

Vorlesung: Bildgebende Verfahren in der Medizin II

Leiter: Prof. Dr. rer. nat. Olaf Dössel 2. Prüfer: Axel Loewe, M.Sc.

Klausur

23. September 2014
Beginn: 14:00 Uhr

Familienname:	AUFKLEBER
Vorname:	
Matrikel-Nr.:	

Angaben zur Klausur:

Die Arbeitszeit beträgt 2 Stunden; Hilfsmittel sind nicht erlaubt, außer einem Taschenrechner.

Der Lösungsweg muss vollständig angegeben und nachvollziehbar sein! Dokumentieren Sie Ihre Überlegungen, geben Sie erläuternde Kommentare! Verwenden Sie nur dokumentenechtes Schreibzeug!

Die maximal erreichbaren Punkte pro Aufgabe sind der Tabelle zu entnehmen.

Aufgabe:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Gesamt
Punkte:	13	11	6	5	5	5	13	12	12	7	89
erreicht:											

Note:_____

Ultraschall

Frage 1

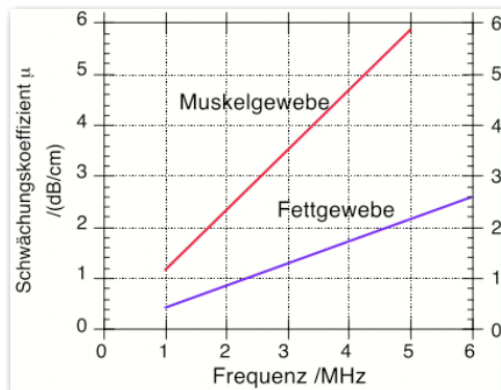
(13 Punkte)

- (a) Geben Sie die Formel für die Schallintensität als Funktion der Eindringtiefe für homogenes Gewebe an. Erläutern Sie anhand einer Skizze den Zusammenhang zwischen der Schallfrequenz und dem Schwächungskoeffizient. Aus welchen Komponenten setzt sich der Schwächungskoeffizient zusammen? (3 Punkte)
- (b) Skizzieren Sie die Komponenten eines US-Systems für den A-Mode. Erklären Sie die Time Gain Compensation. (5 Punkte)
- (c) Von welchen Größen hängt die laterale Auflösung bei der Ultraschalldiagnostik ab? Beschreiben Sie auch die Abhängigkeit der lateralen Auflösung von der Entfernung zum Sender. (2 Punkte)
- (d) Die mittlere Schallgeschwindigkeit im Gewebe beträgt ca. 1540 m/s . Berechnen Sie die theoretisch erreichbare axiale Auflösung bei einer Schallfrequenz von 2 MHz . (3 Punkte)

Lösung:

(a)

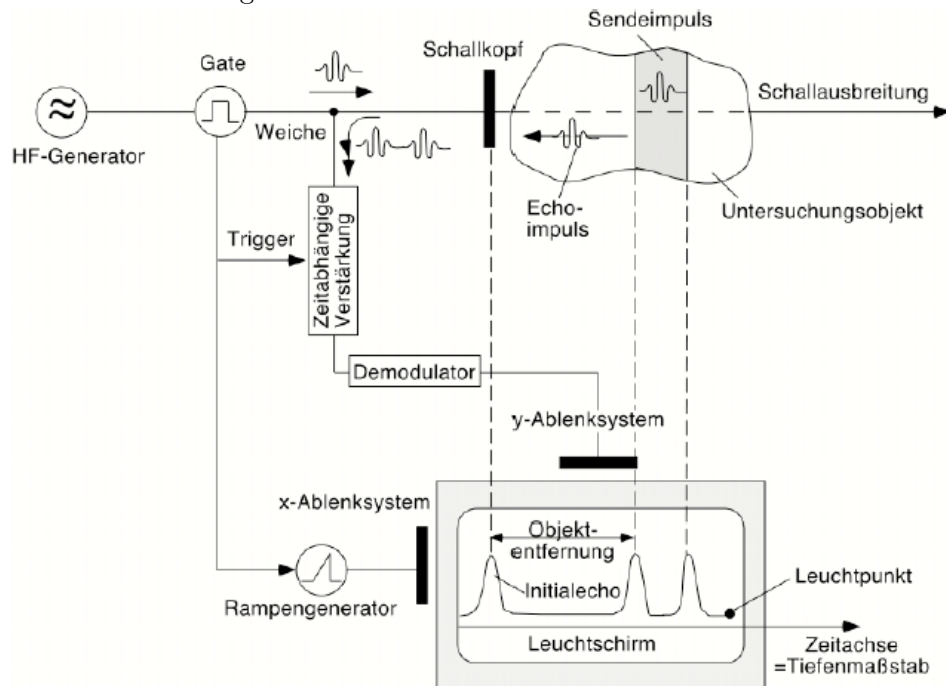
$$J(x) = J_0 \cdot \exp(-\mu \cdot x) \quad \mu = \mu_a + \mu_s$$



