

Vorlesung 3

Karim Kouz

SS2017 2. Semester Biophysik

MRT

Karim Kouz

SS2017 2. Semester Biophysik

Grundlagen der MRT

- MRT = Magnetresonanztomographie
- Bildgebendes Verfahren, das Schnittbilder liefert, wobei die Schnittführung frei wählbar ist (koronar, sagittal, horizontal aber auch jeder andere beliebige Schnittführungswinkel)
- Im Vergleich zum CT wird bei der MRT keine Röntgenstrahlung verwendet
- Die MRT wird hauptsächlich zur Darstellung von Weichteilgewebe genutzt



Quelle: http://www.klinikum.uni-heidelberg.de/shows/ingleNews.176.0.html?&no_cache=1&tx_ttnews%5Btt_news%5D=5705

3

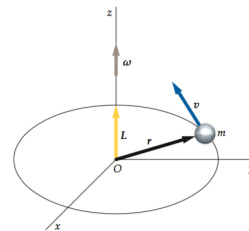
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Drehimpuls (l)

- Der Drehimpuls charakterisiert die Rotationsbewegung eines Körpers:

$$l = m \cdot r \cdot v = m \cdot r^2 \cdot \omega$$

$$v = \frac{s}{t} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{t} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot f = r \cdot \omega$$



- Der Drehimpuls ist eine Erhaltungsgröße (Impulserhaltungssatz)

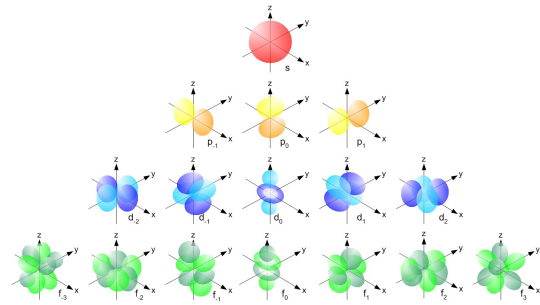
Quelle: Tipler, Paul A.; Mosca, Gene; Kommer, Christoph (2015): Physik. Für Wissenschaftler und Ingenieure, 7. Aufl. Hg. v. Jenny Wagner. Springer Spektrum

4

Karim Kouz, Biophysik SS2017

Bahndrehimpuls

- Elektronen bewegen sich um den Atomkern auf Bahnen (Orbitale) – sie besitzen also auch einen Drehimpuls:
 - s-Orbital → kugelförmig (sharp)
 - p-Orbital → hantelförmig (principal)
 - d-Orbital → gekreuzte Doppelhantel (diffuse)
 - f-Orbital → rosettenförmig (fundamental)
- Der Bahndrehimpuls auf dem s-Orbital ist im Durchschnitt $l = 0$ (unabhängig vom Besetzungszustand), bedingt durch die kugelförmige Bahn
- Bei vollbesetzten Bahnen ist der Gesamtbahndrehimpuls ebenfalls $l = 0$
- Bei nicht vollbesetzten Bahnen, außer der s-Bahn, ist jedoch ein Drehimpuls, der von „Null“ verschieden ist, vorhanden



Quelle: <http://physics.stackexchange.com/questions/2000/why-dont-electrons-crash-into-the-nuclei-they-orbit>

5

Karim Kouz, Biophysik SS2017

Magnetisches Moment (μ)

- Ein rotierendes System geladener Teilchen besitzt ein magnetisches Moment μ , das proportional zu seinem Gesamtdrehimpuls ist
- Elektronen (geladene Teilchen) bewegen sich um den Kern auf Kreisbahnen – sie besitzen also auch ein magnetisches Moment
- Im Durchschnitt ist das magnetische Moment auf dem s-Orbital „Null“ (unabhängig vom Besetzungszustand)
- Bei vollbesetzten Bahnen ist das magnetische Moment ebenfalls „Null“
- Bei nicht vollbesetzten Bahnen ist jedoch ein magnetisches Moment – das von „Null“ verschieden ist – vorhanden (außer bei der s-Bahn)

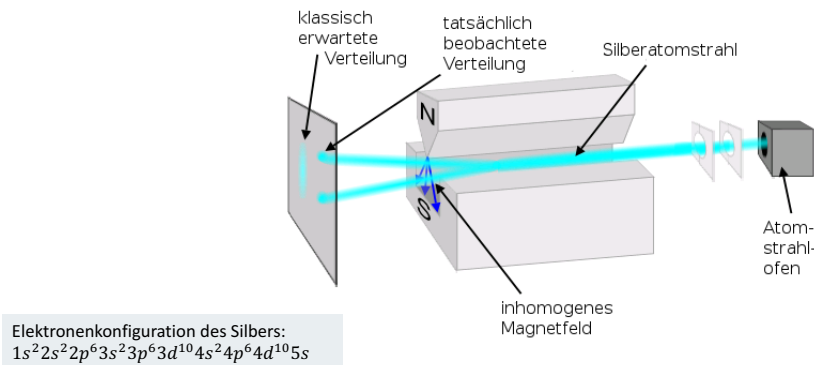
$$\mu = \frac{q}{2 \cdot m} \cdot l$$

6

Karim Kouz, Biophysik SS2017

Stern-Gerlach-Experiment

- Ein Silberdampfstrahl wird durch ein inhomogenes Magnetfeld geschickt
- Beim Durchlaufen des Magnetfeldes teilt sich der Strahl in zwei Teilstrahlen auf



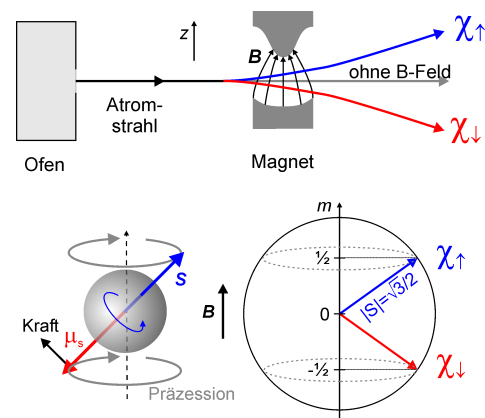
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Stern-Gerlach-Versuch>

7

Erklärung Stern-Gerlach-Experiment

- Elektronenkonfiguration des Silbers:
 - $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 5s$
 - Alle Schalen liegen vollbesetzt vor, außer der 5s-Schale
 - Das Atom dürfte also eigentlich kein resultierendes magnetisches Moment besitzen – das inhomogene Magnetfeld sollte somit nicht mit einer Kraft auf die Silberatome wirken und den Strahl aufteilen
- Die Elektronen drehen sich jedoch nicht nur um den Atomkern, sondern auch um ihre eigene Achse mit einem dazugehörigen Eigendrehimpuls = Spin
- Durch den Spin besitzt das Atom letztendlich doch ein magnetisches Moment, sodass das Magnetfeld den Strahl aufteilen kann
- Je nach Orientierung des Spins wird der Strahl nach oben oder unten hin abgelenkt



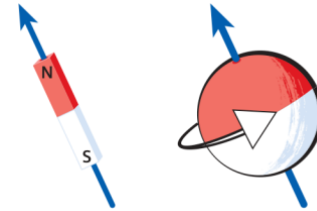
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: http://www.gd.uni-siegen.de/lehre/chemie-skript/10_10.html

8

Spin (Eigendrehimpuls)

- Der Spin ist eine rein quantenmechanische Eigenschaft
- Nicht nur Elektronen besitzen einen Spin, sondern auch z.B. Protonen und Neutronen
- Man stellt sich Elementarteilchen vor, die sich wie die Erde, um ihre eigene Achse drehen
- Für den Spin gilt:
 - Er wirkt stets in irgendeine Richtung (Vektor)
 - Er bleibt immer gleich, lediglich die Achsenrichtung variiert
 - Er kommt nie zum Stillstand (Eigenschaft des Teilchens)
 - Die Rotation ist lediglich eine Hilfe zur Veranschaulichung, die nicht immer gültig, aber für die Vorstellung hilfreich ist



Quelle: Magnete, Spins und Resonanz, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

9

Karim Kouz, Biophysik SS2017

Spin

- Die Einheit des Spins ist $[J \cdot s]$
- Elektronen, Positronen, Protonen und Neutronen besitzen einen Spin von $\frac{1}{2}$
- Für das magnetische Moment gilt:

$$\mu = \gamma \cdot \frac{h}{2\pi} \cdot s$$

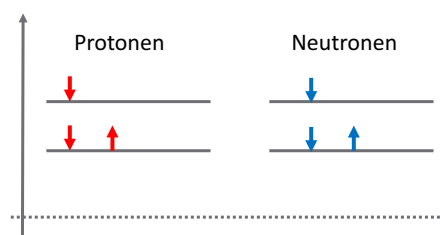
γ : gyromagnetisches Verhältnis
 s : Spinquantenzahl $\left(+\frac{1}{2}; -\frac{1}{2}\right)$

10

Karim Kouz, Biophysik SS2017

Spin in Atomkernen

- Auch die Nukleonen (Protonen und Neutronen) besitzen einen Spin
- Protonen und Neutronen haben im Atomkern getrennte Schalenstrukturen und Energiestrukturen (ähnlich den Elektronen)
- Den Gesamtspin eines Atomkerns erhält man durch Addition der Spins von Protonen und Neutronen



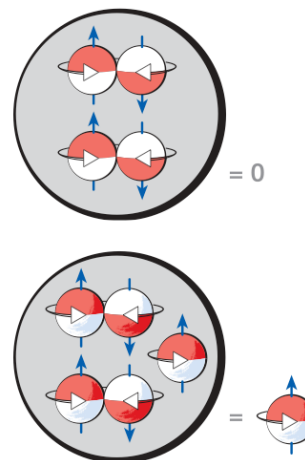
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Karim Kouz (03/2015) in Anlehnung an Vorlesungsskript Biophysik 2012 Semmelweis Universität Budapest

11

Welche Atome sind für die MRT geeignet?

