

Bildgebende Verfahren in der Medizin II

12. Oktober 2009

Ultraschall

Aufgabe 1. Allgemeines

- a) Erklären Sie das physikalische Prinzip der Erzeugung und des Empfangs von US-Wellen (3 Punkte).
- b) Welcher Frequenzbereich wird üblicherweise beim Ultraschall eingesetzt (1 Punkt)?
- c) Welche Eindringtiefen erreicht man mit diesen Frequenzen (1 Punkt)?
- d) In welcher Größenordnung liegt der Schwächungskoeffizient von US-Wellen im Körper (1 Punkt)?
- e) Wie lauten die Beziehungen für Reflexion, Transmission (bei senkrechtem Einfall) und Brechungswinkel (bei schrägem Einfall) (3 Punkte)?
- f) Was versteht man unter „Time-Gain Compensation“? Was ist ihr Zweck? (2 Punkte)

Lösung:

- a) Für die Erzeugung von US-Wellen wird der piezoelektrische Effekt genutzt (1 Punkt). In piezoelektrischen Materialien wird durch Anlegen eines elektrischen Feldes E eine Dehnung S erzeugt. Der Zusammenhang lautet $S = d \cdot E$, wobei d ein Maß für die Eigenschaft eines Materials als Sender ist (1 Punkt). Umgekehrt wird durch eine mechanische Spannung T eine elektrische Polarisation P erzeugt, die als Spannung U gemessen werden kann. Die Empfindlichkeit g eines Wandlers ist der Proportionalitätsfaktor in $U = g \cdot T$ (1 Punkt).
- b) Die Frequenzen liegen je nach Anwendung bei 1 -- 40 MHz. (1 Punkt)
- c) Eindringtiefe bei 1 MHz: 500 mm
Eindringtiefe bei 40 MHz: 6 mm
- d) Bei 1 MHz liegt der Schwächungskoeffizient in der Größenordnung 1 dB/cm.
Bei 2 MHz liegt der Schwächungskoeffizient in der Größenordnung 2 dB/cm. (1 Punkt)
- e) Schallwellen werden an Grenzflächen zwischen Gebieten mit unterschiedlicher Schallimpedanz teilweise reflektiert. Für den Reflexionskoeffizienten R gilt bei senkrechtem Einfall:

$$R = \frac{J_r}{J_0} = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2$$

Für den Transmissionskoeffizienten T gilt bei senkrechtem Einfall:

$$T = \frac{J_T}{J_0} = \frac{4Z_2Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2}$$

Für die Brechungswinkel gilt:

$$\frac{\sin(\alpha_1)}{\sin(\alpha_2)} = \frac{c_1}{c_2}$$

(jeweils 1 Punkt)

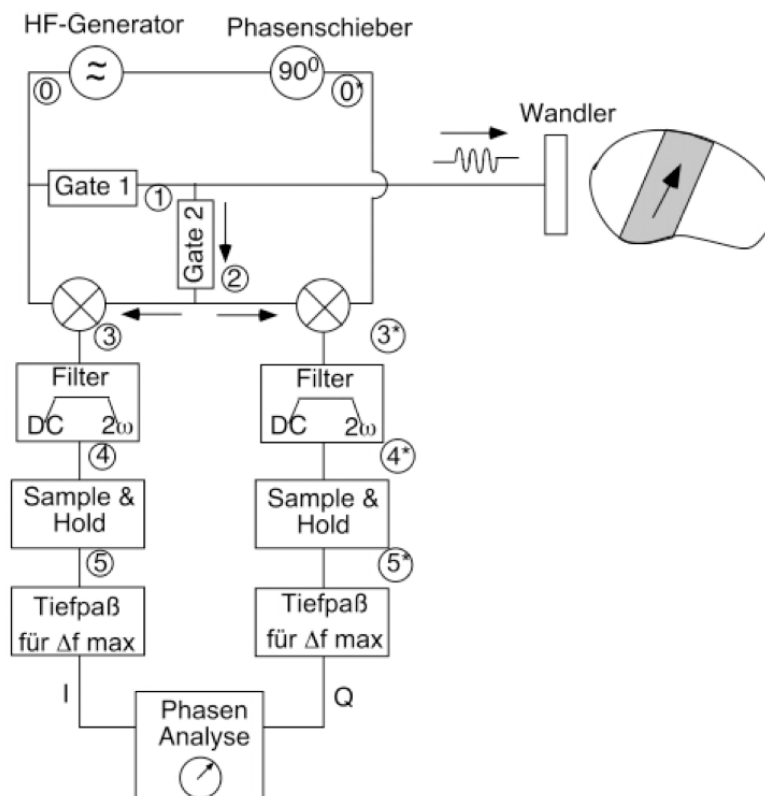
- f) Die „Time-Gain-Compensation“ ist eine zeitabhängige Verstärkung. Das Ultraschall-Echo wird um so mehr verstärkt, je später es kommt (1 Punkt). So werden Echos aus großer Tiefe mehr verstärkt, als Echos aus oberflächlichen Bereichen. Man erreicht damit eine gleichmäßige Ausleuchtung des Bildes, d. h. ungefähr gleiche Graustufen für gleiche Gewebearten unabhängig von der Tiefe des Objektes (1 Punkt).