mit:

- J = Schallintensität
- μ_s = Streuanteil
- μ_a = Absorptionsanteil

- (b) **Time Gain Compensation:** zeitabhängiger Verstärker. Später ankommende Echos, die auf Grund der Absorption immer schwächer werden, werden damit mehr verstärkt als Signale von der Oberfläche.



- (c) Die laterale Auflösung ist proportional zur US-Wellenlänge und umgekehrt proportional zum Durchmesser des US-Wandlers. Dies gilt im sogenannten Fokusbereich. In größeren Entfernungen nimmt die Auflösung linear mit dem Abstand ab.
- (d) Die theoretische Grenze liegt bei $d = \lambda/2$.

$$d = \frac{c}{2 \cdot f}$$

$$d = \frac{1540 \text{ m/s}}{2 \cdot 2 \cdot 10^6 \text{ MHz}} = 0,38 \text{ mm.}$$

mit:

- c = mittlere Schallgeschwindigkeit
- f = Frequenz des Schallwelle
- d = theoretische axiale Auflösung

Frage 2

(11 Punkte)

- (a) Beim PW-Doppler US kommt es oft zu Artefakten, wenn die tatsächliche Blutgeschwindigkeit die theoretisch bestimmbare Blutgeschwindigkeit v_{max} überschreitet. Wodurch entstehen diese Artefakte? Leiten Sie den Zusammenhang zwischen der maximal nachweisbaren Geschwindigkeit v_{max} und der Wiederholrate T_{0max} ab. (4 Punkte)
- (b) Skizzieren Sie den Quadratur-Detektor. Beschreiben Sie die grundsätzliche Wirkungsweise des Quadratur-Detektors und was mit diesem Verfahren bestimmt werden kann? (7 Punkte)

Lösung:

- (a) Die Artefakte entstehen, wenn das Abtasttheorem verletzt wird (Aliasing-Artefakt).
Abtasttheorem:

$$\Delta f_{max} = \frac{1}{2 \cdot T_{0max}}$$

mit:

- T_{0max} = längster möglicher Wiederholabstand
- Δf_{max} = max. Frequenzverschiebung

Maximale Flussgeschwindigkeit nach der Dopplergleichung:

$$\Delta f_{max} = \frac{2 \cdot f_0}{c} \cdot v_{max} \cdot \cos\Theta$$

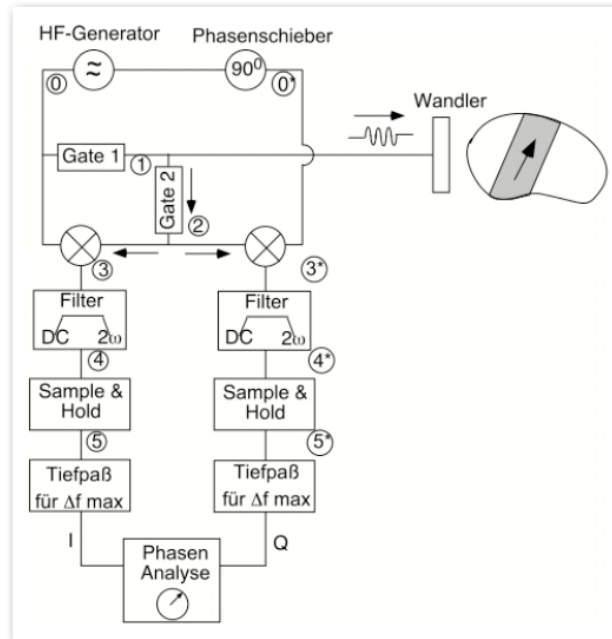
mit:

- v_{max} = max. Blutgeschwindigkeit
- Θ = Einstrahlwinkel
- f_0 = Frequenz der eingestrahlten US-Welle
- c = Geschwindigkeit der US-Welle im Medium

Der Zusammenhang zwischen der maximal nachweisbaren Geschwindigkeit und der Wiederholrate ist also:

$$v_{max} \cdot \cos\Theta = \frac{c}{4 \cdot f_0 \cdot T_{0max}}$$

(b)



Beschreibung:

- 0: kontinuierlich abstrahlender HF-Generator, in einem zweiten Kanal wird das Echo mit einem um 90° phasenverschobenen HF-Generator gemischt
- 1: Gate 1: lässt kurze Wellenpakete im Abstand T durch
- 2: Gate 2: aus dem ankommenden Echo wird ein kurzer Abschnitt durchgelassen
- Verzögerung zwischen beiden Gates bestimmt Tiefe aus der das Signal kommt
- 3: Signale werden gemischt (Signal mit $\Delta\omega + 2\omega$ und $\Delta\omega$)
- 4: 2ω -Filter; $\Delta\omega$ bleibt übrig
- 5: Sample & Hold und Tiefpass

Vorteil: Ermittlung der Richtung des Blutflusses, da der sin-Term nicht nullsymmetrisch ist (wenn $\Delta\omega$ negativ ist, dann fließt das Blut vom US-Wandler weg)

Thermographie

Frage 3

(6 Punkte)

- (a) Welchen Zusammenhang beschreibt das Plancksche Strahlungsgesetz? (3 Punkte)
- (b) Wo liegt der optimale Wellenlängenbereich für die Thermographie und nach welchen Kriterien erfolgt die Wahl? (3 Punkte)

Lösung:

- (a) Das Plancksche Strahlungsgesetz beschreibt die Abhängigkeit der spektralen Strahlungsdichte des schwarzen Körpers von der Temperatur und der Wellenlänge.
- (b) Der optimale Wellenlängenbereich für die Thermographie liegt bei $8\ \mu\text{m}$ bis $12\ \mu\text{m}$. Hier ändert sich die spektrale Strahlungsdichte stark mit der Temperatur (bei $T = 37^\circ\text{C}$) und die Atmosphäre ist weitgehend durchsichtig ("IR-Fenster").

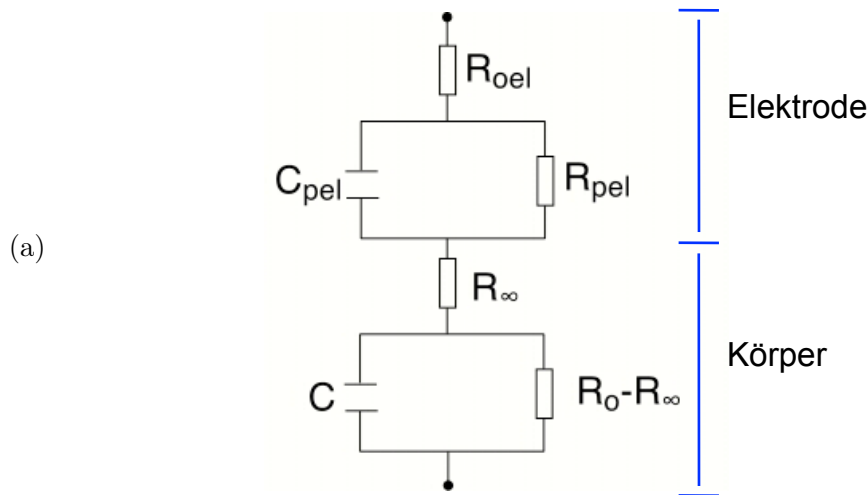
Impedanztomographie

Frage 4

(5 Punkte)