- Atomkerne, die einen von Null verschiedenen Spin besitzen, d.h.:
 - Ungepaarte Protonen oder
 - Ungepaarte Neutronen oder
 - Ungepaarte Protonen und Neutronen
- Wasserstoff, als das häufigste Element, im menschlichen Körper besteht nur aus einem Proton – es ist das empfindlichste Element für die MRT
- Für die MRT nicht nutzbar sind Atomkerne mit gepaarten Protonen und gepaarten Neutronen



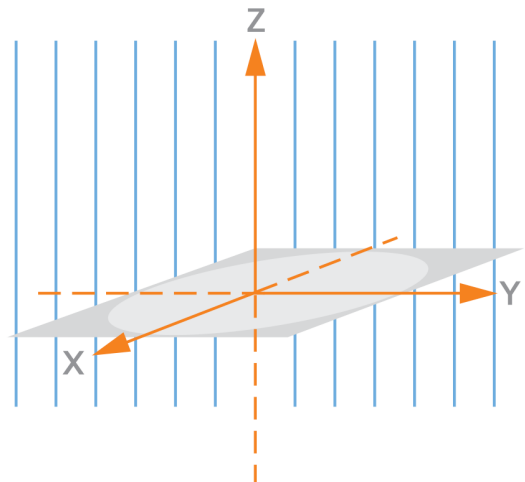
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Magnets, Spins und Resonanzen. Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

12

Achsen bei der MRT

- Die z-Achse zeigt in Richtung des starken Magnetfeldes (B_0), das durch das MRT-Gerät erzeugt wird
- Die Ebene, die quer zu den Feldlinien des Magnetfeldes verläuft, wird xy-Ebene genannt



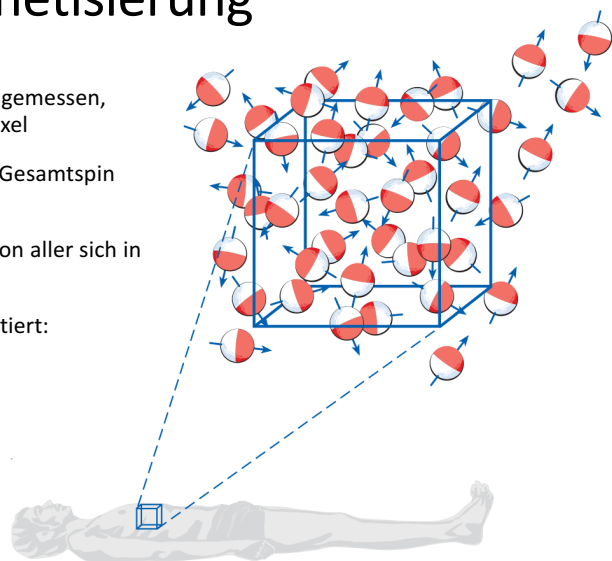
Quelle: Magnete, Spins und Resonanz. Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie. Siemens medical

13

Karim Kouz, Biophysik SS2017

Grundlagen der Magnetisierung

- Bei der Messung werden keine einzelnen Spins gemessen, sondern die Gesamtheit aller Spins in einem Voxel
- Die Gesamtheit aller Spins in einem Voxel wird Gesamtspin oder auch Spinensemble genannt
- Den Gesamtspin erhält man durch Vektoraddition aller sich in einem Voxel befindenden Spins
- Im feldfreien Raum sind alle Spins zufällig orientiert:
 - Der Gesamtspin ist vom Betrag her „Null“
 - Der Voxel wirkt nach außen hin unmagnetisch



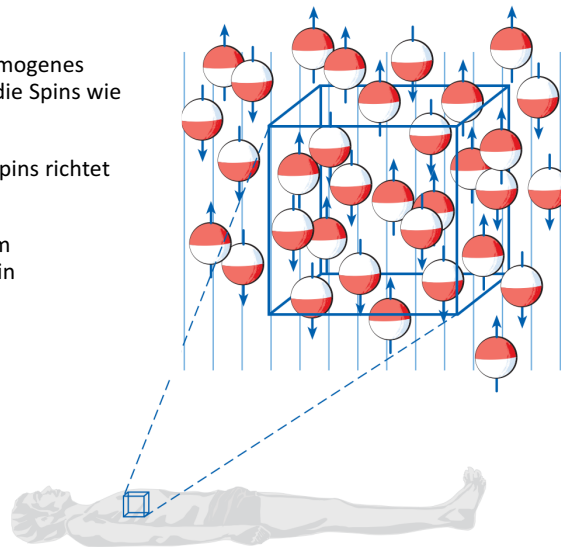
Quelle: Magnete, Spins und Resonanz. Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie. Siemens medical

14

Karim Kouz, Biophysik SS2017

Grundlagen der Magnetisierung

- Beim Einbringen des Voxels in ein sehr starkes homogenes Magnetfeld (supraleitender Magnet) sollten sich die Spins wie viele Kompassnadeln verhalten und orientieren
- Dies geschieht jedoch nur zum Teil – ein Teil der Spins richtet sich mit, ein Teil gegen das Magnetfeld aus
- Die vereinfachte Darstellung eines Spins mit einem Stabmagneten scheint also nicht ganz gültig zu sein



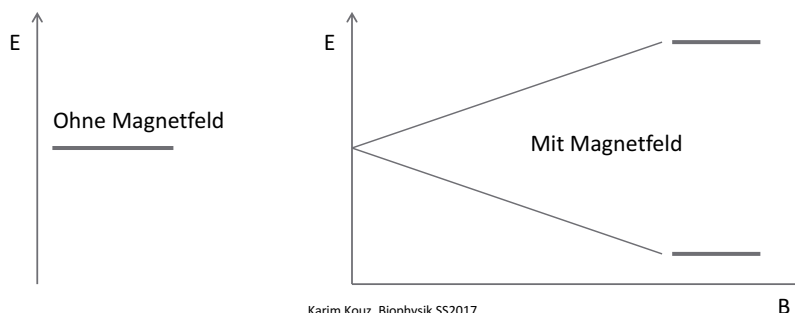
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Magnets, Spins und Resonanzen, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

15

Energieentartung

- Werden Wasserstoffatomkerne (Protonen) in ein homogenes magnetisches Feld gebracht, so wird das Energieniveau dieser in zwei Energieniveaus – Grundniveau und Anregungsniveau – aufgespalten
- Die Aufspaltung der Energieniveaus nennt man „Aufhebung der Energieentartung“ – den beobachteten Effekt (Kern-)Zeeman-Effekt
- Je größer das Magnetfeld, desto größer ist die Aufspaltung



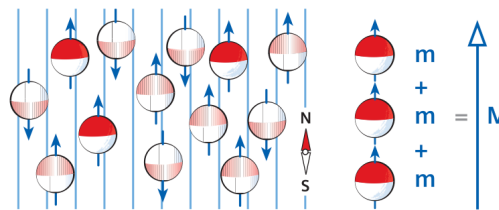
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Karim Kouz (03/2015)

16

Magnetisierung

- Beim Einbringen des Voxels in das Magnetfeld richtet sich ein Teil der Spins mit und ein Teil der Spins gegen das Magnetfeld aus
- Das Verhältnis der Aufteilung beträgt jedoch nicht 50:50 – im Fall des Wasserstoffs richten sich mehr Spins mit dem Magnetfeld als gegen das Magnetfeld aus (im Folgenden wird nur noch Wasserstoff betrachtet)
- Die Anzahl der „Überschuss“-Spins mit ihren einzelnen magnetischen Momenten sorgt schließlich für die Nettomagnetisierung des Voxels – der menschliche Körper wird also beim Einbringen in ein starkes magnetisches Feld messbar in z-Richtung magnetisiert (Längsmagnetisierung)



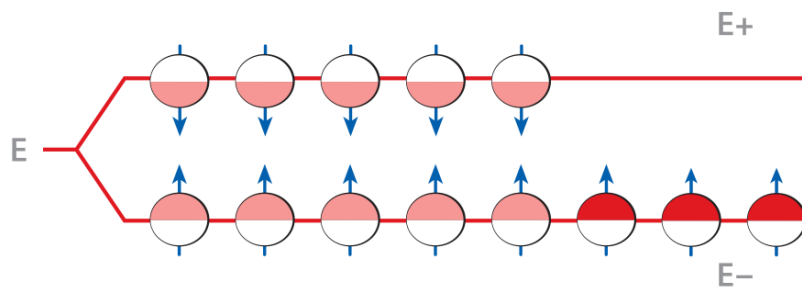
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Magnets, Spins und Resonanzen, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

17

Magnetisierung

- Nach dem Einbringen eines Voxels in ein Magnetfeld ist dieser also magnetisiert, da:
 - Die Spins nur noch in genau zwei Richtungen zeigen
 - Die energetisch günstigere Ausrichtung überwiegt
- Energetisch günstig ist die Ausrichtung, bei der das magnetische Moment in Richtung z-Achse zeigt (positiv ist) – die energetisch günstigere Ausrichtung ist abhängig von der Teilchenart



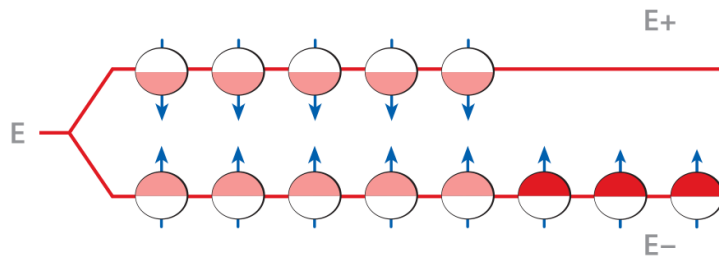
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Magnets, Spins und Resonanzen, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

18

Magnetisierung

- Die Besetzung der Energieniveaus bei Einbringung in ein Magnetfeld lässt sich mit Hilfe der Boltzmann-Verteilung bestimmen
- Die Größe des Überschusses hängt von mehreren Faktoren ab:
 - Steigt mit der Protonendichte (also der Anzahl der Protonen in einem Voxel)
 - Steigt mit zunehmender Stärke des äußeren Magnetfeldes
 - Sinkt mit steigender Temperatur



Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Magnet. Spins und Resonanzen. Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

19

Magnetisierung

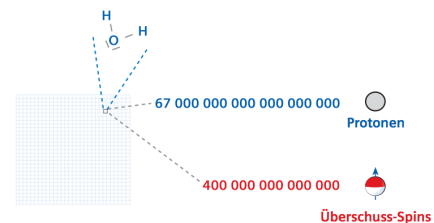
Bei Körpertemperatur befinden sich unter 1 Million Protonen nur etwa 6 Überschuss-Spins, wenn man diese einem Magnetfeld mit einer Feldstärke von 1 Tesla aussetzt.



