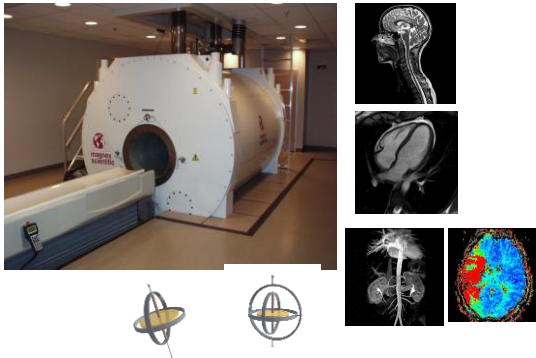


### Grundlagen der MRT (MRI) — Grundprinzip, Messtechnik

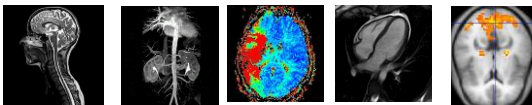


#### Frage: Bestandteile eines MRT Gerätes

- ✓ supraleitender Elektromagnet ( $\sim 1$  Tesla —  $\sim 9$  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 ( $\sim 20$  —  $200$  MHz,  $\sim$  kW);
- ✓ Empfangsspule(n) zur Registrierung des erzeugten Resonanzsignals;
- ✓ **Shims** 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),
  - Magnetresonanztomographie (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)

T<sub>2</sub>

MRA

PWI

rt-MRT

fMRT

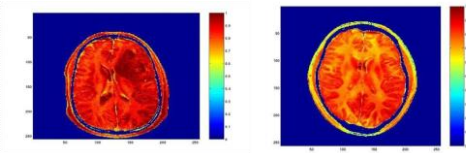


#### Frage: Verallgemeinerung des Bildbegriffes

- 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.

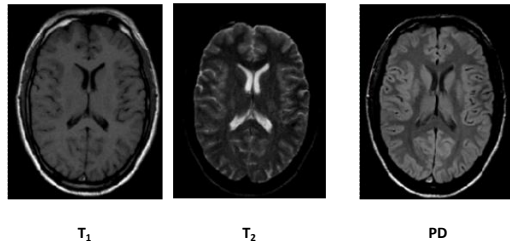
**Frage: Welche physikalischen Eigenschaften sind für MRT-Bilder benutzt?**

- **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**



**Frage: Kontrast bei bildgebenden Verfahren**

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



**Fragen zu beantworten:**

- Welche sind die physikalischen Grundlagen 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?

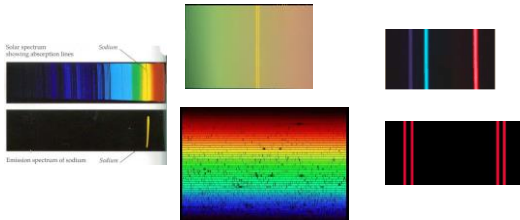
**Frage: Unterschied zwischen gequantelten und klassischen Systemen**

(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**.

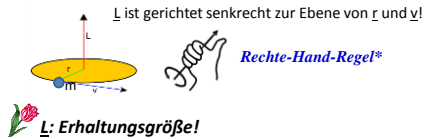
### Frage: Beweise für Quantisierung (u.a.):

- Anregungs-/Absorptionsspektren von atomaren Systemen unter idealem wechselwirkungsfreien Zustand;
- Spektren von  $\alpha$ -,  $\gamma$ -Strahlungen ( $\beta$ -Strahlung steht nicht im Widerspruch!)
- usw.



### Frage: Wie ist der Drehimpuls ( $L$ ) in der klassischen Physik definiert?

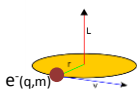
Der Drehimpuls eines Massenpunktes ist gleich dem **Kreuzprodukt eines Ortsvektors ( $\underline{r}$ ) und Impulses ( $m \cdot \underline{v}$ )** (senkrechte Komponenten tragen bei):



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

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

$m$ : Masse des Körpers/Teilchens;  
 $\omega$ : Kreisfrequenz;  
 $r$ : Radius der Bahn



### der Bahndrehimpuls

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

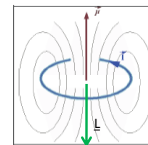
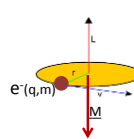
- ✓ Bahnenstruktur z.B.: H: 1s; He: 1s<sup>2</sup>; <sup>12</sup>C: 1s<sup>2</sup>2s<sup>2</sup>2p<sup>2</sup>,.... s — sharp; p — principal;  
 !ABER!!! d — diffuse; f — fundamental
- Bei s-Bahnen  $L=0$  (unabhängig von Besetzungszahl; kugelsymmetrische Bahn)
- Bei vollbesetzten weiteren Bahnen  $L=0$ , sonst ist  $L \neq 0$