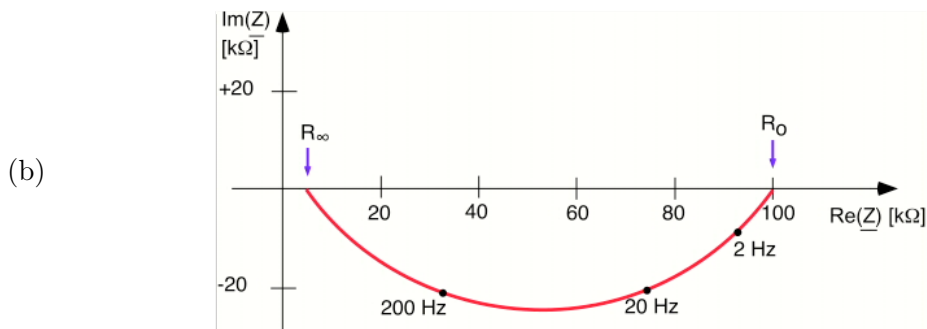
- (a) Skizzieren Sie das vereinfachte Ersatzschaltbild von Elektrode und Körpergewebe und erläutern Sie für jedes Bauelement kurz die physikalisch-physiologische Entsprechung. (3 Punkte)
- (b) Skizzieren Sie qualitativ die Ortskurve der Impedanz von Körpergewebe. (2 Punkte)

Lösung:



mit:

- R_{oel} = ohmscher Widerstand der Elektrode bei hohen Frequenzen
- C_{pel} = Elektroden/Haut-Kapazität
- R_{pel} = Elektroden/Haut-Widerstand
- R_{∞} = Hautwiderstand
- C = Gewebekapazität (bedingt durch die Zellmembran)
- R_0 = Gleichstromwiderstand (extrazellulärer Pfad)



Frage 5

(5 Punkte)

- (a) Welche inhärenten Fehler gehen mit der Rückprojektionsmethode der Impedanztomographie einher? (4 Punkte)
- (b) Welche andere Rekonstruktionsmethode, die diese Fehler zu umgehen versucht, kommt bei der Impedanztomographie zum Einsatz? (1 Punkt)

Lösung:

- (a)
- Keine mathematisch geeignete Filterung vor der Rückprojektion möglich
 - Nach der ersten Rückprojektion ist der Zylinder nicht mehr homogen was zu Inkonsistenz führt
 - Der Körper hat keine ideale Zylinderform und ist nicht zweidimensional
 - Das Modell ist zweidimensional, die Elektroden sind aber punkt- und nicht linienförmig
- (b) Manchmal kommt ein Rekonstruktionsalgorithmus zum Einsatz, der auf der Finite-Elemente-Methode basiert. Die Leitfähigkeit in vielen Volumenelementen wird so lange verändert bis die Feldrechnung (FEM) zu den Messungen passt.

Abbildung bioelektrischer Ströme

Frage 6**(5 Punkte)**

- (a) Wie ist das “lead field” für ein Elektrodenpaar definiert? (2 Punkte)
- (b) Wie ist ein Stromdipol definiert (Gleichung und Erklärung) und in welcher Einheit wird er gemessen? (3 Punkte)

Lösung:

- (a) “lead field”

$$V = \begin{bmatrix} a_x(x, y, z) & a_y(x, y, z) & a_z(x, y, z) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_x(x, y, z) \\ p_y(x, y, z) \\ p_z(x, y, z) \end{bmatrix}$$

mit:

- V = gemessene Spannung
- $\mathbf{a}(x, y, z)$ = “lead field”
- $\mathbf{p}(x, y, z)$ = Stromdipol

Das Skalarprodukt aus dem Vektor eines Stromdipols $\mathbf{p}$ am Ort (x, y, z) mit dem Vektor des “lead fields” $\mathbf{a}$ am Ort (x, y, z) ergibt die Spannung, die man am Elektrodenpaar messen kann.