Aufgabe 2: Messung der Fließgeschwindigkeit des Blutes

- a) Skizzieren Sie ein Doppler-US-System mit Quadratur-Detektor. Erklären Sie den Signalfluss (10 Punkte).
- b) Wie ermittelt man beim Farb-Doppler-Ultraschall die mittlere Fließgeschwindigkeit aus den Messungen? (Skizze von der Datenauswertung, Erklärung) (3 Punkte)
- c) Wann treten Aliasing-Artefakte auf (1 Punkt)?

Lösung:

- a) Skizze: (5 Punkte)



Gesendet werden Pulszüge eines kontinuierlichen Signals (1) (1 Punkt). Aus dem empfangenen Echo wird zunächst mit einem zweiten Gate ein kurzer Abschnitt ausgeschnitten, so dass nur noch Informationen aus einer bestimmten Tiefe weiterverarbeitet werden (2) (1 Punkt). Das Echo wird dann in zwei Kanäle aufgeteilt. Der eine Kanal wird mit dem Original-HF-Signal gemischt. Der zweite Kanal mit einem um 90° phasenverschobenen HF-Signal (3) (1 Punkt). Beim Mischen entstehen Summen- und Differenzfrequenz zwischen Sende- und Empfangssignal. Beide Kanäle laufen über einen Filter (Eliminierung der Summenfrequenz und DC) (4) und einem „Sample&Hold“ (5) (1 Punkt), so dass die Endsignale nur noch Informationen der Dopplerfrequenz enthält. Aus den beiden Signalen lässt sich die Geschwindigkeit und die Richtung des Blutflusses ermitteln (1 Punkt).

- b) Da die Fließgeschwindigkeit des Blutes sich ständig ändert, bleibt keine Zeit, mit dem PW-Doppler-Verfahren sukzessive das ganze Bild abzutasten. Beim Farb-Doppler US wird für einen großen Bereich eines konventionellen US-Bildes die mittlere Dopplerfrequenz und die Schwankungsbreite, d.h. die mittlere Fließgeschwindigkeit und die Turbulenz bestimmt. Das Ergebnis wird in Falschfarben dem konventionellen US-Bild überlagert (1 Punkt).

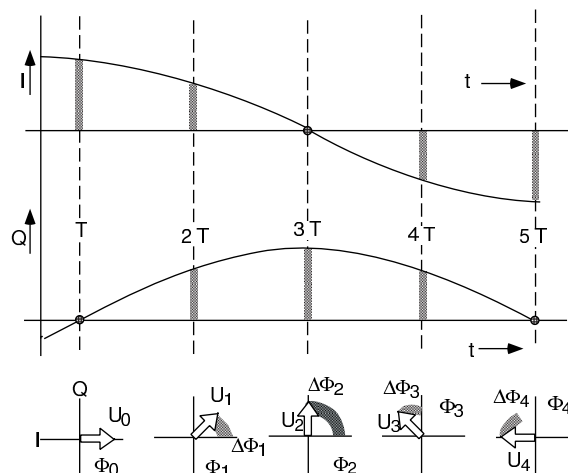
Die beiden Signale werden als Realteil und Imaginärteil eines komplexen Zeigers in eine komplexe Ebene eingetragen. Die Winkelgeschwindigkeit dieses Zeigers, die sich im Prinzip schon nach zwei Echos bestimmen lässt, ist ein Maß für die mittlere Dopplerverschiebung und damit für die mittlere Fließgeschwindigkeit (1 Punkt):

