

Vorlesung: Bildgebende Verfahren in der Medizin II

Leiter: Prof. Dr. rer. nat. Olaf Dössel 2. Prüfer: Dipl.-Ing. Matthias Keller

Klausur

28. September 2012
Beginn: 08:00 Uhr

Familienname:

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	11	Gesamt
Punkte:	8	14	11	4	6	4	4	4	12	6	6	79
erreicht:												

Note:_____

1 Ultraschall (US)

Frage 1

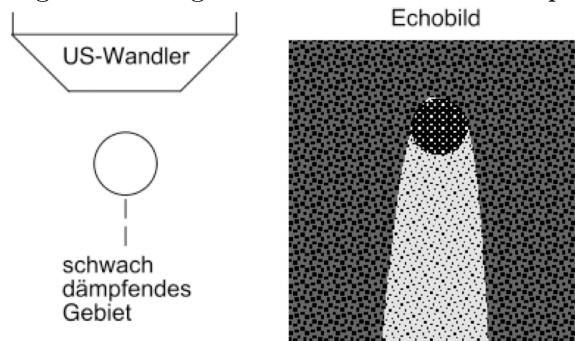
(8 Punkte)

Artefakte bei der US-Bildgebung

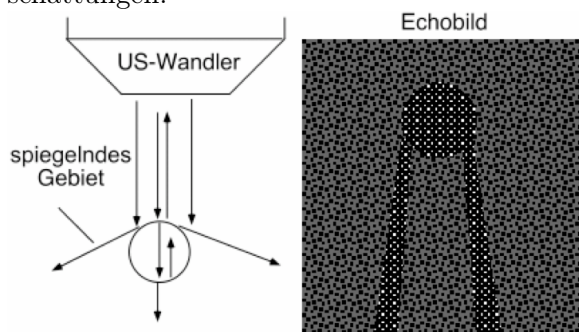
Welche Artefakte sind für die US-Bildgebung bekannt? (Mindestens 4 Typen jeweils mit Skizze und kurzer Beschreibung)

Lösung: (jeweils ein Punkt für Erklärung und Skizze)

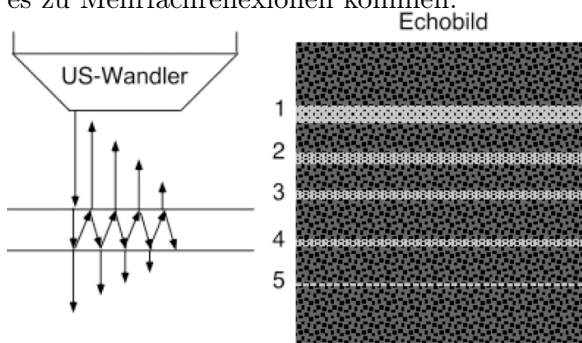
1. Hinter schwach dämpfenden Gebieten kommt es zu einer scheinbaren Signalerhöhung durch die Time-Gain Compensation.



