

Bildgebende Verfahren in der Medizin II

17. September 2007

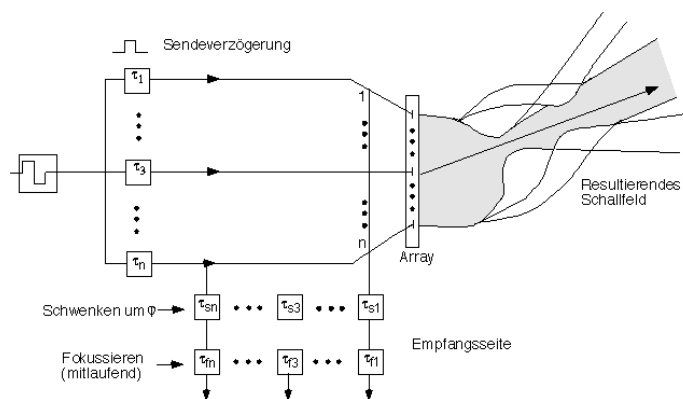
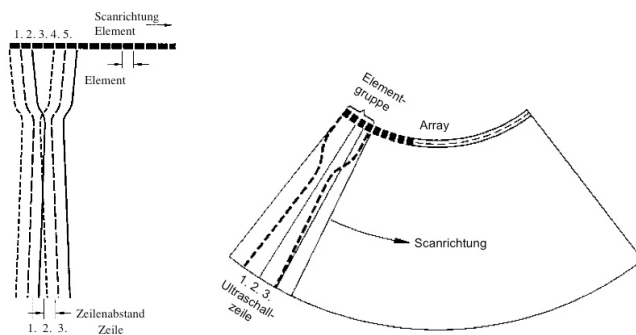
Ultraschall

Aufgabe 1: Ultraschall-Messköpfe

- a) Welche Typen von Ultraschall-Messköpfen für 2D-US-Systeme gibt es? (3 Punkte)
- b) Beschreiben Sie jeweils kurz das Funktionsprinzip der Messköpfe. (6 Punkte)
- c) Wovon hängt die maximale Bildwiederholrate ab (B-Mode)? (3 Punkte)

Lösung:

- a) Es gibt mechanische Scanner, Linear-Arrays, Curved-Arrays und Phased- Arrays.
- b) mechanische Scanner: mechanisches Schwenken des US-Wandlers.
Linear-Arrays und Curved-Arrays: Gruppen von Wandlern senden, zum Schwenken wird Element für Element weitergeschaltet.
Beim Phased-Array kann die Phase jedes Wandlers in einem Array individuell eingestellt werden. Die „Ultraschall-Keule“ kann elektronisch geschwenkt werden. Beim Senden kann der Fokus in eine vorher definierte Tiefe gelegt werden. Beim Empfangen kann der Fokus dynamisch in die Tiefe gelegt werden, aus der gerade das Echo kommt. Die beiden letzten Punkte führen zu einer größeren lateralen Auflösung.



- c) Ein Schallimpuls darf erst abgegeben werden, wenn alle Echos des vorausgehenden Schallimpulses abgeklungen sind. Die Wiederholrate f hängt daher von der Eindringtiefe x und damit von der verwendeten Frequenz ab. Bei 2D-Systemen beeinflussen zusätzlich die Bildbreite y und der Linienabstand Δy die Zeit T zwischen zwei Bildern.

$$T = \frac{2 \cdot y \cdot x}{c \cdot \Delta y}; \quad f = 1/T$$

Aufgabe 2: Doppler Ultraschall-Systeme

- a) Wie und wofür macht man sich den Doppler-Effekt in der US-Bildgebung zunutze? Wie kann man die Dopplerfrequenz berechnen? (4 Punkte)
- b) Skizzieren und beschreiben Sie ein CW-Doppler-US-System. (4 Punkte)
- c) Welche Schwierigkeiten treten auf? Bitte nennen Sie 3 Schwierigkeiten und wie diese behoben werden können. (6 Punkte)

