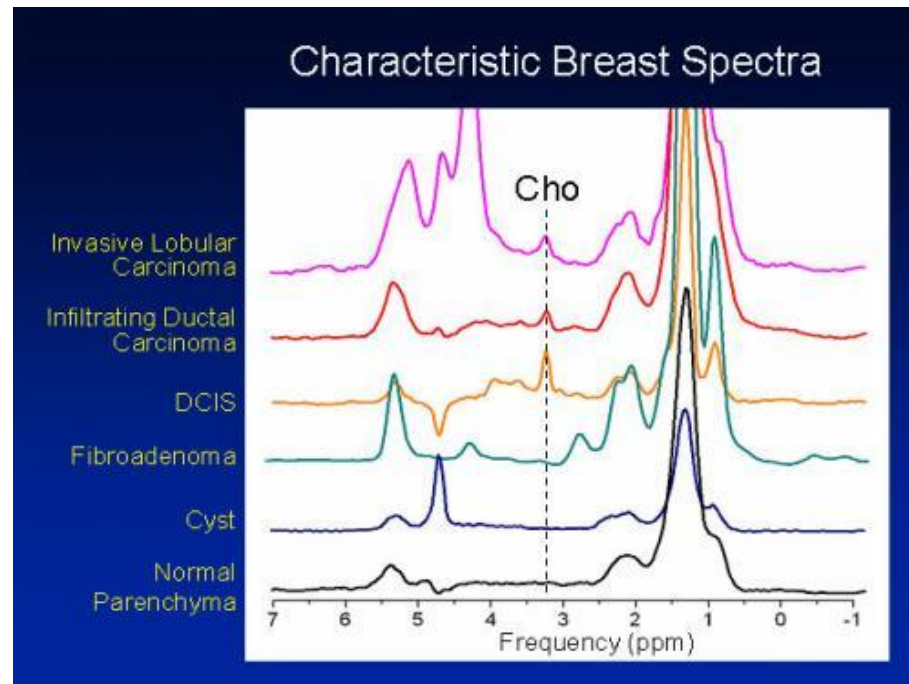
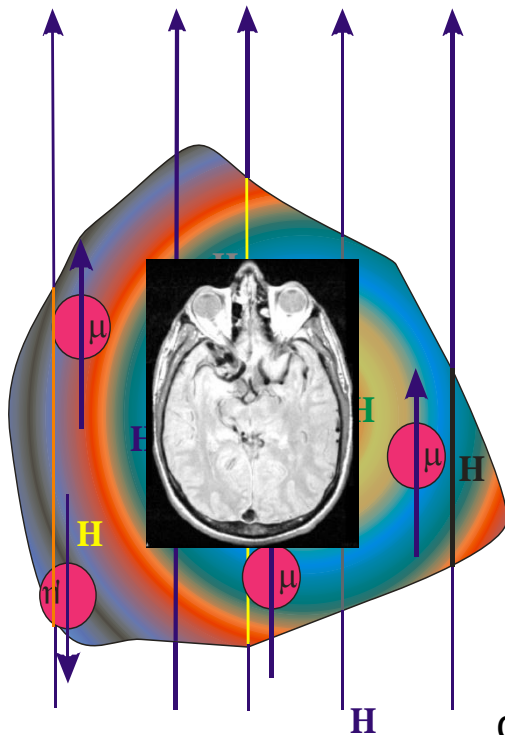


Frage: Wie ändert sich das Signal mit der Relaxationszeit?