$$\frac{\Delta\Phi}{T} = 2\pi\Delta f$$

$\Delta\Phi$: Drehwinkel des Zeigers zwischen zwei Echos,

T : Zeit zwischen zwei Echos

Θ : Winkel zwischen Sender und Blutgefäß



(1 Punkt)

- c) Es kommt zu Aliasing-Artefakten, wenn die tatsächliche Blutflussgeschwindigkeit ein $v_{\max}$ überschreitet. $v_{\max}$ ergibt sich aus dem Kompromiss: $T_{\min}$ (kürzestmöglicher Wiederholabstand zur Vermeidung der Überlagerung von Echos) = $T_{\max}$ (längstmöglicher Wiederholabstand zur Einhaltung des Abtasttheorems) (1 Punkt)

Thermographie

Aufgabe 3: Wellenlängenbereich in der Thermographie

- a) Welchen Zusammenhang beschreibt das Plancksche Strahlungsgesetz? (1 Punkt)
- b) Zeichnen Sie qualitativ den Verlauf für die spektrale Leistungsdichte der Haut. Wo liegt demnach der für die Thermographie interessante Wellenlängenbereich? Welcher Wellenlängenbereich wird tatsächlich genutzt und warum? (3 Punkte)

Lösung:

- a) Das Plancksche Strahlungsgesetz beschreibt die Abhängigkeit der spektralen Strahlungsdichte des schwarzen Körpers von der Temperatur und der Wellenlänge.
- b) Der interessante Wellenlängenbereich liegt bei 5 μm bis 15 μm (1 Punkt). Der optimale Wellenlängenbereich für die Thermographie liegt bei 8 μm bis 12 μm , da in diesem Bereich die Atmosphäre weitgehend durchsichtig ist („IR-Fenster“) (1 Punkt).

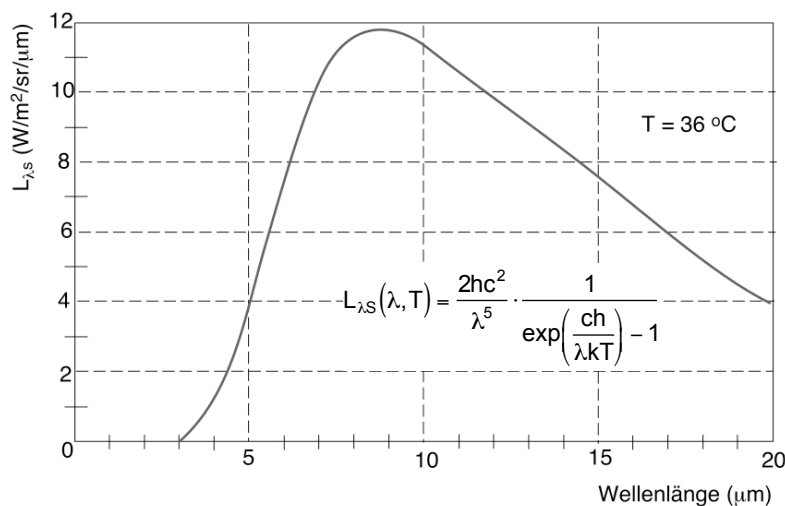


Abbildung bioelektrischer Quellen

Aufgabe 4: Quellenmodelle

- a) Wie ist ein Stromdipol definiert und in welcher Einheit wird er gemessen? (2 Punkte)
- b) Welche Bedeutung hat der Stromdipol bei der Abbildung bioelektrischer Quellen? (2 Punkte)

Lösung:

a) $\vec{J}_i dv = I \cdot \vec{d}_i$

$\vec{J}_i$: eingeprägte Stromdichte

dv : Volumenelement

$\vec{d}_i$: Kantenlänge des Volumenelements, durch das der Strom I fließt.