Lösung:

- a) Der Dopplereffekt tritt auf, wenn ein Sender und/oder Empfänger einer Welle sich relativ zueinander bewegen. Die auftretende Frequenzverschiebung ist proportional zur relativen Geschwindigkeit. Bei der Doppler-Ultraschall Diagnostik wird meistens die Geschwindigkeit des in den Blutgefäßen oder im Herzen fließenden Blutes untersucht. Die Blutkörperchen streuen die US-Welle und werden somit selbst zum bewegten Sender. Die gesamte Frequenzverschiebung, die am US-Empfänger detektiert wird, beträgt:

$$\overline{\Delta f} = \frac{2f}{c} \cdot \bar{v} \cdot \cos(\Theta)$$

Δf : Dopplerfrequenz

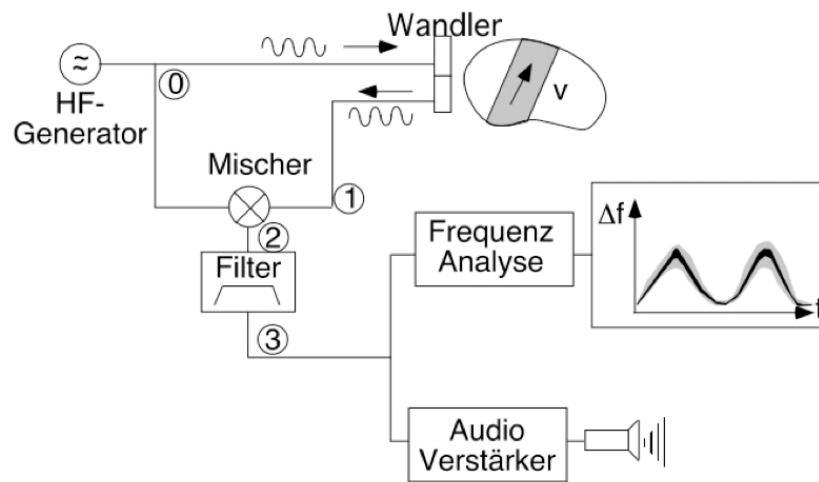
f : Ultraschallfrequenz

c : Schallgeschwindigkeit

v : Geschwindigkeit des streuenden Teilchens

Θ : Winkel zwischen US-Sender und Blutgefäß

- b) Continuous-Wave-Doppler-System: US-Sender und -Empfänger arbeiten kontinuierlich. Um die Dopplerverschiebung zu ermitteln, wird das Empfangssignal mit dem Sendesignal gemischt, d.h. multipliziert. Das Ausgangssignal enthält einen DC-Anteil, die Dopplerfrequenz und ein Signal mit der doppelten Eingangsfrequenz. Nach einer Bandpassfilterung kann das resultierende Signal einer Frequenzanalyse unterzogen oder direkt auf einem Lautsprecher ausgegeben werden.



c) Auftretende Schwierigkeiten und wie sie behoben werden:

- Schätzfehler des Winkels Θ zwischen Blutgefäß und US-Kopf verfälschen das Ergebnis der Fließgeschwindigkeit. Stereomessköpfe erlauben eine Erfassung der Fließgeschwindigkeit ohne Kenntnis des Winkels Θ .
- Das Continuous Wave US-Messsystem hat den Nachteil, dass die Tiefe, aus der das Signal mit verschobener Frequenz kommt, nicht bestimmt werden kann. Abhilfe schafft das Pulsed-Wave-US-System mit zwei eingebauten Gates. Die Verzögerung zwischen Gate 1 und Gate 2 bestimmt die Tiefe, aus der das Signal kommt, von dem die Dopplerverschiebung bestimmt werden soll.
- Die beschriebenen Systeme geben keine Information über die Richtung der Fließgeschwindigkeit. Um auch die Flussrichtung zu bestimmen, wird das Echo in einem zweiten Auswertekanal mit einem um 90° phasenverschobenen HF-Signal gemischt. („Quadraturdetektor“)