- kürzere Relaxationszeit führt zu kleineren Signalamplituden
- Möglichkeit für paramagnetische Auslöschung/Verminderung der Signalamplitude
 - ✓ Kontrastverfahren mit Gd-haltigen Molekülen
 - ✓ mit paramagnetischen (z.B. nitroxid-Typ) freien Radikalen
- Perfusion/Durchblutungsversuchen
- Angiographie

Frage: Was ist der Grund für Signalunterschiede zwischen unterschiedlichen Geweben

- Die Feldstärke des externen magnetischen Feldes wird durch die lokalen Wechselwirkungen verändert — lokales magnetisches Feld.
- **Die Anregungsfrequenz, die Signalamplitude hängt von der Umgebung des Protonenspins — von molekularen Zusammensetzung/Aufbau eines Gewebes**

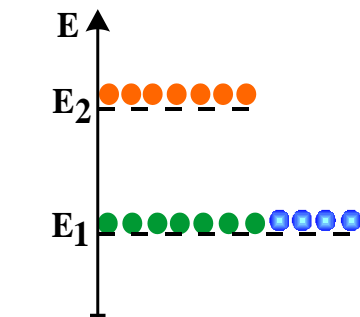


choline-haltige Verbindungen (Cho)
z.B.: glycerophosphocholin, cholin, phosphatidylcholin,...

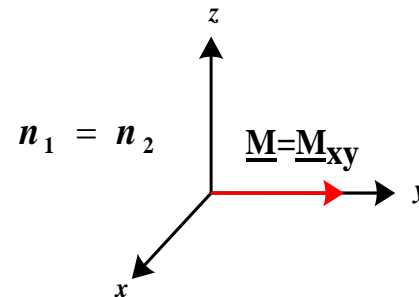
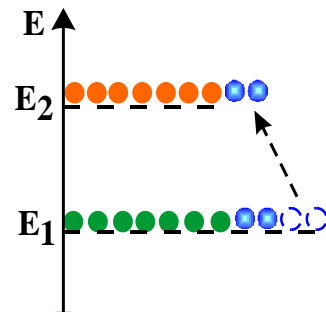
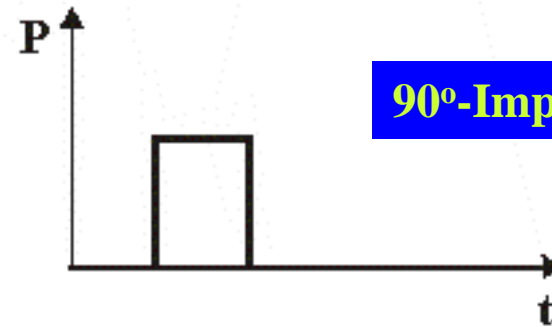
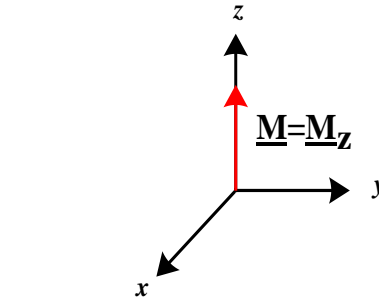
Frage: Wie können die Relaxationszeiten bestimmt werden?

H ist schon angelegt:

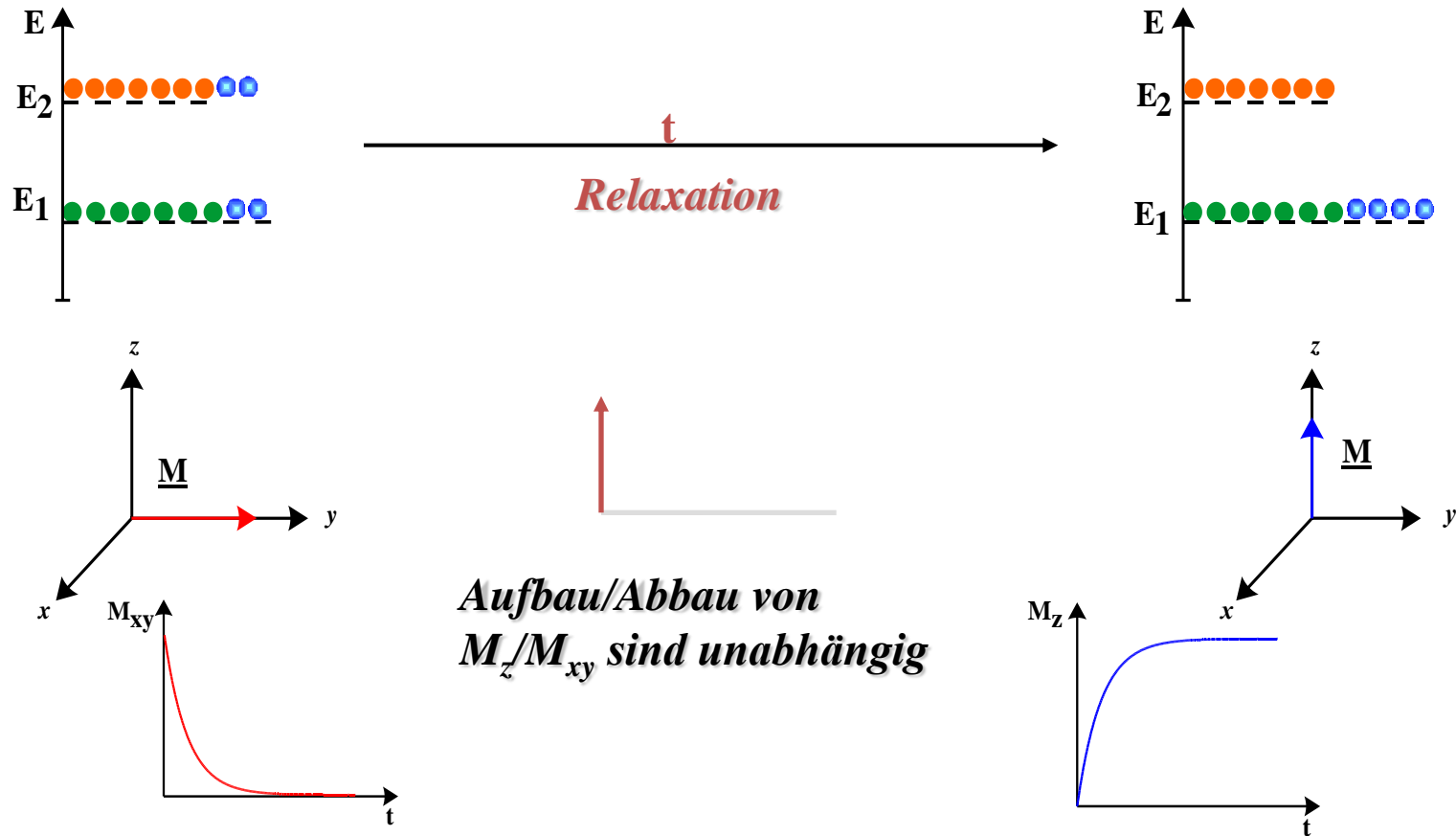
Aufspaltung der
Energieniveaus



$$E = n \cdot h \nu = P \cdot \Delta t$$



Frage: Wie laufen die Relaxationen ab?



Zeitliche Abhängigkeit der x-y Komponente des Relaxationsprozesses; Spin-Spin Relaxation; T_2 -Relaxationszeit

Zeitliche Abhängigkeit der z Komponente des Relaxationsprozesses; Spin-Gitter Relaxation; T_1 -Relaxationszeit

Frage: Wie können die Relaxationszeiten bestimmt werden?

- ✓ Hauptmagnetfeld ist angelegt
- ✓ Anregung mit elektromagnetischem Impuls (90° oder 180°)
- ✓ Registrierung der Echo-Signale zu gewisser Zeit nach Anregung
- ✓ Wiederholung der Anregung/Registrierungsprozesse — MRT-Sequenzen

Frage: Sind immer die selben Puls(Anregungs)sequenzen und Empfangssequenzen benutzt?