Die Zahl der Überschuss-Spins ist relativ gering. Trotzdem kommt ein messbarer Effekt zustande.



Betrachtet man 1 Voxel mit 1 mm Kantenlänge, so fasst dieser 1 ml Wasser. Dieses Volumen enthält ca. $6,7 \cdot 10^{19}$ Wasserstoffprotonen. Wird dieser Voxel einem Magnetfeld von 1 Tesla ausgesetzt, so setzt sich die Netto-Magnetisierung durch die Wasserstoffprotonen aus rund 400 Billionen Überschuss-Spins mit ihrem magnetischen Moment zusammen.



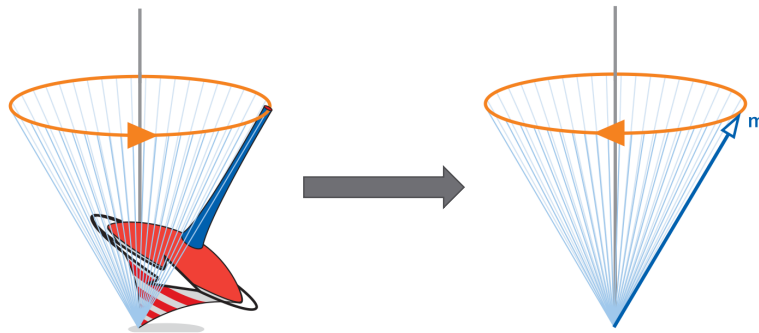
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Magnet. Spins und Resonanzen. Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

20

Präzessionsbewegung

- Die Spins zeigen keinesfalls nur exakt in die beiden Richtungen der z-Achse
- Sie führen eine besondere Form der Bewegung um die Orientierung der Feldlinien durch, sobald sie in ein magnetisches Feld gebracht werden – die Präzessionsbewegung



Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Magnete, Spins und Resonanzen. Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

21

Präzessionsbewegung

- Die Geschwindigkeit und somit auch die Frequenz mit der der Spin kreiselt, hängt von zwei Faktoren ab:
 - Kerntyp
 - Stärke des angelegten Magnetfeldes
- Die Kreisfrequenz dieser Kreisel-Bewegung wird als Larmor-Frequenz bezeichnet:

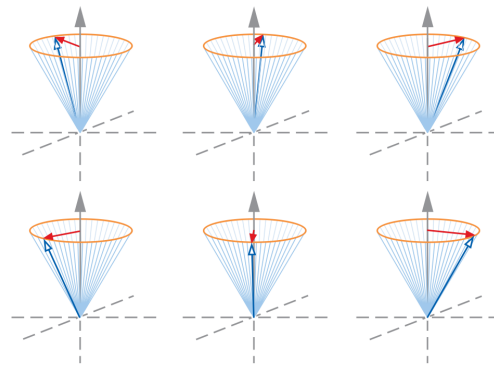
$$f_L = \frac{\gamma \cdot B_0}{2\pi}$$

Karim Kouz, Biophysik SS2017

22

Grundzustand der Kernspins

- Im absolut homogenen Magnetfeld präzedieren alle Spins mit der gleichen Frequenz – aber nicht phasengleich
- Ihre Komponenten in der xy-Ebene heben sich daher gegenseitig auf – es ist kein Signal messbar
- Um ein Messsignal zu bekommen, müsste die Präzession der Spins phasengleich sein – dies kann von außen durch eine elektromagnetische Welle erfolgen (= HF-Puls)



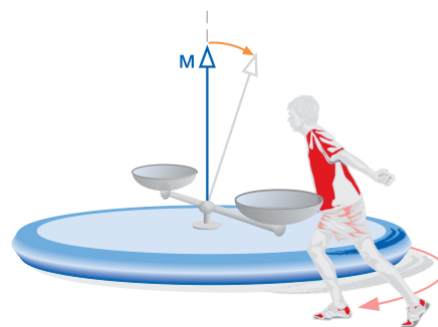
Quelle: Magnete, Spins und Resonanzen, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

23

Karim Kouz, Biophysik SS2017

Auslenkung der Spins

- Die Spins können durch eine elektromagnetische Welle, die in das statische Magnetfeld geschickt wird, beeinflusst werden (= Auslenkung)
- Dabei kann die magnetische Komponente der elektromagnetischen Welle die Spins beeinflussen
- Dies passiert, wenn die Resonanzbedingung erfüllt ist: die Frequenz der elektromagnetischen Welle (des HF-Pulses) muss mit der Larmor-Frequenz übereinstimmen



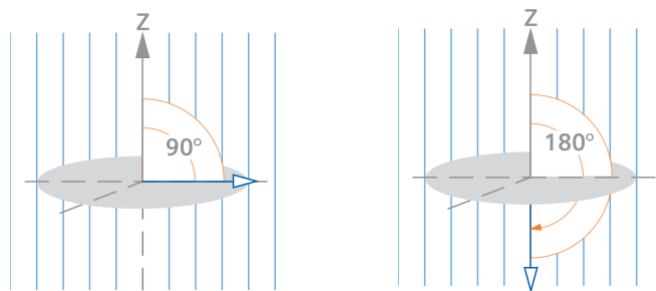
Quelle: Magnete, Spins und Resonanzen, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

24

Karim Kouz, Biophysik SS2017

Pulse und Kippwinkel

- Abhängig davon, wie stark der HF-Puls ist, kann der Spin um bestimmte Winkel gekippt werden (Kippwinkel)
- Bei der MRT sind der sogenannte 90°- und 180°-Puls von Bedeutung



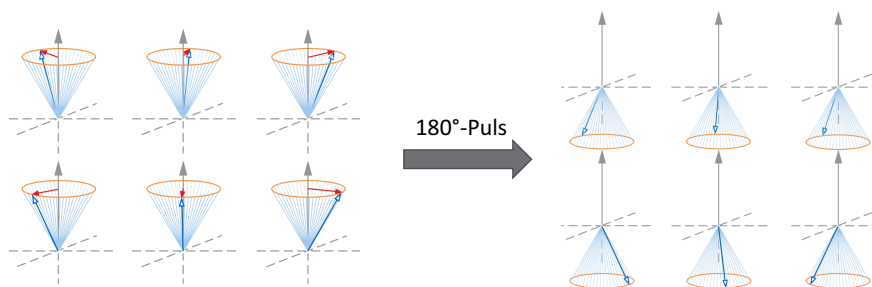
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Magnete, Spins und Resonanzen, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

25

180°-Puls

- Nach einem 180°-Puls sind die Überschuss-Spins vom Up-Spin- in den Down-Spin-Zustand gesprungen – die Längsmagnetisierung hat lediglich ihr Vorzeichen gewechselt
- Der Down-Spin-Zustand ist der instabilere Zustand, da magnetisches Moment und B-Feld nicht gleich orientiert sind (antiparallel)
- Nach dem Puls kehren die Spins nach kurzer Zeit wieder in das Gleichgewicht zurück (parallele Ausrichtung)



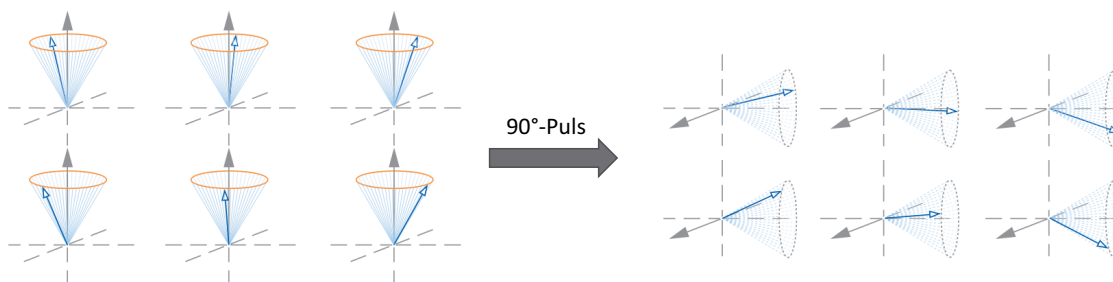
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Magnete, Spins und Resonanzen, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

26

90°-Puls

- Nach einem 90°-Puls wird die Magnetisierung in die Querrichtung (xy-Ebene) gekippt
- Am Ende des 90°-Pulses zeigen alle Spins in dieselbe Richtung in der xy-Ebene (sie sind phasengleich – in diesem Beispiel zeigen alle Spins nach rechts)
- Die Nettomagnetisierung in z-Richtung ist unmittelbar nach dem 90°-Puls vom Betrag her „Null“