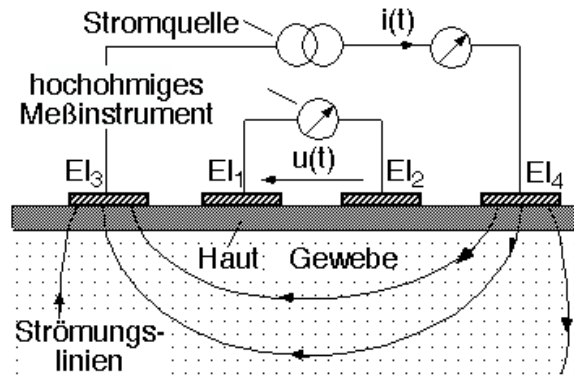
Impedanztomographie

Aufgabe 3:

- Mit welchem Messverfahren kann der Beitrag der Elektrodenimpedanz zum Messsignal vernachlässigbar klein gemacht werden? (Skizze und Begründung)? (4 Punkte)
- Welche Schwierigkeit tritt auf, wenn auf diese Art an lebendem Gewebe die Impedanz gemessen werden soll? (2 Punkte)

Lösung:

- Bei der Vierelektrodenteknik wird über ein Elektrodenpaar der Strom eingespeist. Über ein anderes Elektrodenpaar wird mit einem hochohmigen Messgerät die Spannung gemessen. Da über diese Elektroden fast kein Strom fließt, fällt der Spannungsabfall über den Elektroden nicht ins Gewicht.
- Bei lebendem Gewebe befinden sich immer mehrere verschiedene Gewebearten mit unterschiedlichen Impedanzen im Strompfad.



□ □ □

Aufgabe 4:

Was ist die Idee, die hinter „Dynamic Imaging“ steckt? Wo wird das Verfahren angewendet? (2 Anwendungen) (4 Punkte)

Lösung:

Mit dem Dynamic Imaging werden die Fehler der gefilterten Rückprojektion umgangen, indem Bilder der Impedanz-Änderung aufgenommen werden. Ein wichtiges Anwendungsbeispiel ist die Untersuchung, ob alle Bereiche der Lunge beim Atmen belüftet werden. Dazu wird jeweils ein vollständiger Datensatz im ausgeatmeten Zustand und im eingeatmeten Zustand aufgenommen. Es wird nicht mehr der homogene Zylinder als Referenz für die relative Spannungsänderung gewählt, sondern die relative Spannungsänderung folgendermaßen definiert:

$$V_r = \frac{V_{ein} - V_{aus}}{V_{aus}} \quad \text{mit:}$$

V_{aus} : gemessene Spannung im ausgeatmeten Zustand
 V_{ein} : gemessene Spannung im eingeatmeten Zustand

Ein weiteres Beispiel ist die Aufnahme von Datensätzen im systolischen bzw. diastolischen Zustand des Herzens, um Aussagen über die Herzfunktion zu treffen.

Abbildung bioelektrischer Ströme

Aufgabe 5:

- Wie ist das Lead-Field für ein Elektrodenpaar definiert? (4 Punkte)
- Was besagt das Reziprozitätstheorem bei der Abbildung bioelektrischer Ströme? (4 Punkte)

Lösung:

- a) Das Lead-Field ist ein Vektorfeld mit folgender Eigenschaft:

$$V = \vec{a}(x, y, z) \cdot \vec{p}(x, y, z)$$

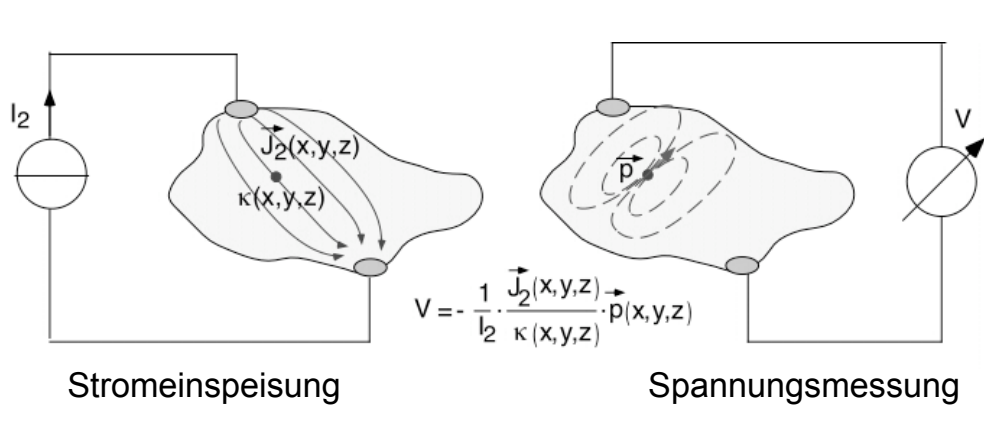
V : messbare Spannung eines Elektrodenpaares,

$\vec{a}$: Lead-Field

$\vec{p}$: Stromdipol am Ort (x, y, z)

Das Skalarprodukt aus dem Vektor eines Stromdipols am Ort (x, y, z) mit dem Vektor des Lead-Fields am Ort (x, y, z) ergibt die Spannung, die man am Elektrodenpaar messen kann. Damit ist das Lead-Field eine Art Empfindlichkeitsfaktor, der angibt, mit welcher Stärke ein Stromdipol zu einem Signal an einem Elektrodenpaar führt.

- b) Das Reziprozitätstheorem besagt, dass das Lead-Field eines Elektrodenpaares bis auf einen konstanten Faktor identisch ist mit der Stromdichte im Körper, wenn man durch die Messelektroden einen Strom schicken würde.



Optische Tomographie

Aufgabe 6:

Mit welchen beiden Modellen kann man die Ausbreitung von Licht in Körpergewebe beschreiben? (Name des Modells und kurze Beschreibung) (4 Punkte)

Lösung:

Bei der Monte-Carlo-Methode werden in einer Computersimulation Millionen von Photonen auf das Gewebe eingestrahlt und der Weg jedes einzelnen Photons mit statistischen Methoden verfolgt.

Beim Diffusionsmodell wird die Ausbreitung von Photonen in Gewebe mit einer Diffusionsgleichung beschrieben.

MR-Tomographie

Aufgabe 7:

- a) Beschreiben Sie die Phasen- und Frequenzkodierung (typische zeitliche Abfolge, typische Gradienten, Stellung bzw. Winkelgeschwindigkeit der komplexen Zeiger). (4 Punkte)
- b) Bestimmen Sie den Wert des größten Gradientenfeldes, das für die Phasenkodierung im folgenden Fall benötigt wird:
Auflösung $\Delta y = 0,33 \text{ mm}$, Gradienteneinschaltzeit = 1 ms
($\gamma/2\pi = 42,6 \text{ MHz/T}$) (4 Punkte)

Lösung:

- a) Die Phasenkodierung erfolgt typischerweise zwischen der Anregung und dem Auslesen mit einem G_y -Gradienten. Hierbei werden die Zeiger der Spins verdreht. Alle Spins mit gleichem y -Wert werden um den gleichen Winkel verdreht. Im letzten Kodierungsschritt beträgt der Winkel zwischen zwei benachbarten Pixeln gerade 180° .

Bei der Frequenzkodierung wird typischerweise beim Auslesen (während des Spin-Echos) ein G_x -Gradient eingeschaltet. Damit präzidieren Spins mit unterschiedlichen x -Koordinaten mit unterschiedlichen Frequenzen.

- b) Der größte Gradient bewirkt eine Phasendrehung von 180° zwischen benachbarten Pixeln.