- ✓ Nein — hängt von den zu untersuchenden Geweben/Messverfahren ab
- ✓ Anregung mit elektromagnetischem Impuls (90° oder 180°) —

Repetitionszeit (T_R)

- ✓ Auslesen der Echo-Signale zu gewisser Zeit nach Anregung — **Echozeit (T_E)**

$$S \sim \rho \cdot e^{-T_E/T_2} \cdot (1 - e^{-T_R/T_1})$$


Protonendichte

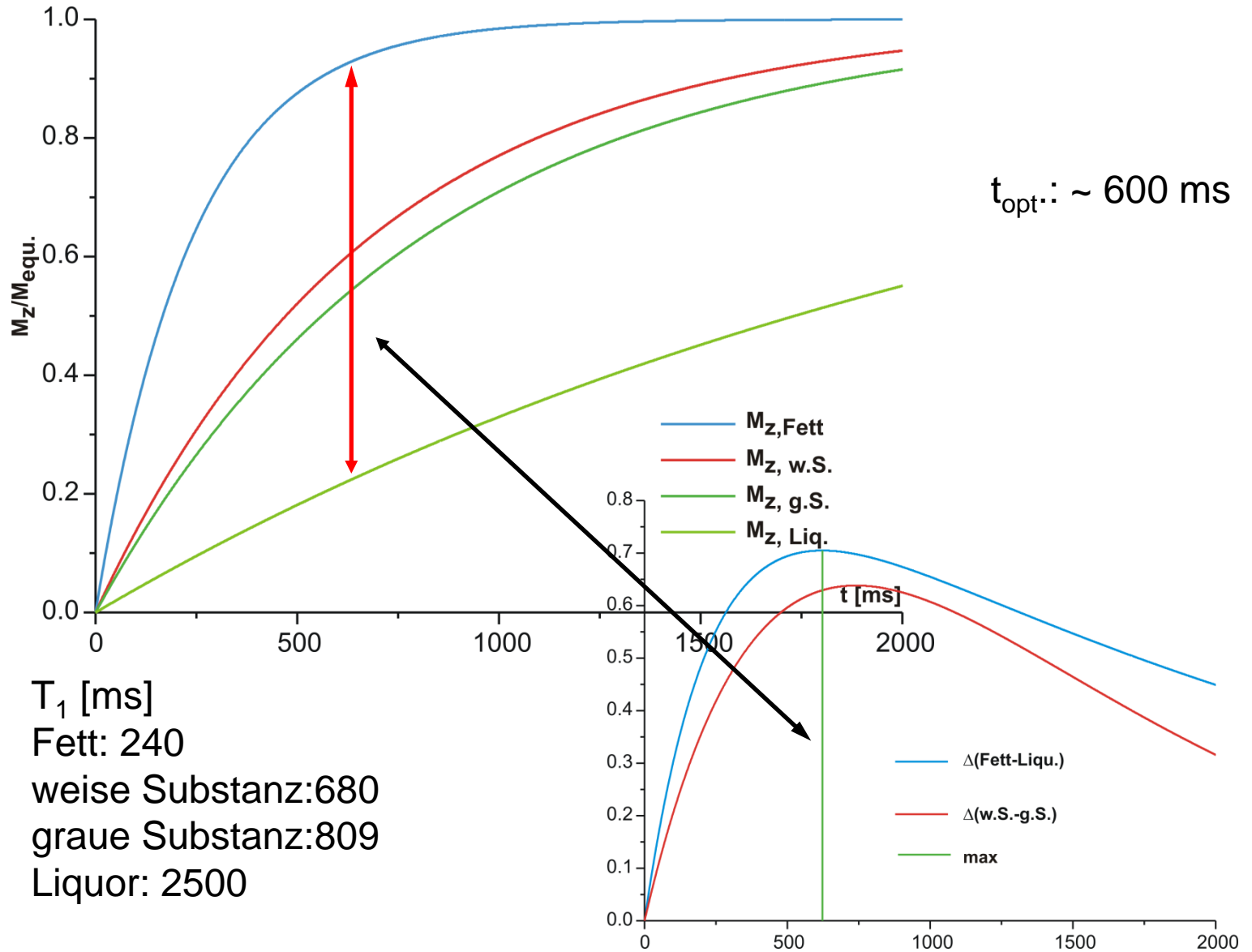
T_1 -Kontrast — maximal bei $T_R \sim T_1$