#### 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**

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

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

- ✓ Bahnenstruktur z.B.: H: 1s; He: 1s<sup>2</sup>; <sup>12</sup>C: 1s<sup>2</sup>2s<sup>2</sup>2p<sup>2</sup>,....  
 !ABER!!!
- Bei s-Bahnen  $\underline{M}=0$  (unabhängig von Besetzungszahl, kugelsymmetrische Bahn)
- Bei vollbesetzten weiteren Bahnen  $\underline{M}=0$ , sonst  $\underline{M} \neq 0$ !

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, ...  $1/2 \{s\}$   
**Photonen: 1**



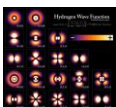
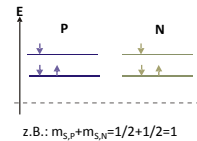
Frage: Verknüpft sich der Spin mit magnetischem Moment?

- ✓ Ja.
- ✓ zusätzlich: **gequantelt!**
- ✓  $m_s$ : Spin-Quantenzahl
- ✓  $m_s$ :  $+1/2$ ;  $-1/2$

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

Frage: Wie setzt sich der Spin in Atomkernen zusammen?

- ✓ getrennte Schalenstruktur für Protonen und Neutronen.
- ✓ zusätzlich: gequantelt!
- ✓  $m_s: m_{s,p} + m_{s,n}$



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

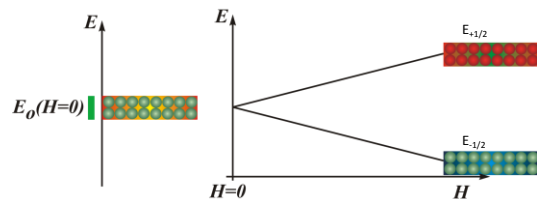
Frage: Wie kann die Energieentartung aufgehoben werden?

- 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!



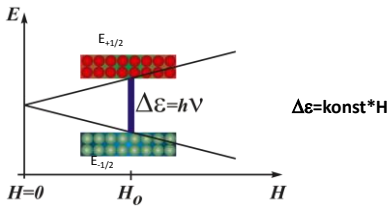
Frage: Was ist das Grundphänomen für MRT?

- Der Wasserstoffatomkern besteht aus einem Proton
- $m_{s,p} = 1/2 \rightarrow (2m_{s,p} + 1) = 2 \rightarrow n_p = 2$ ;  $E_{1/2}$  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  $m_s$ ?

- ✓  $\Delta E = \text{konst} \cdot \Delta m_s \cdot H$
- ✓  $\Delta m_s$  darf nur Eins sein!
- ✓ Aufgrund des Drehimpulserhaltungssatzes:  $\Delta l = 0$ ; das absorbierte Photon besitzt einen Drehimpuls  $1 \rightarrow$



**Zu Rechenaufgaben:**

$$\Delta E = g_T \cdot \mu_T \cdot H$$

$g_T$ : Lande-Faktor eines Teilchens;  
 $\mu_T$ : Magneton des Teilchens;

$$|\mathbf{g}_e| = 2.002319; \mathbf{g}_e = 5.5856912; |\mathbf{g}_N| = 3.82608545$$
$$\mu_N = 5.0508410^{-27} \text{ J/T} \quad \text{Kernmagneton}$$
$$\mu_B = 9.2710^{-24} \text{ J/T} \quad \text{Bohr-Magneton: das Magneton des Elektrons}$$
$$\Delta E = g_p \cdot \mu_N \cdot H$$
$$\Delta E_p = 5.5856912 \cdot 5.05084 \cdot 10^{-27} \text{ J/T} \cdot H(\text{T})$$
$$\Delta E_p = 2.82124325 \cdot 10^{-26} \text{ J/T} \cdot H(\text{T})$$
$$\Delta E_p(H=1\text{T}) = 2.82124325 \cdot 10^{-26} \text{ J}$$
$$\Delta E_p(H=1\text{T}) = \frac{2.82124325 \cdot 10^{-26} \text{ J}}{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}} = 1.76327703 \cdot 10^{-7} \text{ eV}$$

$$\mu_{\text{magnetisches}} = \mu_{\text{Magneton}} \cdot \frac{L}{\hbar}$$

s. Dia 15.