I : Stromstärke in einem Volumenelement

Einheit des Stromdipols: $A \cdot m$

- b) Jede beliebige Verteilung von eingepprägten Strömen im Körper lässt sich als Überlagerung von Stromdipolen darstellen (1 Punkt). Aufgabe bei der Abbildung der bioelektrischen Ströme ist die Darstellung der Verteilung der Stromdipole im Körper. Zur numerischen Behandlung muss der Körper in diskrete Volumenelemente aufgeteilt werden, in denen Stärke und Richtung des mittleren Stromdipols dargestellt wird (1 Punkt).

Aufgabe 5: Das Problem mit dem Inversen Problem

- a) Was versteht man unter dem „Vorwärtsproblem“, was unter dem „Inversen Problem“? Mit welchen Gleichungen werden beide Probleme beschrieben? (2 Punkte)
- b) Was sind die großen Schwierigkeiten bei der Lösung des inversen Problems? (2 Punkte)

Lösung:

- a) Vom „Vorwärts-Problem“ spricht man, wenn eine Stromdipolverteilung im Körper bekannt bzw. vorgegeben ist, und die Aufgabe darin besteht, die Potentiale und Magnetfelder außerhalb des Körpers zu berechnen. Dieses Problem hat immer eine eindeutige Lösung.

Das „inverse Problem“ ist die umgekehrte Aufgabe: Die Stromdipolverteilung ist aus den gemessenen Potentialen und Magnetfeldern zu bestimmen. (1 Punkt)

Gleichungen: (1 Punkt)

Vorwärtsproblem:

$$\underline{A} \cdot \vec{x} = \vec{b}$$

$\underline{A}$: lead-field Matrix

$\vec{x}$: Vektor der Quellen

$\vec{b}$: Vektor der gemessenen Potentiale

Inverses Problem:

$$\vec{x} = \underline{A}^{-1} \cdot \vec{b}$$

b) Probleme:

1. Das Problem ist oft unterbestimmt, d. h. die Zahl der Unbestimmten ist größer als die Zahl der Messgrößen (1 Punkt).
2. Das Problem ist oft „schlecht gestellt“, das bedeutet, dass kleine Messfehler große Fehler bei den rekonstruierten Strömen hervorrufen können (1 Punkt).

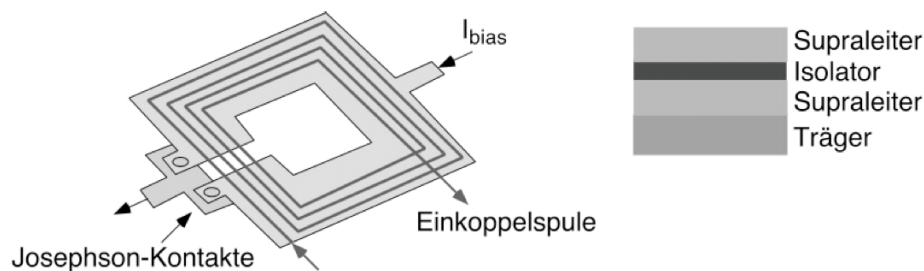
Aufgabe 6: SQUIDS

- a) Was ist ein SQUID? Wo wird es eingesetzt? Skizzieren und beschreiben Sie sowohl das SQUID und dessen Kennlinie (5 Punkte).

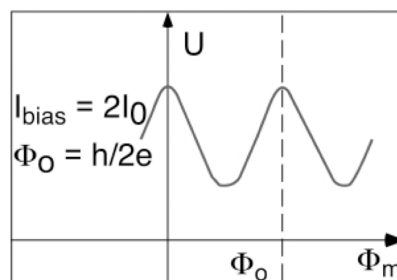
- b) Wie groß ist die magnetische Flussdichte
- außerhalb des Kopfes, wenn im Gehirn bioelektrische Ströme fließen?
 - außerhalb des Oberkörpers, wenn im Herzen bioelektrische Ströme fließen?
- (2 Punkte)
- c) Nennen Sie zwei Verfahren zur Unterdrückung der Störsignale (2 Punkte).