$T_E \ll T_2$ um T_2 Abhängigkeit zu minimieren

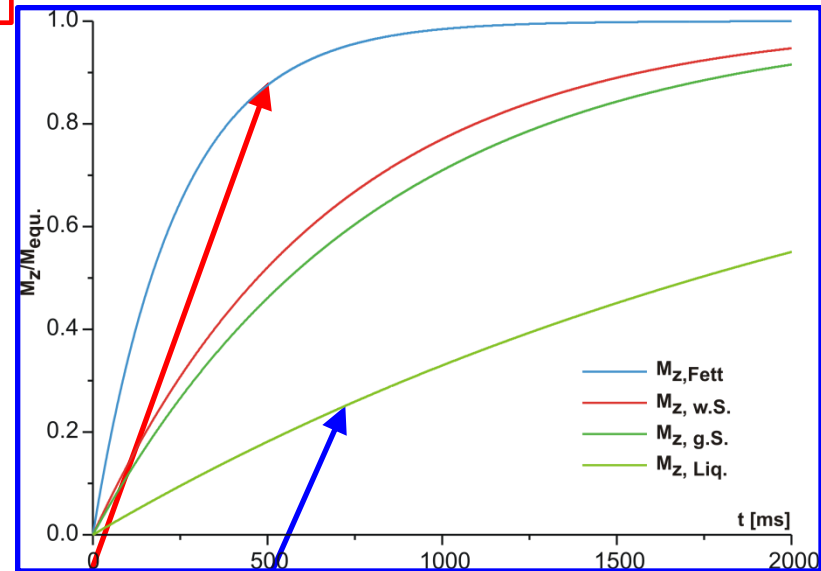
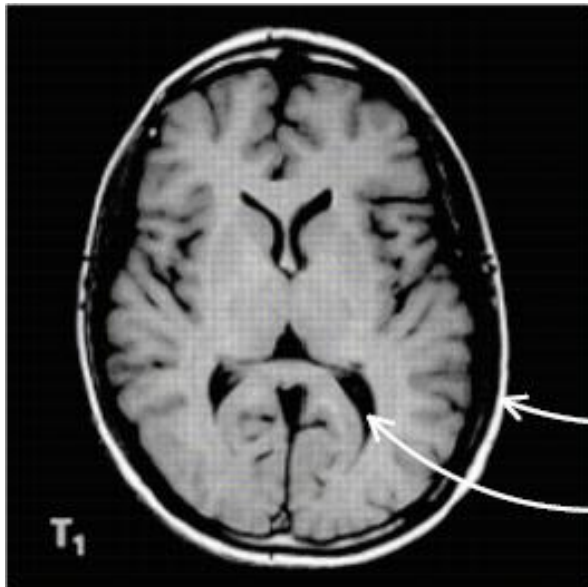
T_2 -Kontrast — maximal bei $T_E \sim T_2$

$T_R \gg T_1$ um T_1 Abhängigkeit zu minimieren

T_1 Relaxation



T_1 -Kontrast — maximal bei $T_R \sim T_1$
 $T_E \ll T_2$ um T_2 Abhängigkeit zu minimieren