- (b) Definition des Stromdipols:

$$\mathbf{J}_i dv = I \cdot \mathbf{d}$$

mit :

- $\mathbf{J}_i$ = eingeprägte Stromdichte
- dv = Volumenelement
- I = Stromstärke in einem Volumenelement
- $\mathbf{d}$ = Kantenlänge des Volumenelements, durch das der Strom I fließt

Einheit des Stromdipols: $A \cdot m$

Auf einem Pfad $\mathbf{d}$ bzw. in einem Volumenelement dv fließt ein Strom in einer Richtung. Der Strompfad wird durch Rückströme im Volumen geschlossen.

Endoskopie

Frage 7**(13 Punkte)**

- (a) Nennen Sie drei Typen von Endoskopen und erklären Sie jeweils, wie das optische Bild vom Inneren des Körpers dem Arzt sichtbar gemacht wird. (6 Punkte)
- (b) Welches sind die Qualitätskriterien eines Endoskopiesystems? (4 Punkte)
- (c) Skizzieren Sie den schematischen Querschnitt eines Faserendoskops und beschriften Sie die Komponenten. (3 Punkte)

Lösung:

- (a)
- Faserendoskop:
Lichtleitfasern führen das eingekoppelte Licht fast verlustlos von einem Ende zum anderen Ende. Der Grund ist, dass es aufgrund einer genau eingestellten radialen Funktion des Brechungsindex zu einer Totalreflexion an der Innenseite des Fasermantels kommt. Wichtig ist, dass das Bild über ein geordnetes Faserbündel übertragen wird.
 - Linsenendoskop:
Linsenendoskope bestehen aus einer Kette von Linsen, mit denen das Objekt jeweils 1:1 abgebildet wird.
 - Videoendoskop:
Das Bild wird an der Spitze des Endoskops durch eine CCD-Kamera aufgenommen und digital weitergegeben.

(b) **Qualitätskriterien:****Optische Eigenschaften**

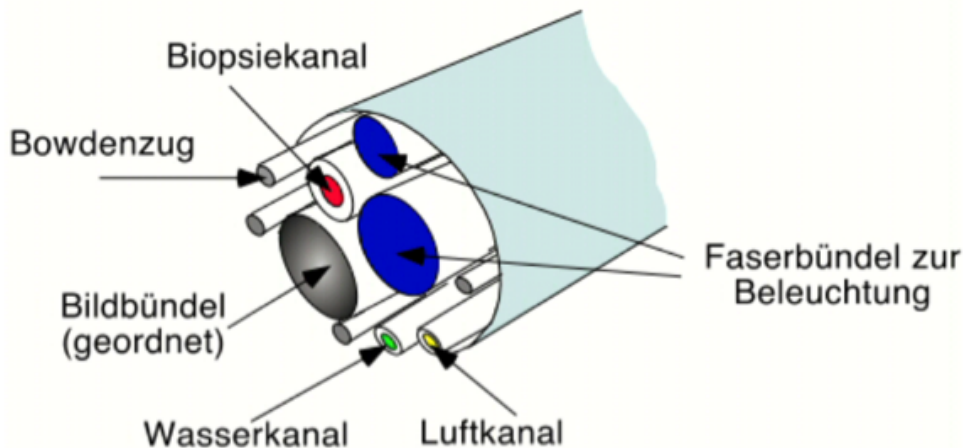
- Zahl der auflösbaren Bildpunkte
- Fokusbereich
- Farbwiedergabe
- Ausleuchtung

Mechanische Eigenschaften

- Schaftdurchmesser
- Flexibilität des Schaftes
- Bewegungsmöglichkeit der Spitze

Desinfizierbarkeit

(c)



Magnetresonanztomographie

Frage 8**(12 Punkte)**

Bei der Einstrahlung einer elektromagnetischen Welle lassen sich die thermischen Besetzungszahlen der präzedierenden Spins verändern.