Damit gilt:

$$\pi = \gamma \cdot G_{max} \cdot T \cdot \Delta y \quad \gamma^* = \frac{\gamma}{2\pi}$$

$$G_{max} = \frac{\pi}{\gamma^* \cdot 2\pi \cdot T \cdot \Delta y} = \frac{1}{2 \cdot 42,6 \cdot 10^6 \cdot 10^{-3} \cdot 0,33 \cdot 10^{-3}} = 35,6 \frac{mT}{m}$$

Aufgabe 8:

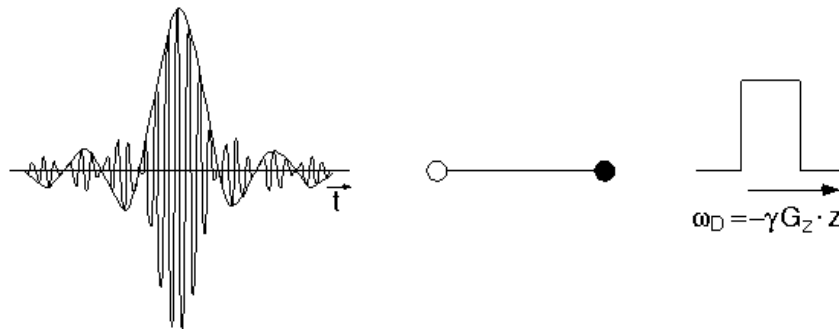
- a) Wie muss eine HF-Anregung aussehen, um nur eine einzige rechteckförmige Schicht anzuregen? (2 Punkte)
- b) Wie sieht die Zeigerstellung der Quermagnetisierung in der angeregten Schicht zunächst aus? (2 Punkte)
- b) Wie muss das Gradientenfeld aussehen, damit die Anregung möglichst homogen wird? (2 Punkte)

Lösung:

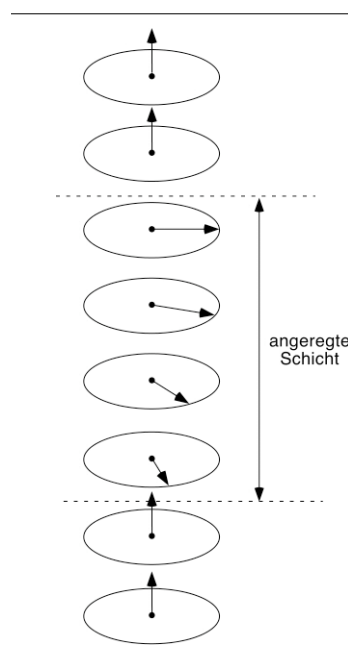
- a) Zur selektiven Schichtanregung wird während der HF-Anregung (Umkappen der Magnetisierung) ein Feldgradient (meistens in z -Richtung) angelegt. So werden nur

die Spins umgeklappt, deren Präzessionsfrequenz mit der Anregungsfrequenz übereinstimmt.

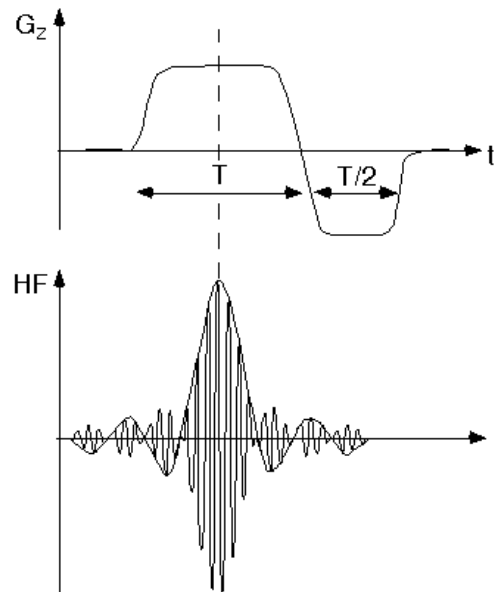
Die Einhüllende des HF-Pulses folgt einer $\frac{\sin(\omega t)}{\omega t}$ -Funktion. Die Fourier-Transformierte dieser Funktion ist gerade die Rechteckfunktion.