Fett hell

Liquor dunkel

T_2 -Kontrast — maximal bei $T_E \sim T_2$

$T_R \gg T_1$ um T_1 Abhängigkeit zu minimieren

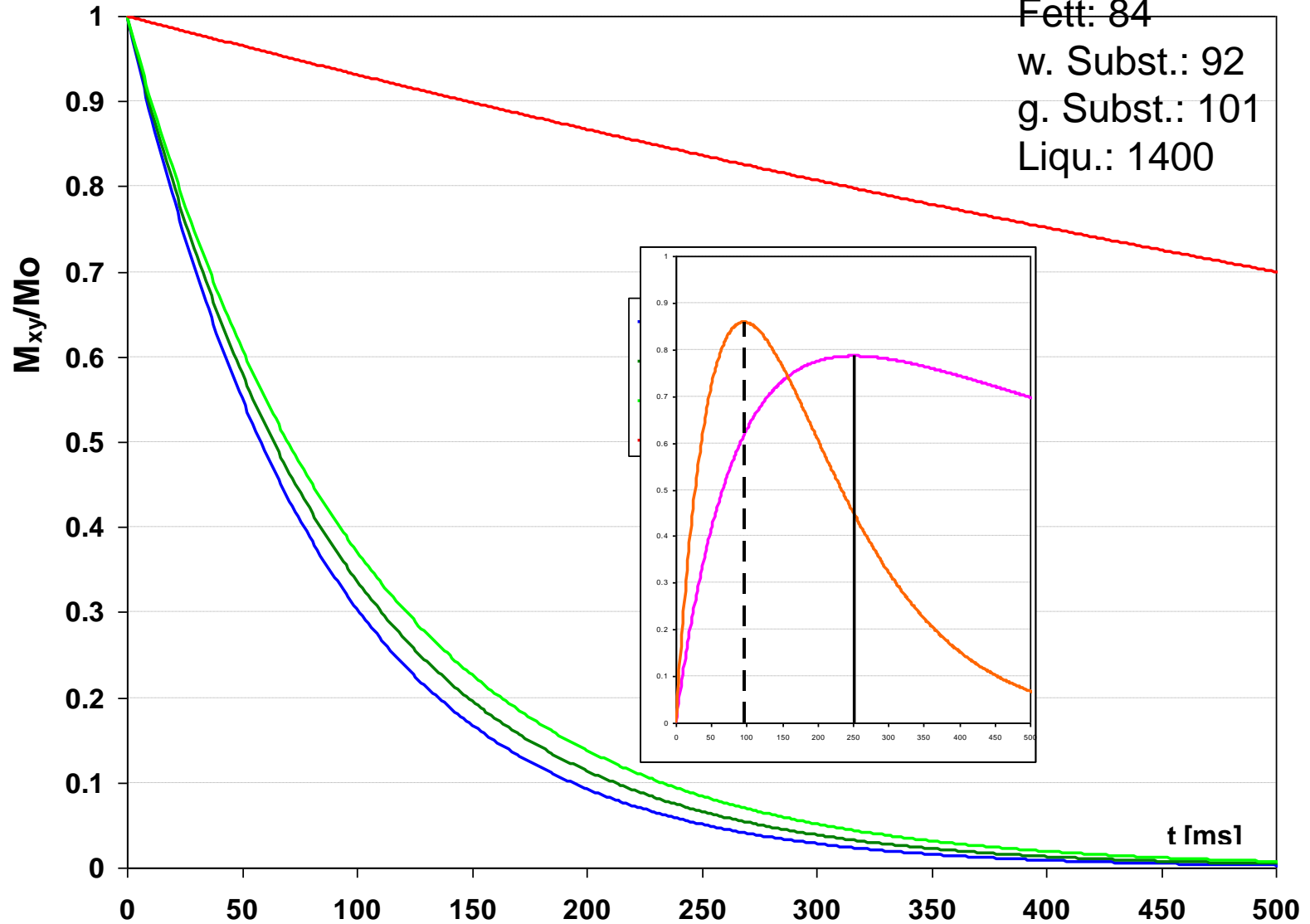
T_2 [ms]