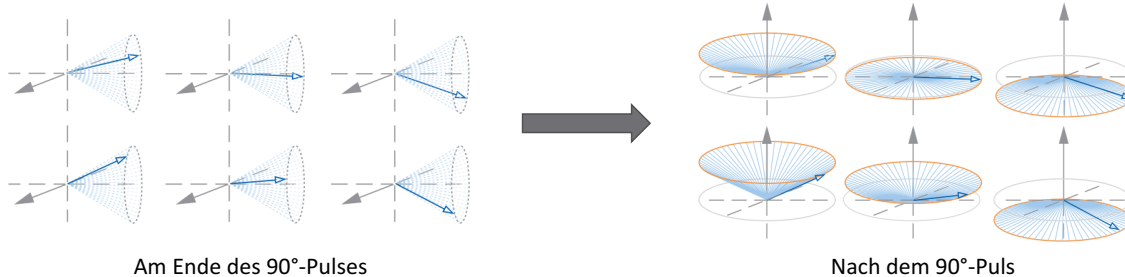
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Magnets, Spins und Resonanzen. Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

27

90°-Puls

- Nach dem 90°-Puls wirkt wieder nur noch das statische Magnetfeld in z-Richtung
- Die Spins kreisen weiter um die z-Achse – da sie phasengleich präzedieren, erzeugen sie eine Magnetisierung in der xy-Ebene (Quermagnetisierung)
- Die Quermagnetisierung ist genauso groß wie die ursprüngliche Längsmagnetisierung



Am Ende des 90°-Pulses

Nach dem 90°-Puls

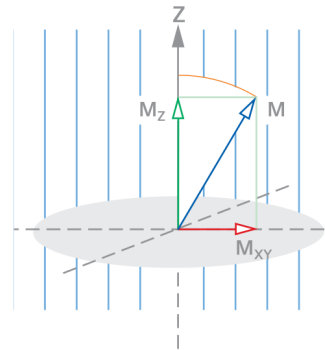
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Magnets, Spins und Resonanzen. Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

28

Relaxation

- Der Vorgang, bei dem ein System aus einem Nichtgleichgewichtszustand in das Gleichgewicht zurückkehrt, wird als Relaxation bezeichnet
- Nach einem 90°-Puls baut sich die Quermagnetisierung nach kurzer Zeit wieder ab und die Längsmagnetisierung wieder voll auf
- Dabei zerfällt die Quermagnetisierung (M_{xy}) schneller, als sich die Längsmagnetisierung (M_z) wieder aufbaut
- Sowohl der Abbau von M_{xy} als auch der Aufbau von M_z verlaufen exponentiell



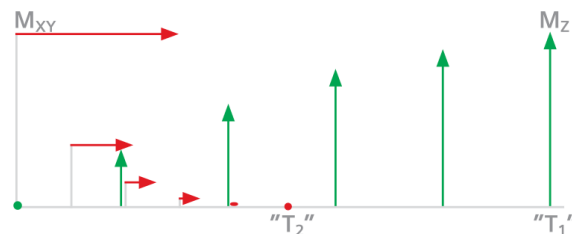
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Magnete, Spins und Resonanzen, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

29

Relaxation

- Der Aufbau der Längsmagnetisierung (T_1) dauert länger als der Abbau der Quermagnetisierung (T_2)



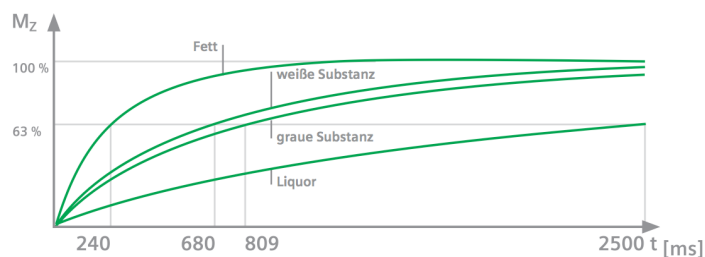
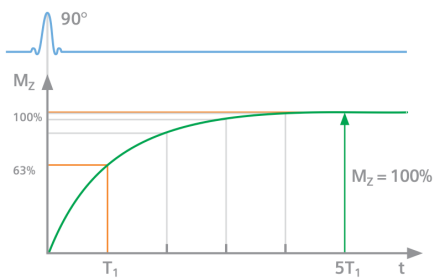
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Magnete, Spins und Resonanzen, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

30

T_1 -Relaxation (Längsrelaxation)

- Die Zeit, die benötigt wird, bis sich die Längsmagnetisierung wieder bis auf 63% ihres Ausgangswertes aufgebaut hat – sie ist gewebespezifisch und abhängig von der Feldstärke des statischen Magnetfeldes
- Die Gewebespezifität schafft Kontraste in der MRT
- Fett hat eine kurze T_1 -Zeit (hell), Wasser hat eine lange T_1 -Zeit (dunkel)



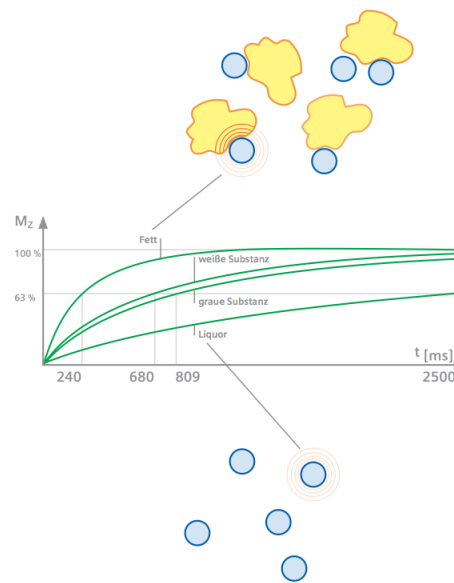
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Magnet. Spins und Resonanzen, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

31

Längsrelaxation

- Die Spins relaxieren nach einem 90° -Puls wieder in den Grundzustand, weil sie durch lokal schwankende Magnetfelder beeinflusst/gestört werden
- Diese schwankenden Magnetfelder werden durch die Molekularbewegung hervorgerufen (magnetische Dipolfelder von ungepaarten Elektronen und anderen Kernen) und werden als magnetisches Rauschen bezeichnet
- Sehr störend sind HF-ähnliche Signale, die mit der Larmor-Frequenz übereinstimmen – sie wirken wie Pulse, sodass die Spins anfangen zu „flippen“ und relaxieren



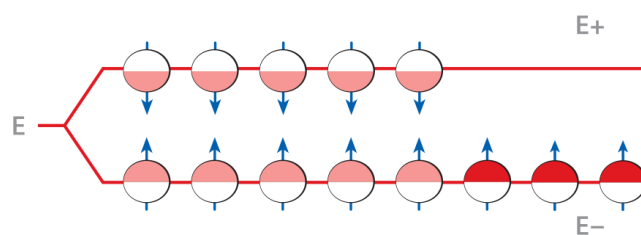
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Magnet. Spins und Resonanzen, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

32

Längsrelaxation

- Die Längsrelaxation wird auch Spin-Gitter-Relaxation genannt
- Als Gitter wird die Umgebung des Protons bezeichnet, auch wenn es sich hierbei um eine Flüssigkeit handelt
- Während der Längsrelaxation geben die Spins Energie an das Gitter ab, wobei sich dieses erwärmt
- Der Prozess findet nicht nur nach HF-Pulsen statt, sondern auch schon bei der Aussetzung des Patienten im Magnetfeld und der sich dabei aufbauenden Längsmagnetisierung (Zeeman-Effekt)



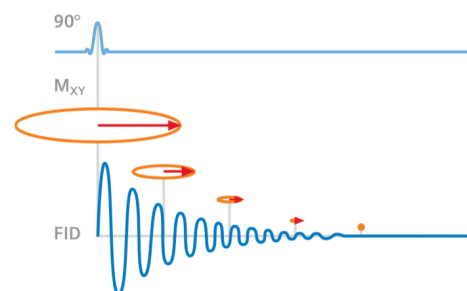
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Magnete, Spins und Resonanzen, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

33

Quermagnetisierung

- Nach einem 90°-Puls sind die Spins in die xy-Ebene gekippt
- Da die Spins am Ende des 90°-Puls alle phasengleich sind, resultiert eine Nettomagnetisierung in der xy-Ebene – die Quermagnetisierung – die vom Betrag her genauso groß ist wie die Längsmagnetisierung
- Der Abfall der Quermagnetisierung kann gemessen werden und wird „Freier Induktionsabfall (FID)“ genannt



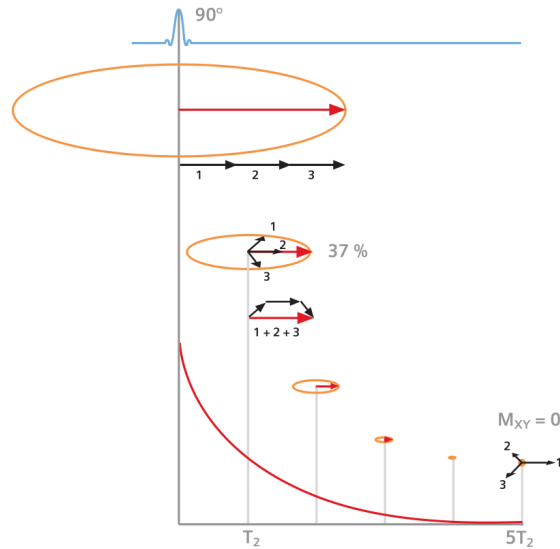
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Magnete, Spins und Resonanzen, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

34

Querrelaxation

- Der Abfall der Quermagnetisierung ist damit zu begründen, dass die am Anfang phasengleichen Spins mit der Zeit dephasieren
- Die Dephasierung findet aufgrund von zwei Prozessen statt:
 - Wechselwirkungen untereinander (Spin-Spin-Relaxation)
 - Feldschwankungen



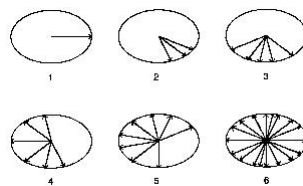
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Magnet. Spins und Resonanz, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