- b) Nach der Anregung sind die Spins wegen des Gradienten G_z innerhalb der angeregten Schicht von oben nach unten gegeneinander verdreht.



- c) Ein umgekehrter Gradient mit halber zeitlicher Länge sorgt dafür, dass alle Spins in die gleiche Richtung zeigen.



Aufgabe 9:

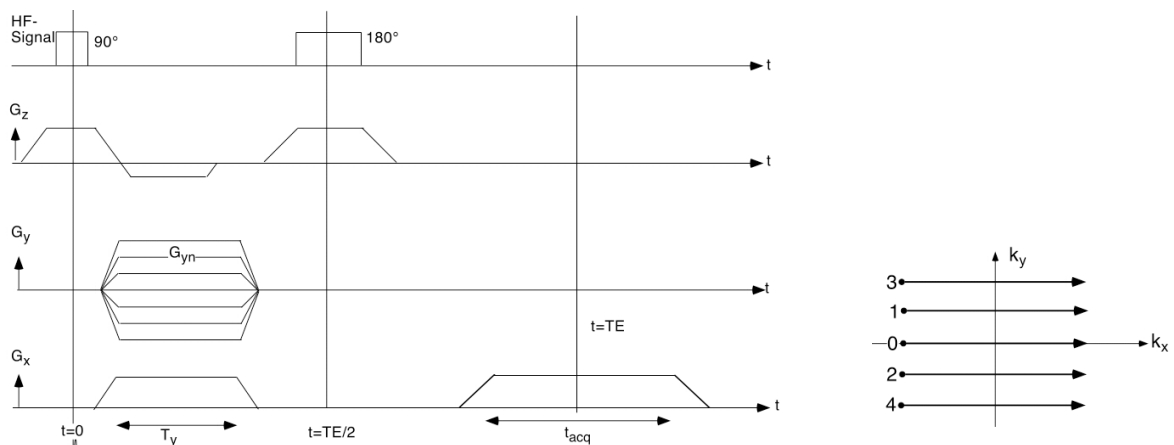
- Wie werden die Gradientenspulen bei einer kartesischen und bei einer radialen Abtastung des k-Raums eingeschaltet? (4 Punkte)
- Wie kommt man von den Messdaten zum Bild (kartesisch und radial)? (4 Punkte)
- Welche Größen bestimmen die Auflösung in x, y, und z-Richtung? (4 Punkte)

Lösung:

- Die Gradientenspulen werden wie folgt eingeschaltet:

Kartesische Abtastung:

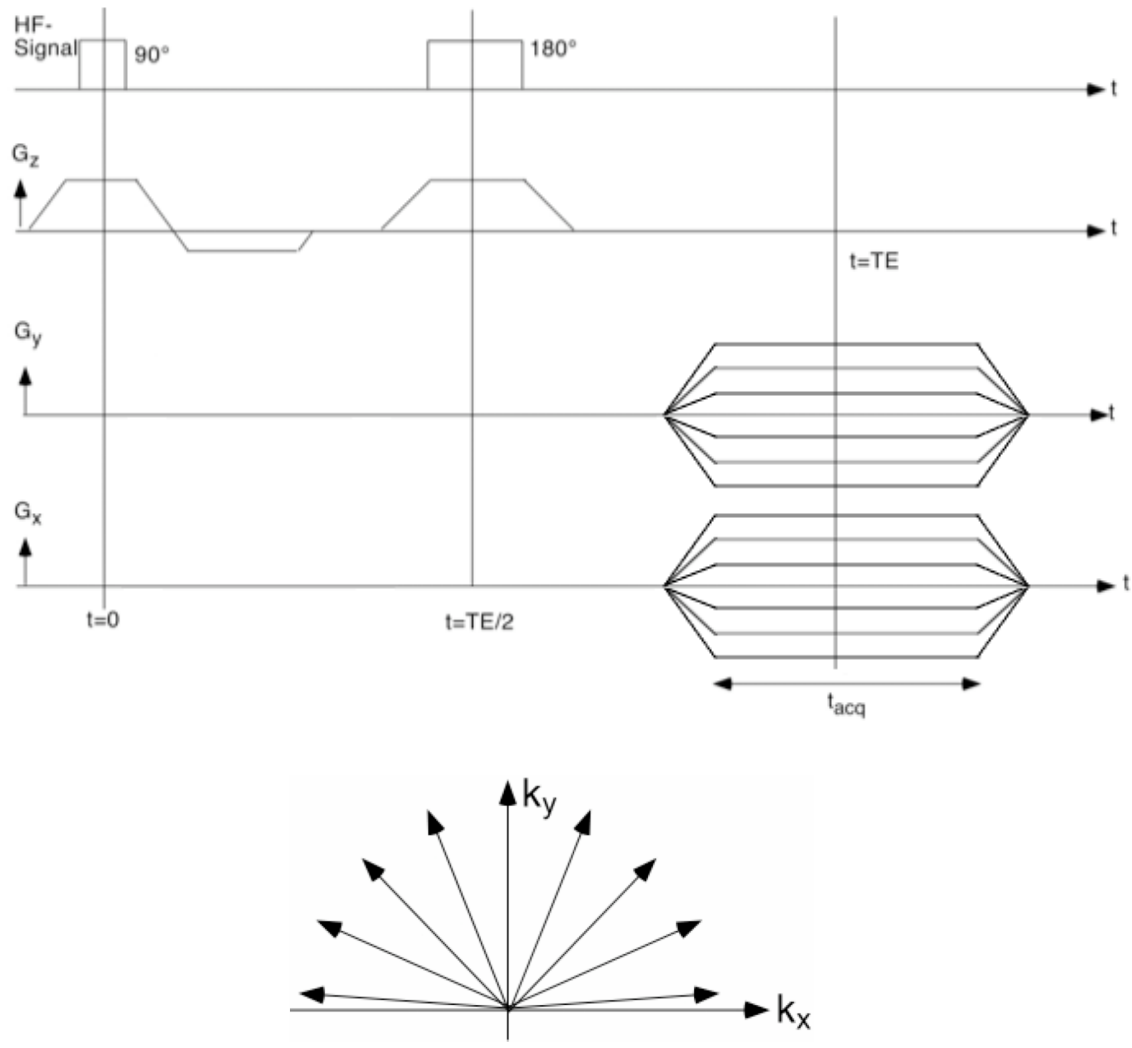
Bei der kartesischen Abtastung wird ein Gradient für die Phasenkodierung und einer für die Frequenzkodierung eingeschaltet. Mithilfe des Phasenkodiergradienten stellt man ein Muster von Phasen für die Quermagnetisierung ein, d. h. man wandert im k-Raum auf einen „Startwert“. Mit der Frequenzkodierung wird eine Zeile des k-Raums abgetastet (Spin-Echo).