Lösung:

- a) Ein SQUID (superconducting quantum interference device) besteht aus einem supra-leitenden Ring mit zwei Josephsonkontakten (1 Punkt). SQUIDs werden zur Messung der magnetischen Flussdichten außerhalb des Körpers (MKG oder MEG) eingesetzt (1 Punkt). Skizze: (1 Punkt)



Die Kennlinie ist periodisch, mit der Periode $\Phi_0 = h/2e$ (h = Plancksches Wirkungsquantum, e = Elektronenladung, Φ_0 = Flussquant) (1 Punkt). Skizze: (1 Punkt)



Da bei der Erfassung biomagnetischer Signale die magnetischen Flüsse deutlich geringer sind als das Flussquant, ist eine trickreiche Elektronik notwendig, um das SQUID immer im steilsten Punkt seiner Kennlinie zu betreiben.

- b) Die magnetische Flussdichte beträgt
- außerhalb des Kopfes: ≈ 100 fT (1 Punkt)
 - außerhalb des Oberkörpers: ≈ 10 pT (1 Punkt)
- c) Verfahren zur Unterdrückung von Störsignalen:

1. Einsatz von Gradiometern: Hier wird mit supraleitenden Drahtschleifen, die gegensinnig gewickelt sind, die magnetische Flussdichte an zwei Orten subtrahiert, die nur wenige cm voneinander entfernt sind. Dem liegt das Prinzip zugrunde, dass die Magnetfelder von nahegelegenen (biologischen) Quellen sich relativ stark räumlich ändern, wohingegen Störsignale in beiden Schleifen das Gleiche Signal hervorrufen. (1 Punkt)