- (a) Nennen Sie die zwei Relaxationsarten und deren Ursache zur Rückkehr in das thermische Gleichgewicht. (4 Punkte)
- (b) Bei der MR-Tomographie sollen Schnittbilder der Quermagnetisierung $M_T(x, y)$ erzeugt werden. Nennen Sie die typischen Kodierungsarten, die mit dem G_x -, dem G_y - und dem G_z -Gradienten erreicht werden. Welche Parameter bestimmen die Auflösung in x- und y-Richtung bei kartesischer Abtastung? (Formel & Formelzeichen benennen) (5 Punkte)
- (c) Gegeben ist ein homogenes Feld von $B_z = 0,5 T$, dem ein Gradientenfeld G_z von $10 mT/m$ überlagert ist. Im Koordinatenursprung ist $B_z = 0,5 T$. Mit welcher Frequenz präzedieren die Spins im ruhenden und im rotierenden Koordinatensystem bei $z = 20 mm$ ($\gamma^* = \frac{\gamma}{2\pi} = 42,58 MHz/T$) ? (3 Punkte)

Lösung:

- (a) • **Spin-Spin-Relaxation bzw. Querrelaxation:** Die Quermagnetisierung zerfällt durch ihre Spin-Spin-Wechselwirkung, d.h. durch Zusammenstöße mit anderen magnetischen Kreisel.
- **Spin-Gitter-Relaxation bzw. Längsrelaxation:** Nach der Anregung kehrt das System durch die Wechselwirkung mit den umgebenden Atomen (Gitter) in den Grundzustand zurück.
- (b) • Frequenzkodierung (G_x -Gradient)
- Phasenkodierung (G_y -Gradient)
- selektive Anregung (G_z -Gradient)

$$\Delta z = \frac{\Delta\omega}{\gamma \cdot G_z}$$

mit:

- Δz = Breite der angeregten Schicht
- $\Delta\omega$ = Bandbreite der HF-Welle
- γ = gyromagnetisches Verhältnis

$$\Delta y = \frac{\pi}{\gamma \cdot G_{y,max} \cdot T_y}$$

mit:

- Δy = Pixelabstand
- π = maximaler Phasendrehwinkel
- γ = gyromagnetisches Verhältnis
- $G_{y,max}$ = maximaler G_y -Gradient zur Phasenkodierung
- T_y = Einschaltzeit des Gradienten

(c)

$$2 \cdot \pi \cdot f = \omega = \gamma \cdot B = \gamma \cdot B_{00} + \gamma \cdot G_z \cdot z$$

$$f_1 = \gamma^* \cdot B_{00} = 42,58 \frac{MHz}{T} \cdot 0,5 T = 21,29 MHz$$

$$f_2 = \gamma^* \cdot G_z \cdot z = 42,58 \frac{MHz}{T} \cdot 10 \frac{mT}{m} \cdot 0,02 m = 8,52 kHz$$

Frequenz im ruhenden Koordinatensystem:

$$21,29 MHz + 8,52 kHz = 21,29852 MHz.$$

Frequenz im rotierenden Koordinatensystem:

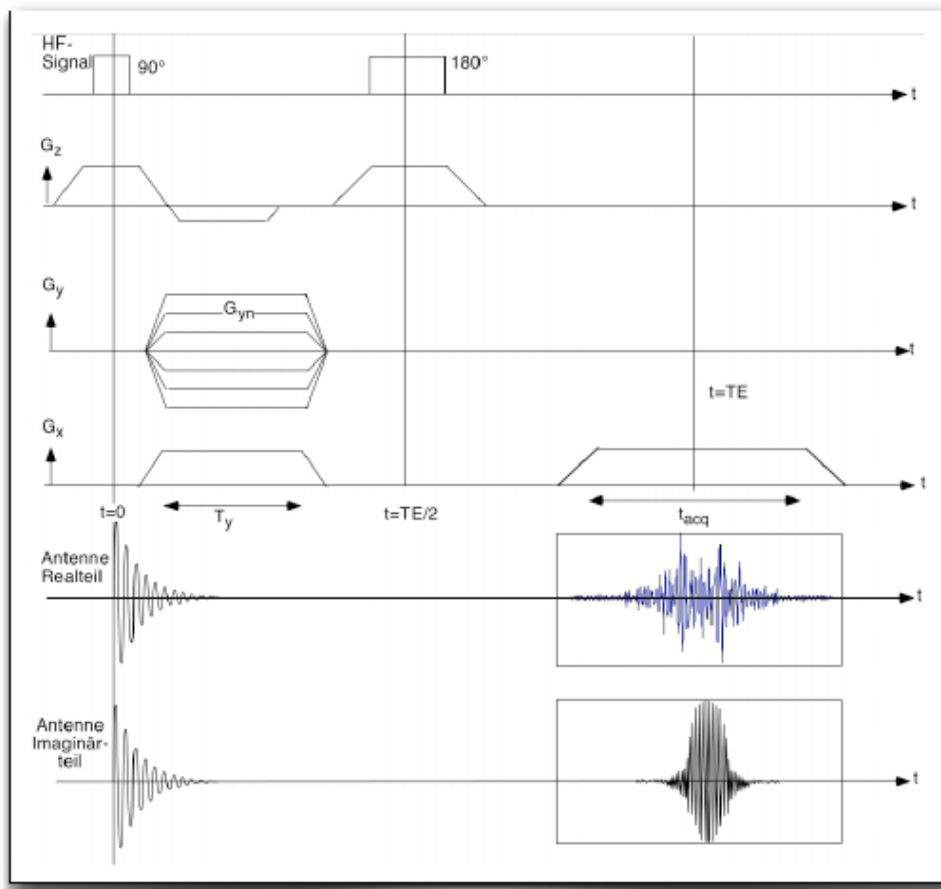
$$8,52 kHz.$$

Frage 9**(12 Punkte)**

- (a) Erläutern und skizzieren Sie die Pulssequenz für die kartesische Abtastung des k- (8 Punkte)
Raumes mit Spin-Echos.
- (b) Welche Größen bestimmen das Signal-Rausch-Verhältnis während einer MRT-Auf- (4 Punkte)
nahme?

Lösung:

(a)

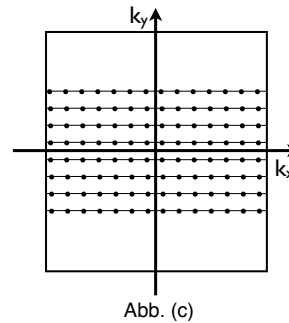
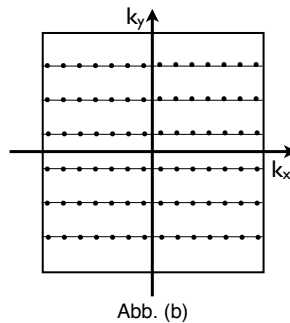
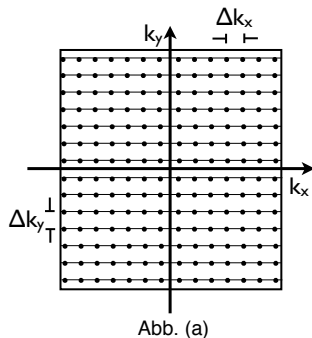
**Erklärung:**

- Erzeugung eines Spin-Echos mit 90°- und 180°-Pulsfolge
 - Nach der Zeit T_e ist ein maximales Signal messbar
 - Phasenkodier-Gradienten werden zwischen den beiden HF-Pulsen eingeschaltet
 - Frequenzkodier-Gradienten werden während des Spin-Echos aktiviert, sodass ein optimales Signal erwartbar ist
 - Startwerte für Abtastung des k-Raumes und Beginn der Frequenzkodiergradienten werden so aufeinander abgestimmt, dass bei dem größten Echosignal (entspricht T_E) der Bereich $k_x \approx 0$ durchlaufen wird. Vor und nach T_E wird das Signal aufgrund der Dephasierungen immer kleiner, sodass hohe Raumfrequenzen gedämpft werden (Tiefpasscharakteristik)
- (b) Formel sowie die Formelzeichen für das SNR müssen nicht angegeben werden, verbale Erläuterung reicht auch aus:
- Güte Q der HF-Spule (Resonanzkreis)
 - Sättigungsmagnetisierung M_{T0} (diese nimmt mit B_0 zu)
 - Verhältnis aus Echozeit T_E und Relaxationszeit T_2
 - Rauschbetrag des Empfangskreises (Eingangsdämpfung δ und Verstärker-Rauschzahl F_r)
 - Bandbreites des Verstärkers Δf
 - ausgeleuchtetes Volumen der Empfangsspule V_{eff}
 - Zahl der Messungen N_x