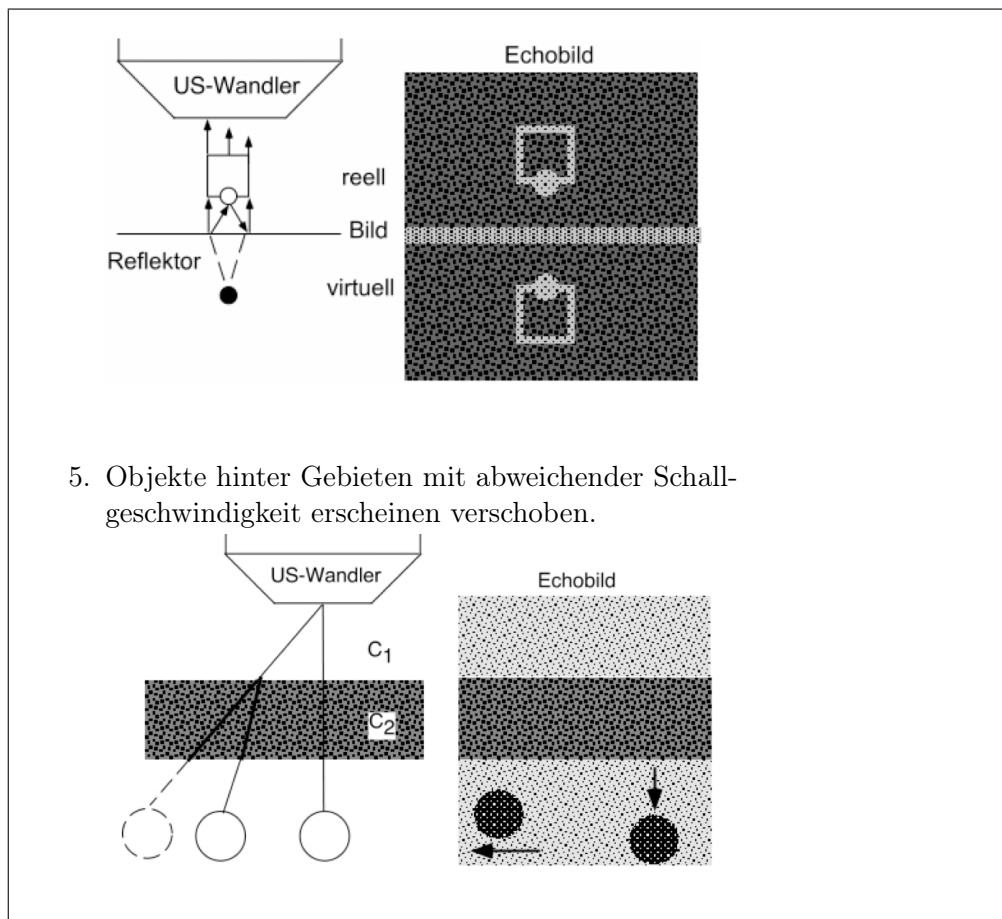
2. Hinter schrägen Kanten, die relativ stark spiegeln, kommt es zu Abschattungen.



3. Bei zwei stark reflektierenden, ungefähr parallelen Grenzflächen kann es zu Mehrfachreflexionen kommen.



4. Objekte vor stark reflektierenden Flächen können als virtuelles Bild doppelt erscheinen.



5. Objekte hinter Gebieten mit abweichender Schallgeschwindigkeit erscheinen verschoben.

Frage 2

(14 Punkte)

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

Lösung:

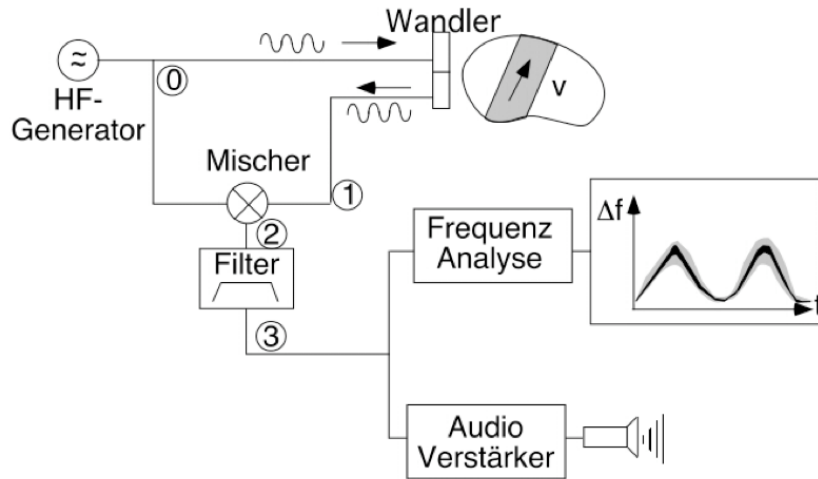
- Der Dopplereffekt tritt auf, wenn ein Sender und/oder Empfänger einer Welle sich relativ zueinander bewegen. Die auftretende Frequenzverschiebung ist proportional zur relativen Geschwindigkeit. Bei der Doppler-Ultraschalldiagnostik wird meistens die Geschwindigkeit des in den Blutgefäßen oder im Herzen 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:

$$\Delta f = \frac{2f}{c} \cdot v \cdot \cos(\theta) \quad (1)$$

Mit der Dopplerfrequenz Δf , der Ultraschallfrequenz f , der Schallgeschwindigkeit c , Geschwindigkeit des streuenden Teilchens v und θ der Winkel zwischen Gefäß und US-Tastkopf.