Fett: 84

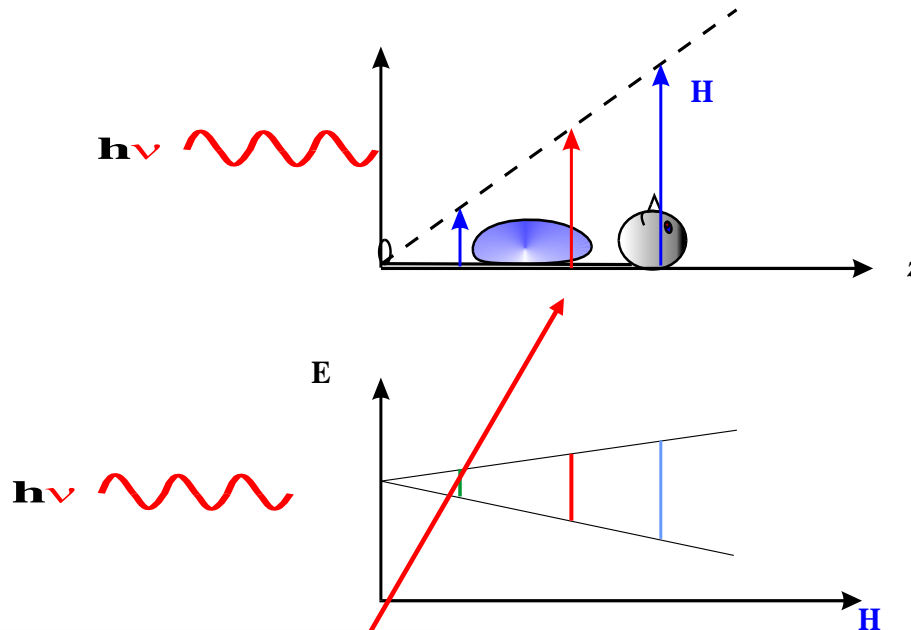
w. Subst.: 92

g. Subst.: 101

Liqu.: 1400



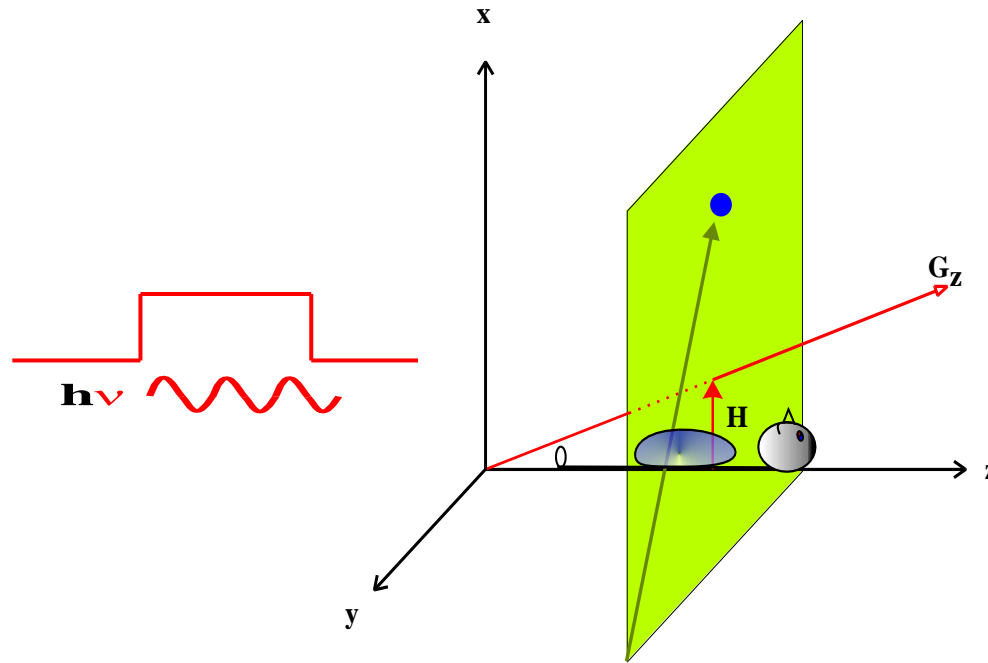
Frage: Was ist die Rolle der magnetischen Feldgradienten