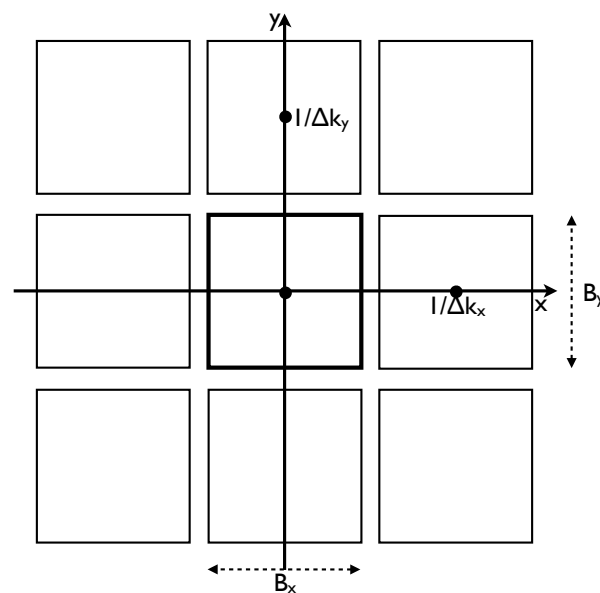
Frage 10**(7 Punkte)**

Durch Phasen- und Frequenzkodierung tastet man den k -Raum kartesisch ab, üblicherweise auf Linien entlang der k_x -Achse. Man stelle sich beispielsweise vor, dass das Ablaufen des k -Raums wie in Abb (a) dargestellt zu einem optimalen Bild führt.

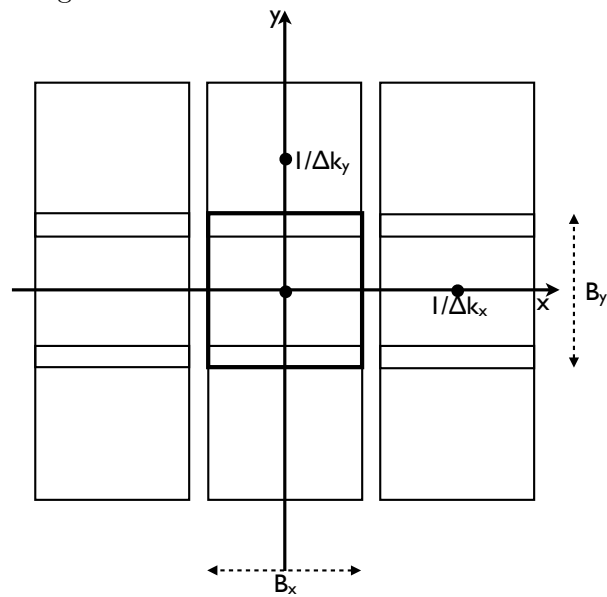
- (a) Wie sieht der zu Abb. (a) gehörende Ortsraum aus? (3 Punkte)
- (b) Um Zeit zu sparen werden nun folgende Linien aus dem k -Raum entsprechend den Abb. (b) und (c) weggelassen. Wie wirkt sich das jeweils auf den Ortsraum aus? (4 Punkte)
- Hinweis: zu Abb. (b) Skizze und Erklärung, zu Abb. (c) genügt eine kurze Beschreibung. Begründen Sie jeweils Ihre Antwort.

**Lösung:**

(a) Bild im Ortsraum:



- (b) Zu Abb. (b): Durch Unterabtastung in k_y -Richtung überlappen sich die Bilder, es kommt zu Aliasing-Artefakten.



Zu Abb. (c): Hohe k_y stehen für hohe Ortsfrequenzen. Werden diese weggelassen wird das Bild unschärfer.