35

Spin-Spin-Relaxation

- Spins können untereinander Energie abgeben
- Ein Spin, der in die xy-Ebene gekippt wurde, kann seine Energie an einen anderen Spin abgeben, sodass dieser in die xy-Ebene kippt – er selbst kehrt dabei in seinen Grundzustand zurück
- Charakteristisch für diesen Prozess ist:
 - Das Spin-Verhältnis bleibt gleich, d.h., die Zahl der nicht angeregten und der angeregten Spins bleibt gleich
 - Die Gesamtenergie der Spins bleibt gleich
 - Durch den Prozess sind die Spins nicht mehr phasengleich – die Quermagnetisierung nimmt dadurch ab



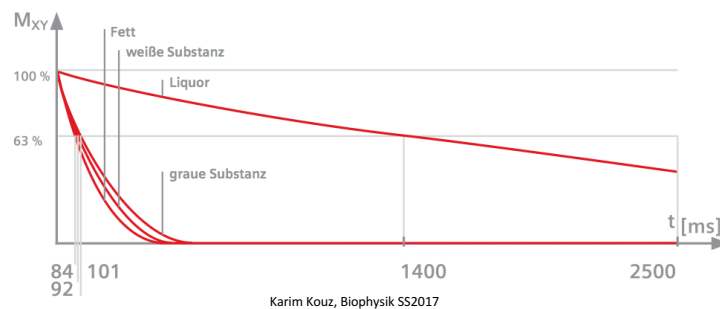
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: <http://www.mri.de/mrmax/mrgrund.html>

36

T₂-Relaxation (Querrelaxation)

- Die Zeit, die benötigt wird, bis die Quermagnetisierung auf ca. 37% ($\frac{1}{e}$) ihres Ausgangswertes abgefallen ist – sie ist gewebespezifisch und weitgehend unabhängig von der Feldstärke des statischen Magnetfeldes
- Die Gewebespezifität schafft Kontraste in der MRT
- Fett hat eine kurze T₂-Zeit (dunkel), Wasser hat eine lange T₂-Zeit (hell)

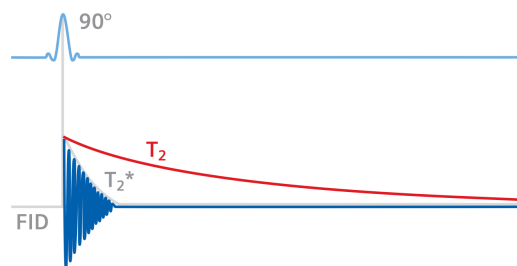


37

Quelle: Magnete, Spins und Resonanzen, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

FID und T₂-Relaxation

- Der Abfall der Quermagnetisierung kann gemessen werden und wird „Freier Induktionsabfall (FID)“ genannt
- Die FID sollte also mit der T₂-Zeit abfallen
- Tatsächlich fällt die FID jedoch wesentlich schneller ab als mit der T₂-Zeit
- Die Zeitkonstante der FID wird T₂^{*} genannt



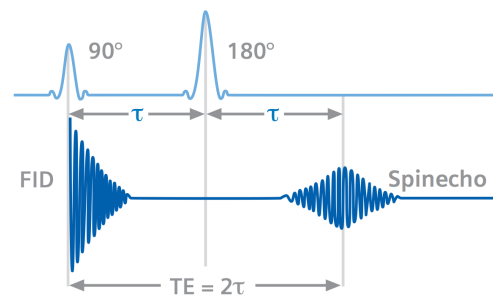
Karim Kouz, Biophysik SS2017

38

Quelle: Magnete, Spins und Resonanzen, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

T_2^* -Relaxation

- Die Prozesse, die den T_2 -Abfall verursachen, sind statistische Prozesse – sie sind nicht umkehrbar
- Das statische Magnetfeld, das homogen sein sollte, ist nicht homogen – es ist inhomogen
- Die Spins „spüren“ diese Inhomogenitäten und haben dadurch unterschiedliche Larmor-Frequenzen (einige kreiseln schneller, andere langsamer)
- Diese rein statischen Magnetfeldunterschiede sind sowohl zeitlich als auch räumlich konstant – sie tragen zusätzlich zur Dephasierung der Spins bei
- Durch einen technischen Trick kann der durch die Magnetfeldunterschiede bedingte Abfall rückgängig gemacht werden – ein Spinecho wird erzeugt



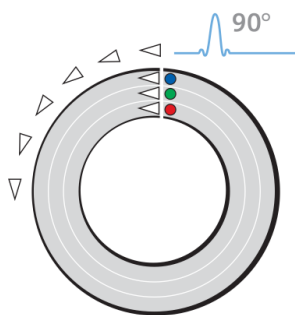
Quelle: Magnete, Spins und Resonanzen, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

39

Karim Kouz, Biophysik SS2017

Erzeugung eines Spinechos

- Zum Verständnis des Spinechos dient folgendes Beispiel:
 - Die Spins stellen wir uns als Läufer vor
 - Am Ende des 90° -Pulses: Alle Läufe starten an der Startlinie gemeinsam (Spins sind alle am Ende des 90° -Puls phasengleich und schauen in dieselbe Richtung)



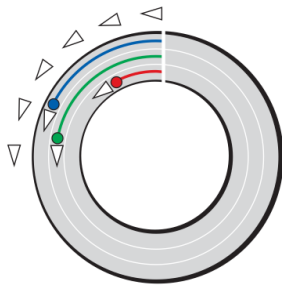
Quelle: Magnete, Spins und Resonanzen, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

40

Karim Kouz, Biophysik SS2017

Erzeugung eines Spinechos

- Kurze Zeit nach dem 90°-Puls: Die unterschiedlichen Läufer laufen unterschiedlich schnell – ihre Geschwindigkeit wird als konstant angesehen (die Spins laufen ebenfalls aufgrund von Magnetfeldinhomogenitäten unterschiedlich schnell)



Karim Kouz, Biophysik SS2017

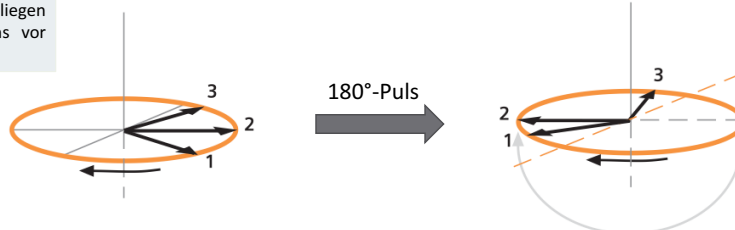
Quelle: Magnets, Spins und Resonanzen. Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

41

Erzeugung eines Spinechos

- Da das Auseinanderlaufen systematisch erfolgt (die Läufer laufen mit einer konstanten Geschwindigkeit bzw. die Spins kreiseln mit konstanter Larmor-Frequenz) ist der Prozess umkehrbar
- Den Läufern wird nach einiger Zeit befohlen, sich umzudrehen und zurückzulaufen
- Analog kann man die Spins zum Umkehren zwingen – durch einen 180°-Puls wird die Phasenreihenfolge der Spins geändert, die Kreiselrichtung bleibt jedoch gleich

Spin 1 ist schneller als 2 und 3 – er liegt vor 2 und 3. Nach der Phasenumkehr liegen die langsameren Spins vor den schnelleren Spins.



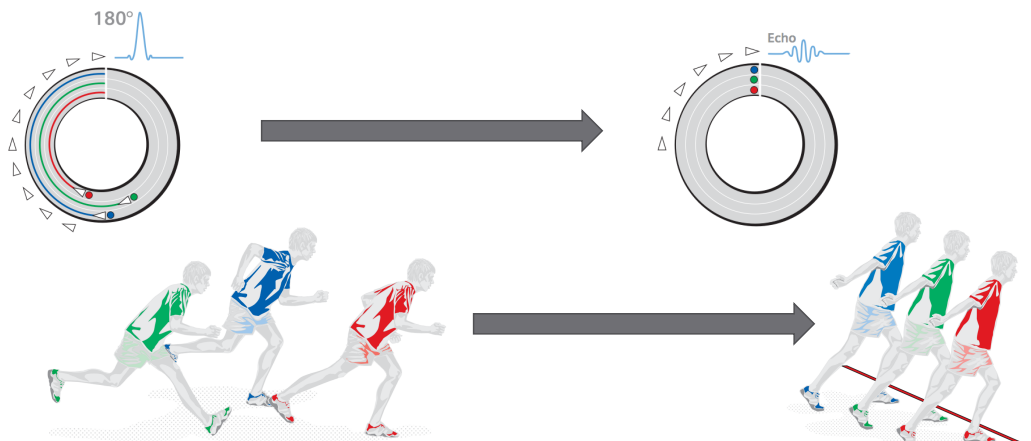
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Magnets, Spins und Resonanzen. Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

42

Erzeugung eines Spinechos

- Durch den Umkehrbefehl treffen sich die Läufer nach derselben Zeit, die sie gelaufen sind, wieder an der Startlinie (die Spins rephasieren wieder)



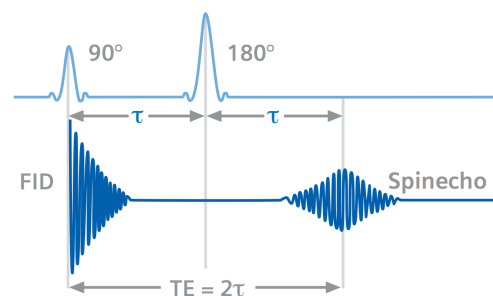
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Magnete, Spins und Resonanzen, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