Resonanz nur in dieser Schicht

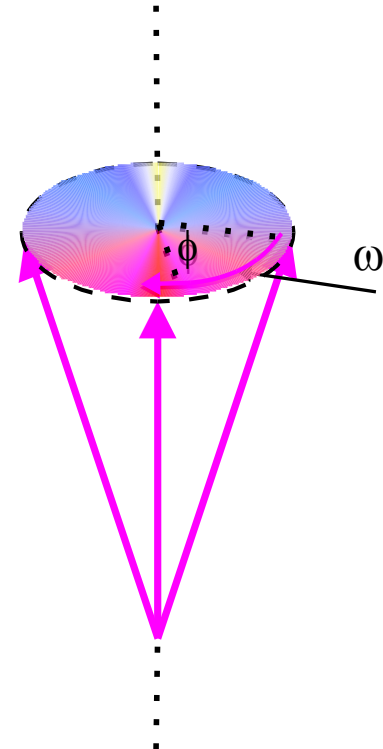
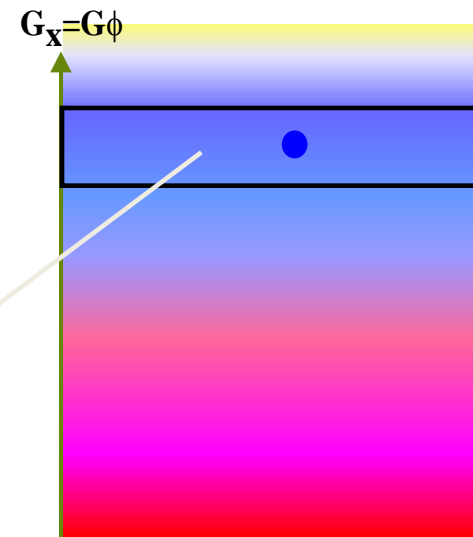
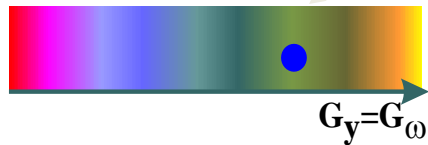
Die Amplitude des NMR-Signals ist proportional zur Protonenkonzentration der gegebenen Schicht.

Anwendung eines entsprechenden magnetischen Feldgradienten entlang der x,y,z Achsen — und seine schrittweise Veränderung — erlaubt die Bestimmung der Protonendichte in jedem einzelnen Volumenelement eines Körpers >> ein Bild gewichtet durch Protonendichte kann hergestellt werden.



Ein Feldgradient entlang der z -Achse erlaubt die Auswahl einer Schicht
 Die Bestrahlungsfrequenz und die magnetische Feldstärke bestimmen
 die Schicht wo die Protonen angeregt werden — Quelle der
 registrierten Signale

zu untersuchende Schicht



Ein weiterer (z.B.: G_x) Feldgradient ergibt eine
Phasenkodierung;
der andere Gradient (z.B. G_y) ist benutzt während der
Auslese des Echo-Signals;
Die Koordinaten eines Punktes sind dadurch bestimmt

Biophysik für Mediziner

- Boltzmann-Verteilung I/3.1.1
- Drehmomente, Spins, magnetisches Moment, weitere Quantenerscheinungen I/1.4.1, I/1.4.2
- MRT-Methoden VIII/4.1
- Relaxationsmechanismen am Ende von X/4.1

Weitere Literaturen

Magnetresonanztomographie – Wikipedia.mht

Stern-Gerlach-Versuch – Wikipedia.mht

Magnetismus – Wikipedia.mht

<http://flexikon.doccheck.com/MRT-Sequenz>