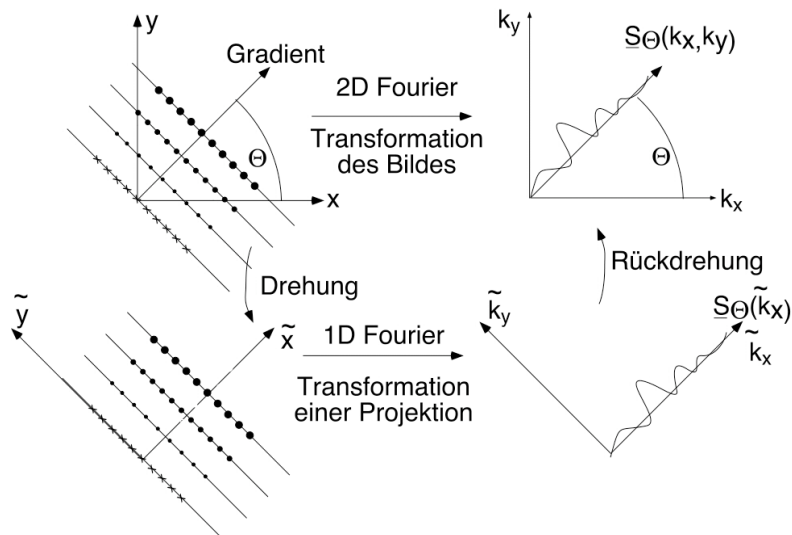
Radiale Abtastung:

Bei radialer Abtastung wird kein Phasenkodiergradient verwendet. Stattdessen werden gegen $t \approx T_E$ beide Gradientenspulen gleichzeitig eingeschaltet. Die Werte der Gradienten G_x und G_y werden dabei so gewählt, dass

$$\alpha = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right)$$



- b) Man beginnt mit der Messung von U_R und U_I mit den beiden Kanälen des Quadraturdetektors. Die gemessenen Signale $U_R(t)$ und $U_I(t)$ sind die Werte in einer Zeile der komplexen Fourier-Transformierten des Bildes. Bei kartesischer Abtastung werden mit vielen verschiedenen Phasenkodierungen nacheinander alle Zeilen des k -Raums gemessen und in eine Matrix eingetragen. Bei radialer Abtastung werden die Messdaten auf Radialstrahlen in die Matrix der Fourier-Transformierten des Bildes eingetragen. Hierbei muss geschickt interpoliert werden („gridding“) Mit einer inversen 2D-Fouriertransformation der Messmatrix erhält man das Bild.



- c) Die Auflösung hängt jeweils vom betreffenden Gradienten und den Einschalt- bzw. Auslesezeiten ab. Die Auflösung in z-Richtung hängt außerdem von der Bandbreite des anregenden HF-Signals ab. Durch stärkere Gradienten kann die Auflösung vergrößert werden. Gleichzeitig muss die Bandbreite sowohl beim Anregen als auch beim Auslesen vergrößert werden.

Aufgabe 10:

- a) Wie ist das gyromagnetische Verhältnis definiert? (2 Punkte)
- b) Was ist die Larmor-Frequenz f_0 ? (2 Punkte)
- c) Wie ändert sich die Magnetisierung m' mit der Zeit beim Anlegen eines transversalen Magnetfeldes $B_T \sin(\omega t)$ im rotierenden Koordinatensystem? (4 Punkte)

Lösung:

- a) Das gyromagnetische Verhältnis ist definiert als:

$$\gamma = \frac{m}{L} \quad \text{mit}$$

m : Betrag der Magnetisierung,

L : Betrag des Drehimpulses eines magnetischen Kreisel.

- b) Die Larmorfrequenz ist die Frequenz, mit der ein Spin-Ensemble in einem Magnetfeld präzidiert. Sie ist abhängig vom gyromagnetischen Verhältnis des Kerns. Multipliziert mit 2π erhält man die Präzessionswinkelgeschwindigkeit ω .

$$f_0 = \gamma^* \cdot B; \quad \gamma^* = \frac{\gamma}{2\pi}; \quad \omega_0 = \gamma \cdot B$$

- c) Aus den Bewegungsgleichungen nach Bloch ergibt sich für die Magnetisierung unter dem Einfluss eines äußeren transversalen Magnetfeldes:

$$\frac{d\vec{m}'(t)}{dt} = \gamma \cdot \vec{m}'(t) \times \vec{B}_T$$

Umkappen der Magnetisierung in die x,y-Ebene:

$$m'(z) = m_{z_0} \cos(\omega_F t) \quad \text{mit} \quad \omega_F = \gamma \cdot B_T$$