2. Die SQUID-Magnetometer werden meistens in magnetisch abgeschirmten Kabinen eingesetzt (1 Punkt)

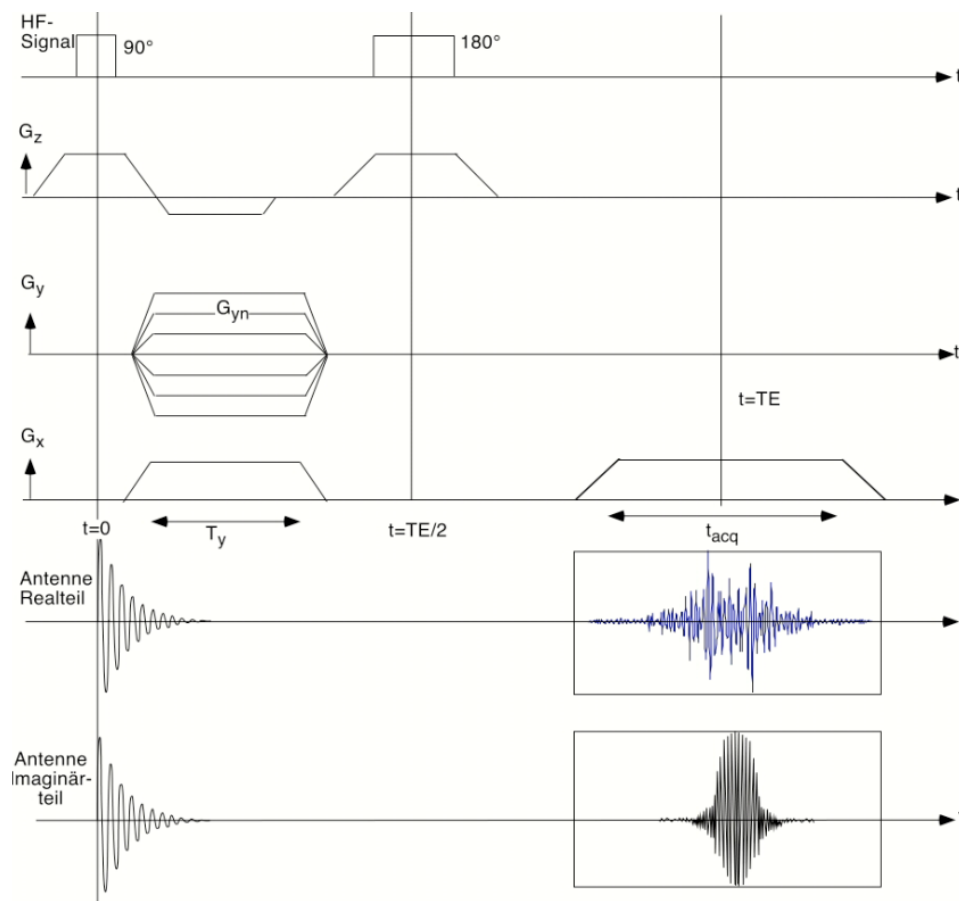
MR-Tomographie

Aufgabe 7: Allgemeines

- a) Erklären Sie die Aufgabe der Gradientenspulen und wie diese eingesetzt werden (4 Punkte).
- b) Wie werden die Gradientenspulen bei einer kartesischen Abtastung eingeschaltet? (Skizze der Pulssequenz, der Gradienten- und des Antennensignale) (4 Punkte)

Lösung:

- a) Die Gradientenspulen werden zum Einstellen und Auslesen der Magnetisierungsmuster benötigt (1 Punkt). Durch eine selektive Schichtanregung mit einem Gradienten G_z wird zunächst eine Schicht der Dicke dz im Körper angeregt (1 Punkt). Durch einen Phasenkodiergradienten, meist G_y , der in der Zeit zwischen Senden und Empfangen eingeschaltet wird, wird ein „Muster“ der präzidierenden Ensembles in dieser Schicht eingestellt (1 Punkt).. Während des Auslesens ist ein Frequenzkodiergradient G_x ebenfalls eingeschaltet - damit sendet jedes Spin-Ensemble an anderer Stelle x mit einer anderen Frequenz. Durch das „Einsammeln“ vieler Punkte im k -Raum kann man das aufgenommene Bild rekonstruieren (1 Punkt).
- b) Pulssequenz bei kartesischer Abtastung:



Aufgabe 8: Inversion Recovery

- Wie lange muss ein Transversalfeld der Amplitude $10 \mu\text{T}$ eingeschaltet werden, um die Spins von M_{z0} auf $-M_{z0}$ umzuklappen? (2 Punkte)
- Mit welchen Gleichungen lassen sich die Längs- und Querrelaxation beschreiben? Welche physikalischen Prozesse sind für die Längs- und Querrelaxation verantwortlich? (3 Punkte)
- Tragen Sie den zum Aufgabenteil a) gehörenden HF-Puls, sowie den Verlauf der Längs- und Quermagnetisierung in ein Schaubild ein (3 Punkte).
- Vervollständigen Sie im gleichen Schaubild die Pulssequenz einschl. der entsprechenden Magnetisierungen zu einer „Inversion-Recovery“-Pulssequenz (3 Punkte).
- Kennen Sie ein Anwendungsbeispiel für diese Sequenz? Welche Größe kann man damit bestimmen? (1 Punkt)

Lösung:

- Umkappen der Spins von M_{z0} auf $-M_{z0}$ $\rightarrow$ 180° -Impuls: (jeweils 1 Punkt für Formel und Ergebnis)

$$\alpha = \gamma \cdot B_T \cdot t \rightarrow t = \frac{\alpha}{\gamma \cdot B_T} = \frac{\pi}{2\pi \cdot 42.6 \text{ MHz/T} \cdot 10 \mu\text{T}} = 1.17 \text{ ms}$$