H.Aufg.: Vergleich mit durchschnittlicher kinetischen Energie =  $\langle kT \rangle$

**Wie groß ist die Frequenz?**

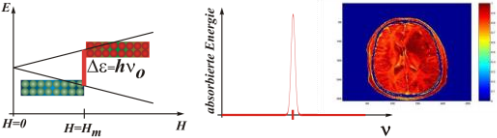
$$\Delta E_p = h \cdot f = 2.82124325 \cdot 10^{-26} \text{ J/T} \cdot H(\text{T})$$
$$f = \frac{2.82124325 \cdot 10^{-26} \text{ J/T}}{6.6 \cdot 10^{-34} \text{ J/s}} \cdot H(\text{T}) = 42.5771175 \text{ MHz/T}$$
$$f = 42.5771175 \text{ MHz/T} \cdot H(\text{T})$$

Rechenaufgabe:  
Bei einer Protonen-MRT-Untersuchung ist die benutzte magnetische Feldstärke 3,5 T.  
a.) Wie groß muss die Radiowellenfrequenz sein?  
b.) Wie groß ist die Energiedifferenz, in eV-Einheiten, zwischen den Grund- und angeregten Zuständen der Zeemanschen Niveaus?  
c.) Das Wievielfache der thermischen kinetischen Energie entspricht der oben berechneten Anregungsenergie?

**Charakteristische Größen:**

Frequenzbereich	40-200 MHz
Feldstärke (tesla)	-0,9 — +10
$\Delta E$ (J)	$2,85 \cdot 10^{-26} - 3,96 \cdot 10^{-15}$
$\Delta E$ (eV)	$1,66 \cdot 10^{-7} - 3,72 \cdot 10^{-5}$
Besetzungsdifferenz bezogen auf Besetzung des Grundniveaus	$3,2 \cdot 10^{-6} - 7,2 \cdot 10^{-5}$
gesamte absorbierte Energie (J) im Falle einer Populationsinversion	$2,55 \cdot 10^{-15} - 1,29 \cdot 10^{-12}$

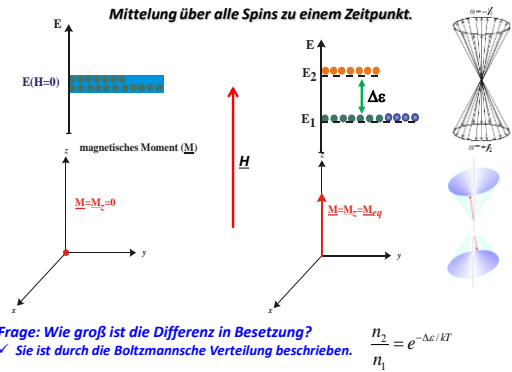
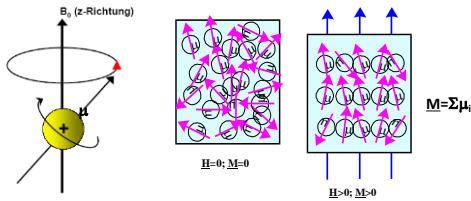
**Frage: Wie kann man die Protonendichte bestimmen?**



**Frage: Was für Atomkerne sind für MRT noch geeignet?**

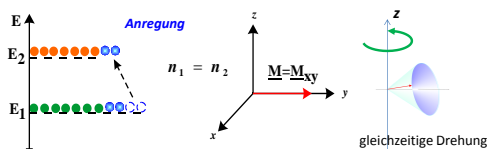
- Atomkerne die von Null unterschiedlichen Spin besitzen
- Ungepaarte Protonen und/oder Neutronen
- z.B.:  $^2\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ,  $^{17}\text{O}$ ,  $^{19}\text{F}$ ,  $^{23}\text{Na}$ ,  $^{31}\text{P}$

**molekulare Veranschaulichung des magnetischen Moments**



**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**



**Rechenaufgabe:**

Bei einer Protonen-MRT-Untersuchung ist die benutzte magnetische Feldstärke 1,5 T.

- Wie groß ist das Besetzungsverhältnis der Grund- und angeregten Niveaus?
- Wie viele Protonen wären im Angeregten Zustand, wenn die Anzahl der Protonen im Grundzustand  $n_g=10^7$  ist.
- Wie groß ist die Anzahl der Protonen im angeregten Zustand nach einer 90°-Puls?