43

Das Spinecho

- Durch einen 180° -Puls kann also das MR-Signal wiederholt werden
- Die Zeit von der Amplitude bis zur nächsten Amplitude nach einem 180° -Puls wird als Echozeit TE bezeichnet
- Die Amplitude des Spinechos ist jedoch kleiner als die Amplitude unmittelbar nach dem 90° -Puls
- Die Abnahme der Amplitude ist durch die T_2 -Relaxation begründet – Dephasierungen, die nicht aufgrund von Feldinhomogenitäten bedingt sind, sind nicht umkehrbar



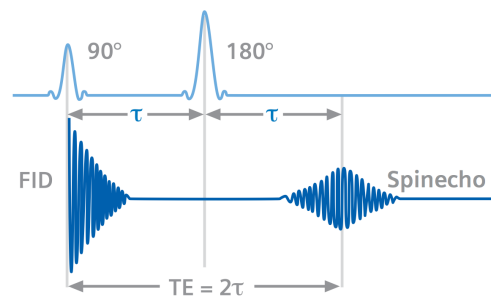
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Magnete, Spins und Resonanzen, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

44

Echosequenz

- Durchführung einer Echosequenz:
 1. 90°-Puls – Spins sind alle phasengleich
 2. Die Spins laufen, aufgrund von Feldinhomogenitäten, unterschiedlich schnell und dephasieren
 3. 180°-Puls nach gewisser Zeit führt zur Phasenumkehr
 4. Nach einiger Zeit treffen sich die Spins wieder an der „Ausgangsposition“



Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Magnete, Spins und Resonanzen, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

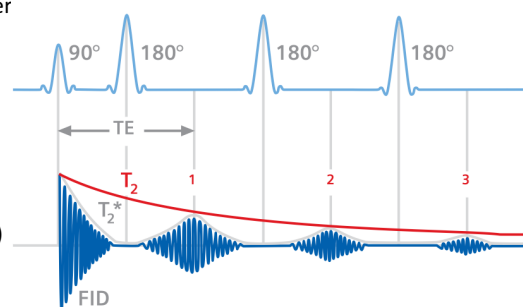
45

Multiechosequenz

- Die Echosequenz kann wiederholt werden (Läufer nach Umkehr über das Ziel hinauslaufen lassen und nach der Hälfte erneut Umkehr befehlen)
- Dies kann so oft wiederholt werden, bis die Quermagnetisierung durch T_2 -Relaxation verloren gegangen ist
- Das Spinecho-Signal nimmt mit T_2^* ab
- Die Spinecho-Signal-Stärke (Amplitude und Maximum) nimmt mit T_2 ab

$$T_2^* < T_2 < T_1$$

- Je größer TE, desto kleiner ist das Echo-Signal – eine lange TE liefert ein T_2 -gewichtetes Signal



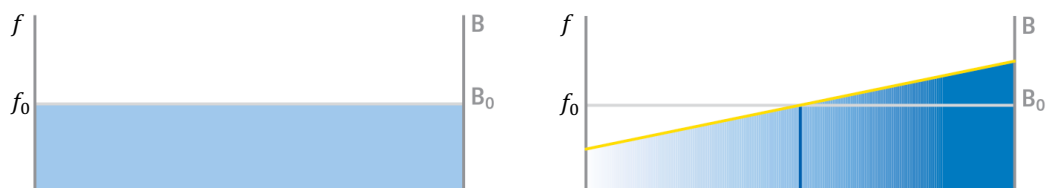
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Magnete, Spins und Resonanzen, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

46

Gradienten

- Ein Gradient ist eine Steigung
- Ein magnetischer Feldgradient ist eine Änderung des Magnetfeldes in einer bestimmten Richtung, die linear verläuft
- Das Magnetfeld nimmt also linear mit steigender Entfernung vom Ausgangspunkt ab/zu
- Im MR-Gerät werden Gradienten durch paarweise betriebene Gradientenspulen geschaffen, die das statische Magnetfeld mit dem Gradientenfeld überlagern



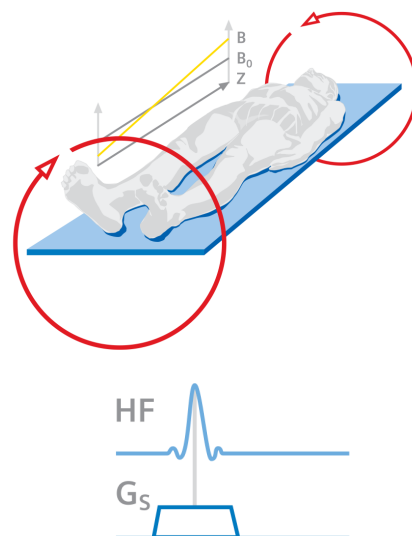
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Verändert nach Magnets, Spins und Resonanzen. Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

47

z-Gradient: Auswahl der Schicht

- Um bei der MRT ein Bild zu erhalten, muss es eine Möglichkeit geben, gezielt Schichten zu vermessen – dies gelingt durch den sogenannten z-Gradienten (ein Feldgradient)
- Im homogenen Magnetfeld ist die Larmor-Frequenz überall gleich groß
- Durch Superposition mit einem Gradientenfeld ändert sich an den verschiedenen Orten die Larmor-Frequenz linear – die Spins kreiseln also langsamer bzw. schneller als zuvor



Karim Kouz, Biophysik SS2017

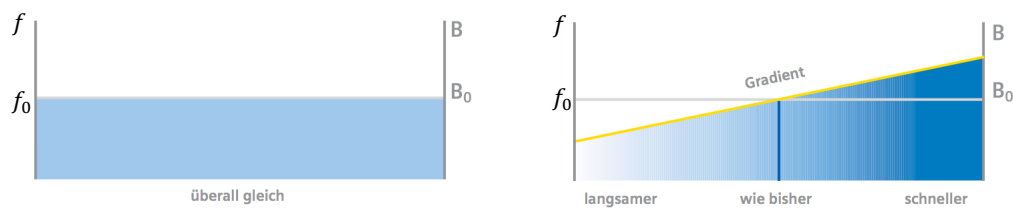
Quelle: Magnets, Spins und Resonanzen. Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

48

Wirkungen des z-Gradienten

- Die ursprüngliche Feldstärke und Larmor-Frequenz herrschen nur noch an einer Stelle
- Die Larmor-Frequenz hängt mit der Feldstärke folgendermaßen zusammen:

$$f_L = \frac{\gamma \cdot B_0}{2\pi}$$



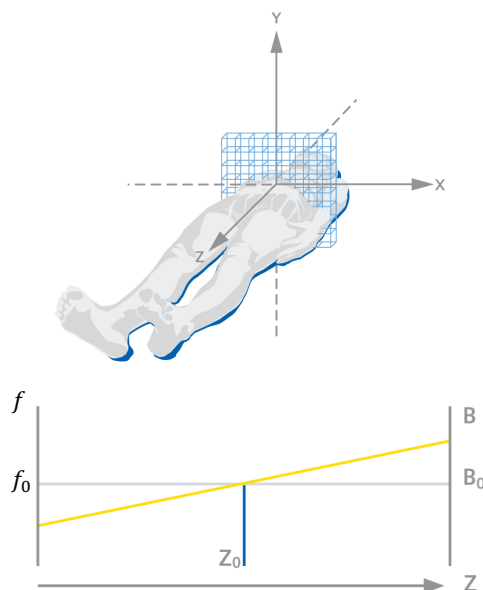
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Verändert nach Magnets, Spins und Resonanzen, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

49

Auswahl der Schicht

- Spins können nur dann von außen in Form von Pulsen beeinflusst werden, wenn die anregende Frequenz des HF-Pulses genau ihrer Präzessionsfrequenz entspricht (Resonanzbedingung)
- Zeitgleich zum HF-Puls wird ein Gradient in z-Richtung eingeschaltet (Schichtselektionsgradient)
- Der HF-Puls kann also in diesem Moment nur eine ganz bestimmte Schicht beeinflussen, da ober- und unterhalb dieser Schicht seine Frequenz nicht mehr mit der Präzessionsfrequenz der Spins übereinstimmt



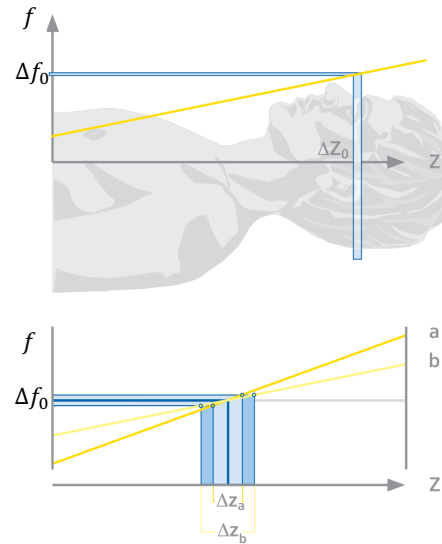
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Verändert nach Magnets, Spins und Resonanzen, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

50

Schichtdicke

- Würde nur genau eine Schicht mit einer ganz bestimmten Frequenz an der Bildgebung teilnehmen, wären die Messsignale zu gering
- Es wird daher nicht nur eine bestimmte Schicht (Frequenz) gemessen, sondern immer auch noch Schichten unmittelbar unter- und oberhalb dieser Frequenz
- Der HF-Puls besitzt daher, neben seiner Mittenfrequenz (f_0), eine Bandbreite von Nachbarfrequenzen (Δf_0)



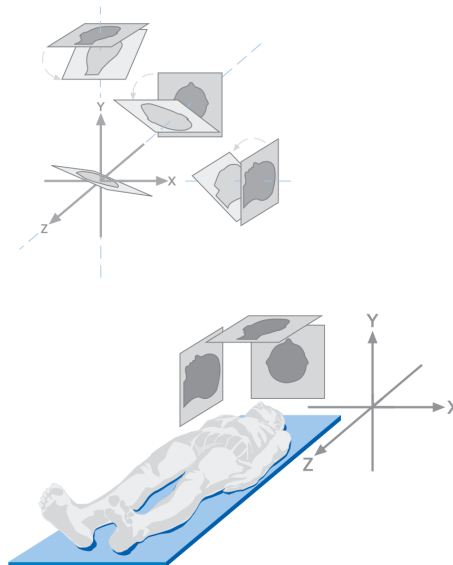
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Verändert nach Magnetis, Spins und Resonanzen, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