- Blochgleichung für Längsrelaxation nach 180° -Impuls (1 Punkt):

$$M_z(t) = M_{z0} \cdot (1 - 2e^{-t/T_1})$$

Blochgleichung für Querrelaxation (1 Punkt):

$$M_T(t) = M_{T0} \cdot e^{-t/T_2}$$

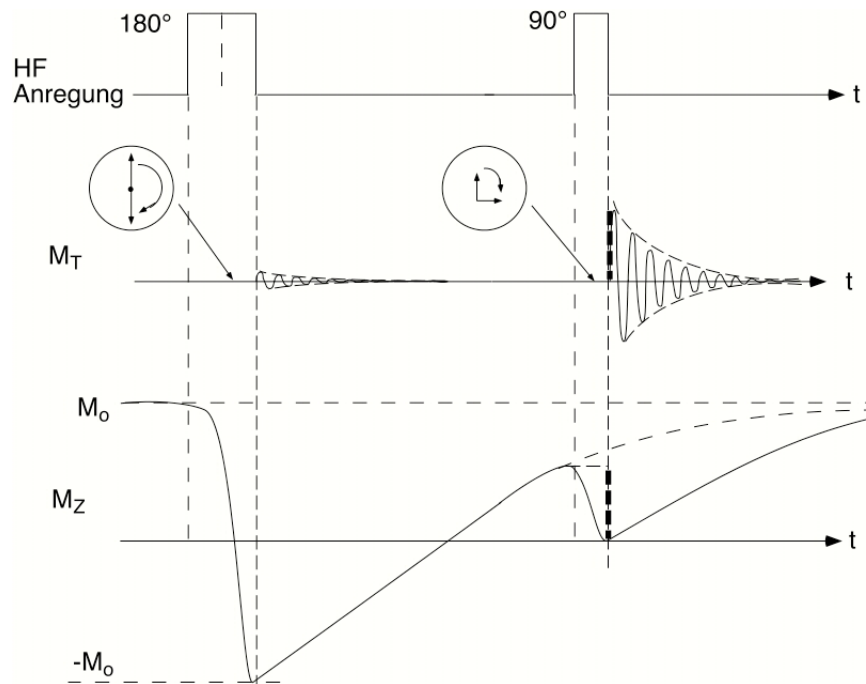
Zur Längsrelaxation führt die sog. Spin-Gitter-Relaxation. Hierbei kehrt das System ins thermische Gleichgewicht zurück. Zur Querrelaxation führt die Spin-Spin-Relaxation und die Inhomogenität des Mediums (1 Punkt).

Zusatzpunkt:

Die tatsächliche Querrelaxation ist aber immer schneller als T_2 wegen der Inhomogenität des Mediums. Die Querrelaxationszeit T_2^* wird wie folgt eingeführt:

$$M_T(t) = M_{T0} \cdot e^{-t/T_2^*}$$

c) ,d)



e) Mit der Inversion-Recovery-Sequenz lässt sich die Längsrelaxationszeit T_1 messen. (1 Punkte)

Aufgabe 9: Echos

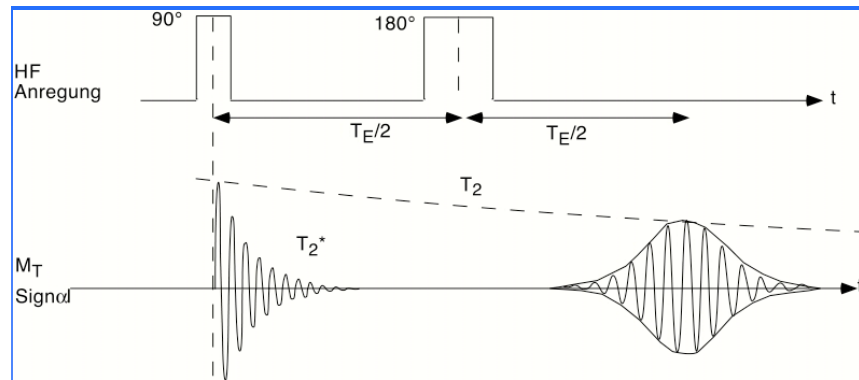
a) Wie entsteht ein Spin-Echo? Welche Effekte tragen dazu bei? (Erklärung und Skizze) (4 Punkte)

b) Wie entsteht ein Gradienten-Echo? (Erklärung und Skizze) (4 Punkte)