**Frage: Wovon hängt die Relaxation(szeit) 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

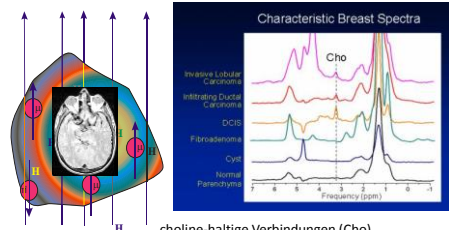


**Frage: Wie ändert sich das Signal mit der Relaxationszeit?**

- 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**

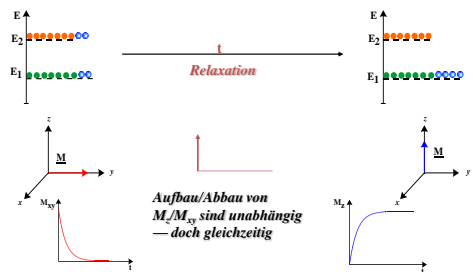
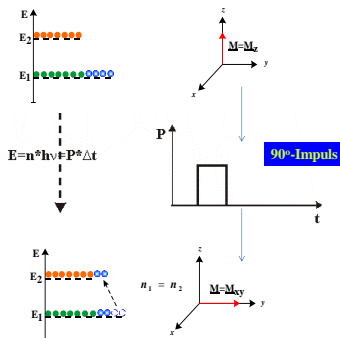
- Die Feldstärke des externen magnetischen Feldes wird durch die lokalen Wechselwirkungen verändert — lokales magnetisches Feld.
- **Die Anregungsfrequenz, die Signalamplitude hängt von der Umgebung des Protonenspins — von molekularen Zusammensetzung/Aufbau eines Gewebes**



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

**Frage: Wie können die Relaxationszeiten bestimmt werden?**

**H ist schon angelegt:**  
Aufspaltung der Energieniveaus



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

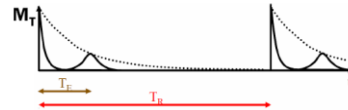
**Frage: Sind immer die selben Puls(Anregungs)sequenzen und Empfangssequenzen benutzt?**

- ✓ 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

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



$T_R$ : Repetitionszeit: Wiederholung einer bestimmten Sequenz von RF-Anregungen und magnetischen Feldgradienten; Wie viele Spins sind umgeklappt?

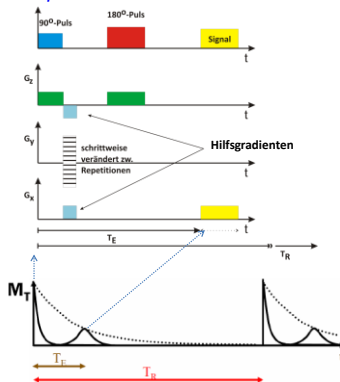
$T_E$ : Echozeit, Auslesezeit der Signale; Wie viele Spins sind beim Echo noch in Phase?

$T_E \gg T_2 \rightarrow e^{-T_E/T_2} \rightarrow e^{-\text{große Zahl}}$  kein Signal mehr

$T_E \ll T_2 \rightarrow e^{-T_E/T_2} \rightarrow e^{-\text{kleine Zahl}} \approx 1$  Auslese kurz nach Anregung; maximale Signalamplitude

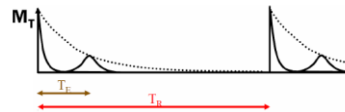
**Kontrastverfahren aufgrund  $\rho$ ,  $T_2$ ,  $T_1$  mit geeigneter Wahl für  $T_E$  und  $T_R$ ;  $T_E$  und  $T_R$  sind durch  $T_2$  und  $T_1$  beeinflusst.**

**Frage: Wie sieht eine MRI-Sequenz aus?**



**Protonendichte-Wichtung:  $T_R$  lang;  $T_E$  kurz**

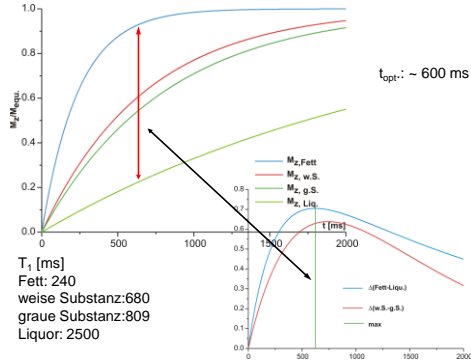
$$S \sim \rho \cdot e^{-T_E/T_2} \cdot (1 - e^{-T_R/T_1})$$