- 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 zwischen Blutgefäß und US-Kopf verfälschen das Ergebnis der Fließgeschwindigkeit. Stereomessköpfe erlauben eine Erfassung der Fließgeschwindigkeit ohne Kenntnis des Winkels.
- 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“)

Frage 3

(11 Punkte)

- (a) Für eine Ultraschallmessung in oberflächennahen Schichten, stehen zwei Wandler mit unterschiedlichen Frequenzen zur Verfügung.

(2 Punkte)

- Wandler 1: $f_1 = 20 \text{ MHz}$
- Wandler 2: $f_2 = 3,5 \text{ MHz}$

Welcher Wandler ist für die Messung zu bevorzugen? (kurze Begründung der Wahl)

- (b) Berechnen Sie für den gewählten Wandler aus Aufgabenteil (a) die optimale Dicke des Wandlerplättchens (Hinweis: Schallgeschwindigkeit in Piezokeramik: $c = 4350 \text{ m/s}$).

(2 Punkte)

- (c) Warum würde eine Messung im Nahbereich eines Ultraschallwandlers zu schlechten Ergebnissen führen?

(1 Punkt)

- (d) Welcher Abstand eignet sich für die Messung, und in welcher Entfernung liegt dieser für die gewählte Frequenz aus Aufgabenteil (a), bei einem Wandlerdurchmesser $D = 1 \text{ mm}$? (Falls Sie Aufgabenteil (a) nicht lösen konnten, rechnen Sie mit einer Frequenz von $f_3 = 11,5 \text{ MHz}$, Hinweis: Es gilt $N = \frac{D^2}{4\lambda}$, $c_{\text{Wasser}} = 1480 \text{ m/s}$) (3 Punkte)
- (e) Welche laterale Auflösung ist für diesen Wandler zu erwarten (6 dB-Breite)? (1 Punkt)
- (f) Erklären Sie, wie sich theoretisch die axiale Auflösung ergibt und berechnen Sie die theoretische Auflösung für den vorliegenden Fall. (2 Punkte)

Lösung:

- (a) Für die US-Messung in oberflächennahen Schichten ist Wandler 1 zu bevorzugen. Höhere Frequenzen führen zu einer geringen Eindringtiefe und einer höheren Auflösung. Da an der Oberfläche die Eindringtiefe untergeordnete Rolle spielt, kann von der höheren Auflösung profitiert werden.

- (b) Die Dicke des piezoelektrischen Wandlerplättchens wird so gewählt, dass eine stehende Welle der gewünschten Ultraschallfrequenz gerade hineinpasst. Daraus folgt eine optimale Dicke von $\lambda/2$.

- Wandler 1: $109 \mu\text{m}$
- Wandler 2: $620 \mu\text{m}$

- (c) Im Nahbereich kommt es zu starken Interferenzerscheinungen und damit zu einer sehr inhomogenen Intensitätsverteilung.