51

Schnitttypen

- Neben den klassischen drei Schnittführungen (transversal, sagittal und frontal) können beliebig viele weitere Schnitttypen (oblique Schichten) – durch Kombination der klassischen Schnittführungen – durchgeführt werden
- Abhängig vom Schnitttyp müssen unterschiedliche Gradienten während der Untersuchung geschaltet werden:
 - z-Gradient: Transversal
 - x-Gradient: Sagittal
 - y-Gradient: Frontal



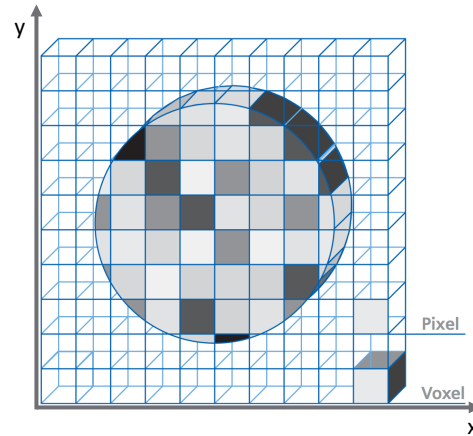
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Magnetis, Spins und Resonanzen, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

52

Auslesen der Schichtsignale

- Jede gemessene Schicht liefert eine große Anzahl von Messsignalen, die einem bestimmten Voxel im Körper bzw. Pixel im Bild zugeordnet werden
- Beim Auslesen muss es also eine Möglichkeit geben, jedem Messsignal seinen genauen Ursprungsort zuzuordnen
- Für die räumliche Kodierung der Signale sind weitere Gradientenfelder nötig
- So könnte eine mögliche Aufteilung der Gradienten sein:
 - z-Gradient – Schichtwahl
 - x-Gradient – Frequenzkodierung
 - y-Gradient – Phasenkodierung
- Die Funktion der Gradienten kann dabei beliebig getauscht werden



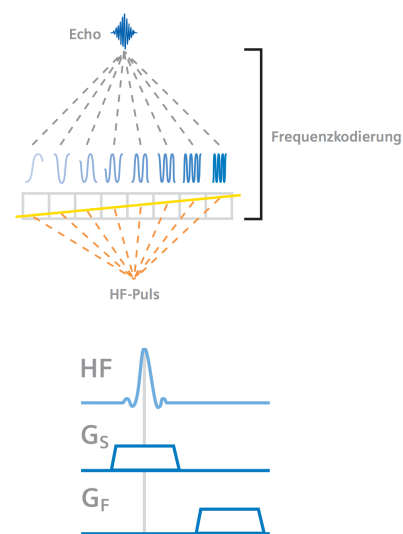
Quelle: Magnete, Spins und Resonanzen, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

53

Karim Kouz, Biophysik SS2017

Orientierung in x-Richtung

- Eine Schicht besteht aus mehreren Voxel-Streifen (Zeilen/Spalten)
- Während der Messung des Echos wird ein Gradient in x-Richtung (Zeilen) eingeschaltet – die Spins präzedieren hierdurch mit linear steigender Frequenz
- Diese Art der Kodierung wird Frequenzkodierung genannt
- Das gemessene Signal besteht dann bei N Voxeln aus N verschiedenen Frequenzen (ähnlich einem Klang, der aus verschiedenen Tönen besteht)



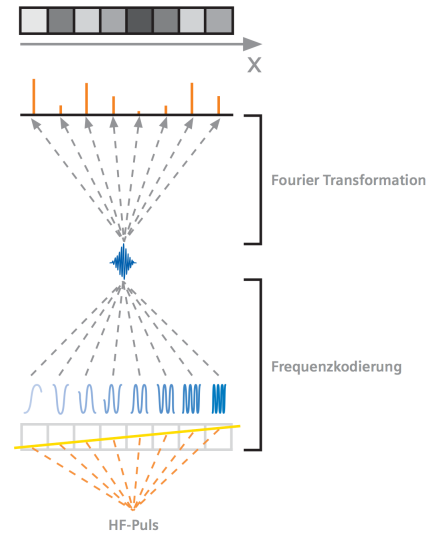
Quelle: Magnete, Spins und Resonanzen, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

54

Karim Kouz, Biophysik SS2017

Frequenzkodierung

- Mit Hilfe der Fourier-Transformation können aus dem Signal die einzelnen Signale der Voxel rekonstruiert werden (Frequenz und Amplitude der Schwingung)
- Die Frequenzrekonstruktion erlaubt eine genaue örtliche Zuordnung (linear aufsteigend)
- Die Amplitudenrekonstruktion erlaubt den Rückschluss auf die jeweilige Signalstärke
- Die jeweilige Signalstärke wird dann in Form eines Grautons dargestellt



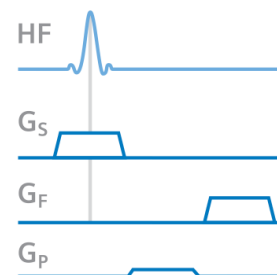
Quelle: Magnete, Spins und Resonanzen, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

55

Karim Kouz, Biophysik SS2017

Orientierung in y-Richtung

- Eigentlich könnte die Frequenzkodierung auch für die Orientierung in y-Richtung (Spalten) angewendet werden
- Dies ist jedoch nicht sinnvoll, da ansonsten zwei Voxel die gleiche Frequenz(-Kodierung) besitzen würden und eine genaue Zuordnung der Signale nicht möglich wäre
- Statt einer Frequenzkodierung wird eine Phasenkodierung durchgeführt
- Zwischen HF-Puls und dem Echo wird kurz ein Gradient in y-Richtung eingeschaltet, wodurch die Spins unterschiedlich schnell präzedieren
- Nachdem der Gradient wieder abgeschaltet ist, besitzen die Spins entlang der y-Achse unterschiedliche Phasenbeziehungen



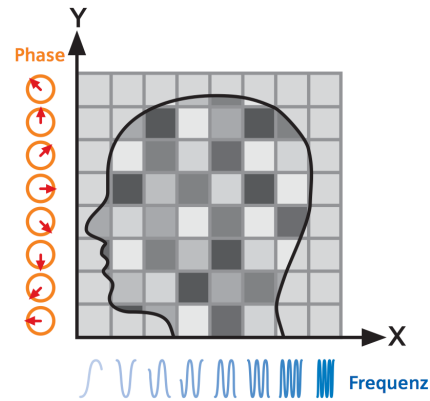
Quelle: Magnete, Spins und Resonanzen, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

56

Karim Kouz, Biophysik SS2017

Phasenkodierung

- Die verschiedenen Phasenbeziehungen lassen sich ebenfalls mit Hilfe der Fourier-Transformation rekonstruieren
- Die Voxel eines Streifens in y-Richtung lassen sich nun auch räumlich zuordnen
- Um die Fourier-Transformation durchführen zu können, muss man so viele Echos in dem Streifen messen, wie Voxel in diesem vorhanden sind

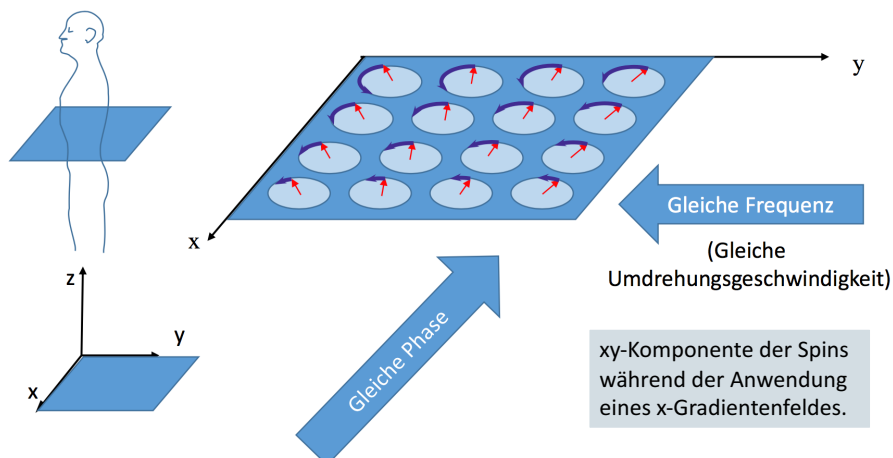


Quelle: Magnete, Spins und Resonanzen, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

Karim Kouz, Biophysik SS2017

57

Kodierung – Zusammenfassung



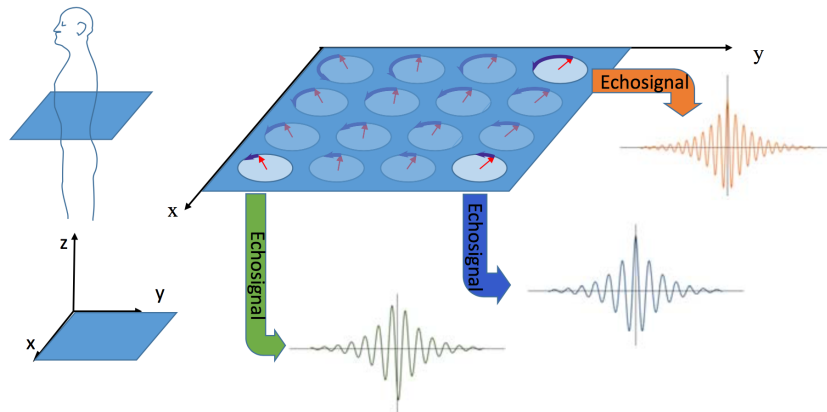
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Vorlesungsskript Biophysik für Mediziner, 2. Semester, Semmelweis-Universität Budapest, SS2017