Protonendichte-Wichtung:  $T_R$  lang;  $T_E$  kurz

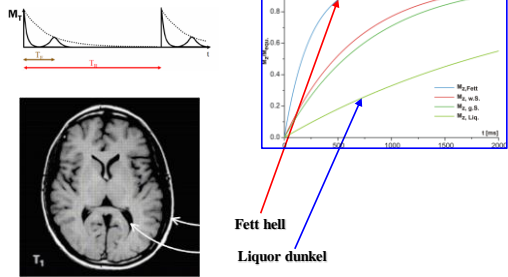
- ✓ Eine lange Repetitionszeit führt zu keinem nennenswerten Einfluss der  $T_1$ -Zeit auf das Bild. (Das zweite Glied ist  $\sim 1$ ).
- ✓ Eine kurze Echozeit bedeutet, dass auch kein beobachtbarer Einfluss der  $T_2$ -Zeit existiert. (Das erste Glied ist  $\sim 1$ ).
- ✓ Der einzige Unterschied besteht nunmehr in der Größe der Gleichgewichtsmagnetisierung. Gewebe mit unterschiedlicher Protonenzahl sind somit bei dieser Parametereinstellung unterscheidbar.

**$T_1$ -Relaxation**



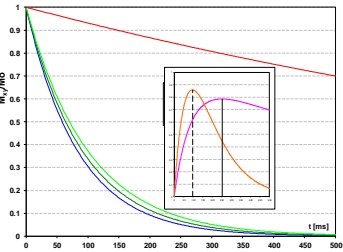
**$T_1$ -Kontrast — maximal bei  $T_R \approx T_1$**

$T_R < T_2$  um  $T_2$  Abhängigkeit zu minimieren;  
 $T_R$  kurz;  $T_E$  kurz

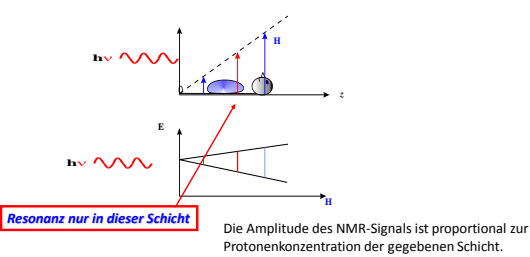


**$T_2$ -Kontrast — maximal bei  $T_E \approx T_2$**

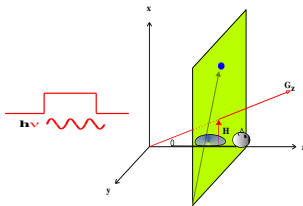
$T_R \gg T_1$  um  $T_1$  Abhängigkeit zu minimieren  
 $T_R$  lang;  $T_E$  lang



**Frage: Was ist die Rolle der magnetischen Feldgradienten**



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.

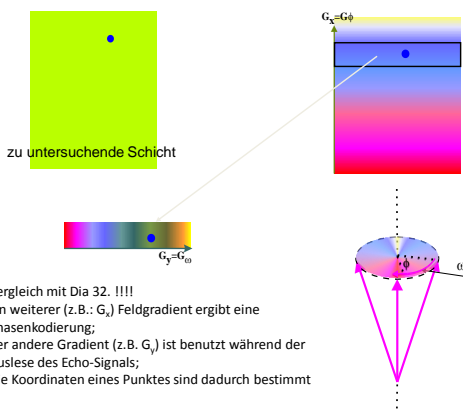


Ein Feldgradient entlang der z-Achse erlaubt die Auswahl einer Schicht. Die Bestrahlungsfrequenz und die magnetische Feldstärke bestimmen die Schicht, wo die Protonen angeregt werden — Quelle der registrierten Signale

Rechenaufgabe:

Bei einem Protonen-MRT Gerät sei der  $G_z$ -Feldgradient 5 mT/m und die Anregungsfrequenz 100 MHz.

- Berechnen Sie die magnetischen Feldstärken an den Rändern einer 2-mm-Dicken Gewebeschnitt.
- Wie groß ist die Verschiebung in den Resonanzfrequenzen bei den Rändern?
- Geben Sie die relativen Frequenzverschiebungen ( $\delta f/f_0$ ) an!



#### 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 empfohlene Literatur:

- <http://ebookbrowse.com/lueticke-seminar-ss09-pdf-d295966112>;
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Magnetresonanztomografie>;
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Magnetresonanztomographie>;
- [http://de.wikipedia.org/wiki/Diffusions-Tensor-Bildgebung/Diffusionsgewichtete\\_MRT-Sequenzen](http://de.wikipedia.org/wiki/Diffusions-Tensor-Bildgebung/Diffusionsgewichtete_MRT-Sequenzen);

<http://www.imaio.com/en/>