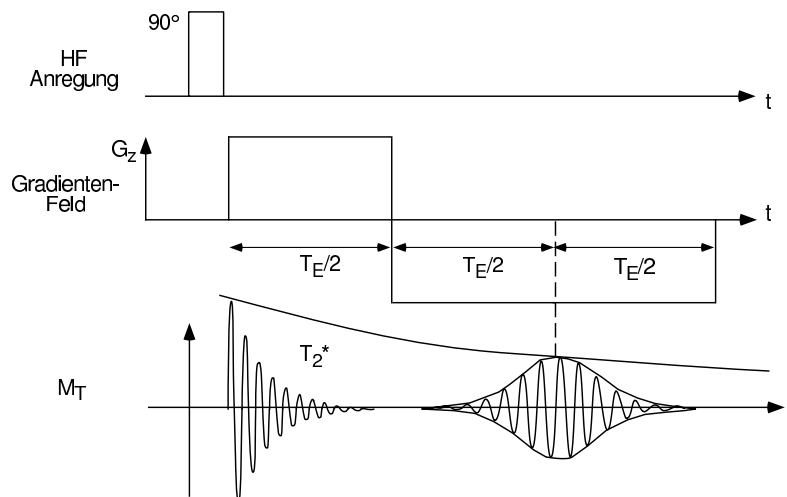
Lösung:

a) Werden die Spin-Ensembles durch einen 90° -Impuls in die x-y-Ebene geklappt, laufen im rotierenden Koordinatensystem aufgrund der unterschiedlichen Magnetfelder am Ort der Protonen einige Spins vor und andere nach. Folgt nach einer Wartezeit ein 180° -HF-Puls, so wird das ganze Spin-Bild um 180° um die x-Achse des rotierenden Koordinatensystems gedreht. Spins, die vorher zu langsam präzidierten, laufen weiter hinterher; Spins, die vorher vorausliefen, „holen“ die langsamer präzidierenden „ein“, so dass nach einer gewissen Zeit alle Spins wieder in Phase laufen. In diesem Moment ist die messbare (Gesamt-) Quermagnetisierung am größten - es kommt zum Spin-Echo

(2 Punkte jeweils für Erklärung und Skizze).



- b) Anstatt eines 180°-HF-Pulses wird ein zum Zeitpunkt t_0 eingeschalteter Gradient, z.B. G_z nach $t_E/2$ auf $-G_z$ umgeschaltet. Nach der Zeit t_E sind auch hier die Spins rephasiert und es entsteht ein Echo. (2 Punkte jeweils für Erklärung und Skizze)



Aufgabe 10:

Ein MR-Tomograph hat ein Grundfeld von 3 T. Es wird ein Gradientenfeld G_x von 20 mT/m eingeschaltet. Mit welcher Frequenz präzidieren die Spins bei:

a) $x = 0$, $y = 0$, $z = 10$ mm ,

b) $x = 10$ mm, $y = 0$, $z = 0$,

im ruhenden und im rotierenden Koordinatensystem? (4 Punkte)

Lösung:

Präzession im Gradientenfeld:

$$\omega = \gamma \cdot B = \gamma \cdot B_{00} + \gamma \cdot G_x \cdot x; \quad \gamma^* = \frac{\gamma}{2\pi}$$

a) Im ruhenden Koordinatensystem:

$$f_{z=10mm} = \gamma^* \cdot B_{00} = 42,58 \text{ MHz/T} \cdot 3 \text{ T} = 127,74 \text{ MHz}$$

Im rotierenden Koordinatensystem: $f_{z=10mm}^* = 0$

b) Im ruhenden Koordinatensystem:

$$\begin{aligned} f_{x=10mm} &= \gamma^* (B_{00} + G_x \cdot x) \\ &= \gamma^* (3T + 20 \text{ mT/m} \cdot 10 \text{ mm}) \\ &= \gamma^* (3T + 0,2 \text{ mT}) \\ &= 127,74 \text{ MHz} + 8,5 \text{ kHz} \end{aligned}$$

Im rotierenden Koordinatensystem: $f_{x=10mm}^* = 8,5 \text{ kHz}$

(Jedes richtige Ergebnis 1 Punkt)

Aufgabe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Σ
Punkte	11	14	4	4	4	9	8	12	8	4	78