58

Detektion der Signale

- Die Detektion der Signale erfolgt während der Anwendung eines x-Gradientenfeldes, da nur so eine Frequenzkodierung möglich ist



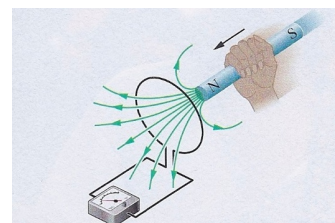
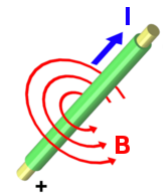
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Vorlesungsskript Biophysik für Mediziner, 2. Semester, Semmelweis-Universität Budapest, SS2017

59

Spin vs. Klassische Physik

- Bewegte Ladungen erzeugen einen Strom
- Ein Strom erzeugt ein dazugehöriges Magnetfeld
- Vorstellung des Spins als eine Drehbewegung – Spin erzeugt also auch ein Magnetfeld
- Ändert sich die Drehbewegung, so ändert sich auch das Magnetfeld
- Das sich ändernde Magnetfeld kann mit Hilfe einer Spule (Induktion) gemessen werden



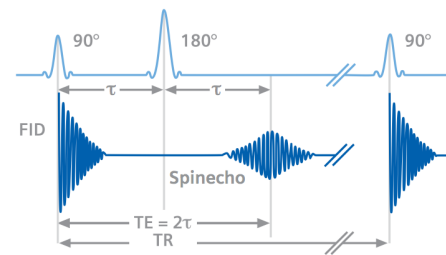
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Korandeherraget>, Physik, Halliday, Resnick, Walker, WILEY-VCH

60

Kontraste

- In der MRT gibt es drei wichtige Kontrasttypen:
 - T_1 -Kontrast
 - T_2 -Kontrast
 - Protonendichtekontrast
- Alle drei Kontrastanteile tragen in einem gewissen Anteil zum Bildkontrast bei
- Die Hervorhebung eines Kontrastanteils nennt man Gewichtung
- In einer Echosequenz nennt man den zeitlichen Abstand zwischen den Wiederholungen Repetitionszeit TR
- Entscheidend für die Kontrastwahl sind die TR und TE
- Zudem können Kontraste durch Kontrastmittel wie das paramagnetische Gadolinium (Gd) geschaffen werden



Quelle: Magnetes, Spins und Resonanzen, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

61

Karim Kouz, Biophysik SS2017

Protonendichtekontrast

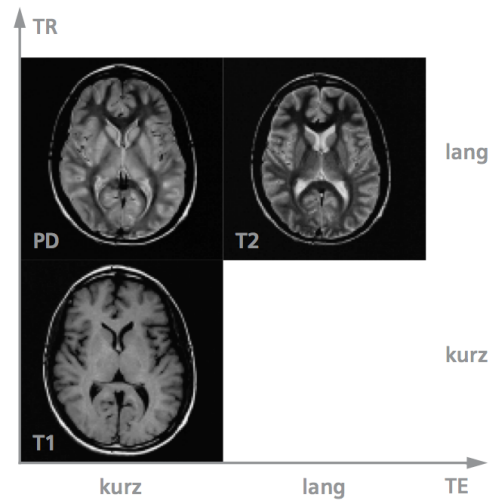
- Je mehr Protonen in einem Messbereich sind, desto stärker ist das gemessene Signal
- Das Signal der Längsmagnetisierung wird zur Messung der Protonendichte benutzt
- Dieses ist maximal, wenn die Längsmagnetisierung genügend Zeit hatte, sich vollständig wieder aufzubauen:
 - TR groß ist (Längsmagnetisierung hatte ausreichend Zeit sich wieder aufzubauen)
 - TE klein ist (mehr „Restzeit“ zur Relaxation vorhanden)

Karim Kouz, Biophysik SS2017

62

Übersicht Kontraste

- Es werden viele unterschiedliche MRT-Sequenzen genutzt, um die verschiedenen Kontraste zu erhalten
- Mit Hilfe einer Kontrastmittelgabe können weitere Kontraste geschaffen werden
- Neben den klassischen Kontrasten gibt es weitere für spezielle Untersuchungen angewendete Kontrast-Verfahren wie z.B.: „Diffusionsgewichtete Magnetresonanztomografie“, die die Bewegung von Wassermolekülen im Körper misst und darstellt
- fMRT: Funktionelle Bildgebung



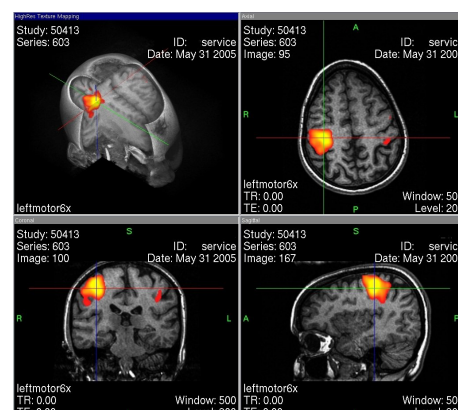
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Magnet, Spins und Resonanz, Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

63

Funktionelle MRT (fMRT)

- Mittels MRT kann man nicht nur morphologische Bilder sondern auch funktionelle Bilder erhalten
- Eine Methode ist z.B. das Ausnutzen der Abhängigkeit des (Bild-)Signals vom Sauerstoffgehalt in den roten Blutkörperchen = BOLD-Kontrast
- BOLD = blood oxygenation level dependent:
 - Oxygeniertes Hämoglobin ist diamagnetisch
 - Desoxygeniertes Hämoglobin ist paramagnetisch
- Mit dem BOLD-Kontrast kann die neuronale Aktivität im Gehirn gemessen werden



Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Funktionelle_Magnetresonanztomographie

64

Bestandteile des MR-Gerätes

- Supraleitender Elektromagnet (1 – 9 T) für ein homogenes und starkes statisches Magnetfeld
- Gradientenspulen in x-, y- und z-Richtung für die Schichtwahl und Ortskodierung (Frequenz- & Phasenkodierung)
- HF-Anlage zur Erzeugung elektromagnetischer Wellen im RW-Bereich (20 – 200 MHz)
- Empfangsspulen zur Detektion des Resonanzsignals
- Shimspulen (sollen Inhomogenitäten des statischen Feldes ausgleichen)
- Elektronik zur Datenverarbeitung

Karim Kouz, Biophysik SS2017

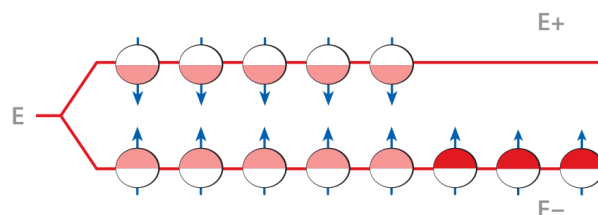
65

Pulse aus anderer Sicht

- Zwischen den beiden Energieniveaus lassen sich Übergänge durch Bestrahlung mit geeigneter elektromagnetischer Strahlung (HF-Anlage) erzielen
- Die dafür nötige Energie errechnet sich nach:

$$\Delta\varepsilon = h \cdot f = g_T \cdot \mu_T \cdot B_0$$

- h : Planck'sches Wirkungsquantum
- f : Frequenz der anregenden Strahlung
- g_T : Landé-Faktor des Teilchens
- μ_T : Magneton des Teilchens
- B_0 : magnetische Feldstärke



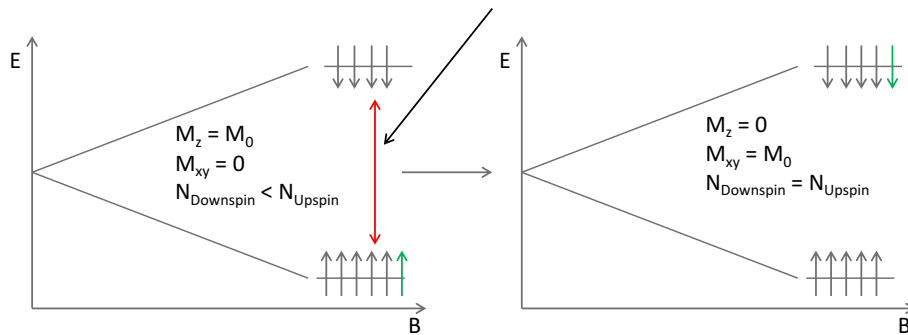
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Magnete, Spins und Resonanzen. Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

66

90°-Puls

Energetischer Abstand der beiden Niveaus bestimmt die Frequenz der elektromagnetischen Welle, die für das Kippen/Anregen der Spins notwendig ist.

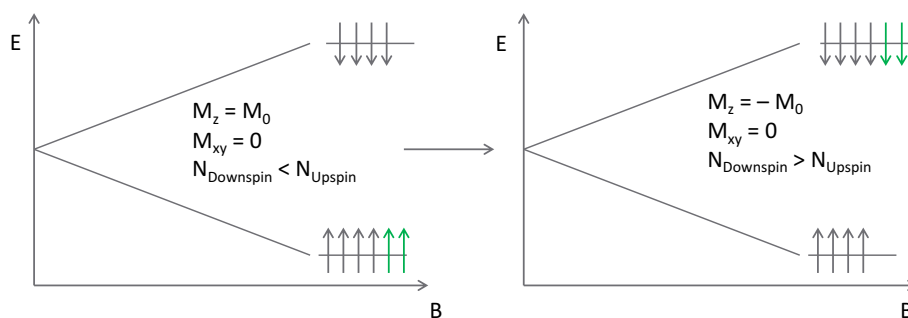


Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Karim Kouz (03/2015)

67

180°-Puls



Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Karim Kouz (03/2015)

68