- (d) Der Fokusbereich liegt im Abstandsbereich zwischen $x = N$ und $x = 2N$. Für die verschiedenen Frequenzen folgt mit

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

- $\lambda_1 = 0,074 \text{ mm}$
- $\lambda_2 = 0,423 \text{ mm}$
- $\lambda_3 = 0,129 \text{ mm}$

Es ergibt sich mit

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (3)$$

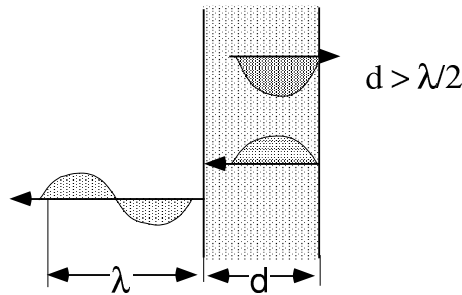
- $N_1 = 3,4 \text{ mm}$
- $N_2 = 0,59 \text{ mm}$
- $N_3 = 1,9 \text{ mm}$

Damit liegen die Fokusbereiche, wie folgt:

- $Fokus_1 = 3,4 \text{ mm} - 6,8 \text{ mm}$
- $Fokus_2 = 0,59 \text{ mm} - 1,08 \text{ mm}$
- $Fokus_3 = 1,9 \text{ mm} - 3,8 \text{ mm}$

- (e) Die laterale Auflösung ergibt sich ungefähr zu $d = 1/3D = 1/3 \text{ mm}$.

- (f) Die theoretische Grenze der axialen Auflösung liegt bei der halben US-Wellenlänge, da in diesem Fall gerade noch die Reflexion eines Wellenzuges an zwei Schichten aufgelöst werden kann.



Für die gegebenen Wellenlängen ergeben sich somit folgende Auflösungen:

- $\lambda_1/2 = 0,037 \text{ mm}$
- $\lambda_2/2 = 0,211 \text{ mm}$
- $\lambda_3/2 = 0,064 \text{ mm}$

2 Thermographie

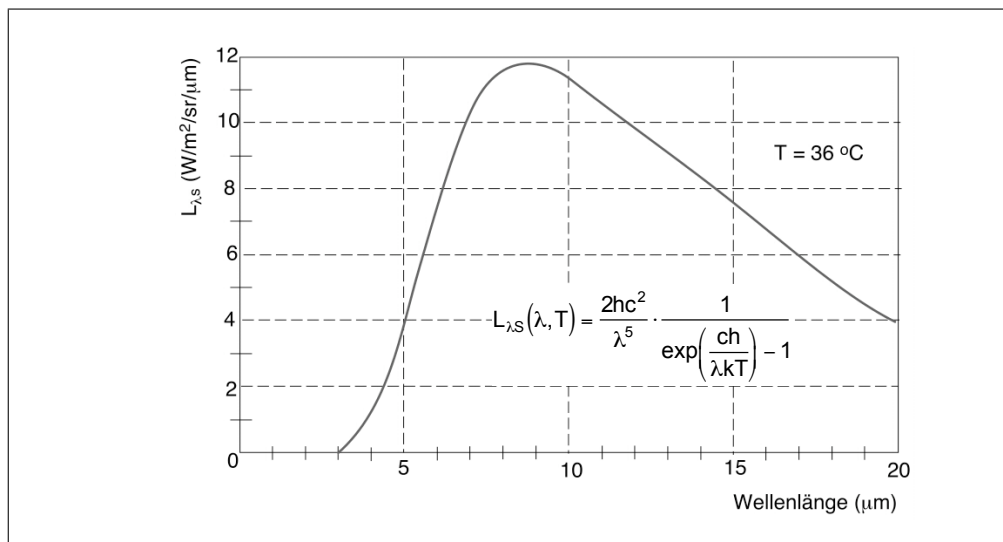
Frage 4

(4 Punkte)

- (a) Welchen Zusammenhang beschreibt das Planck'sche 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 Planck'sche Strahlungsgesetz beschreibt die Abhängigkeit der spektralen Strahlungsdichte des schwarzen Körpers von der Temperatur und der Wellenlänge.
- (b) Der interessante Wellenlängenbereich liegt bei $5 \mu\text{m}$ bis $15 \mu\text{m}$. Der optimale Wellenlängenbereich für die Thermographie liegt bei $8 \mu\text{m}$ bis $12 \mu\text{m}$, da in diesem Bereich die Atmosphäre weitgehend durchsichtig ist (IR-Fenster)



3 Impedanztomographie

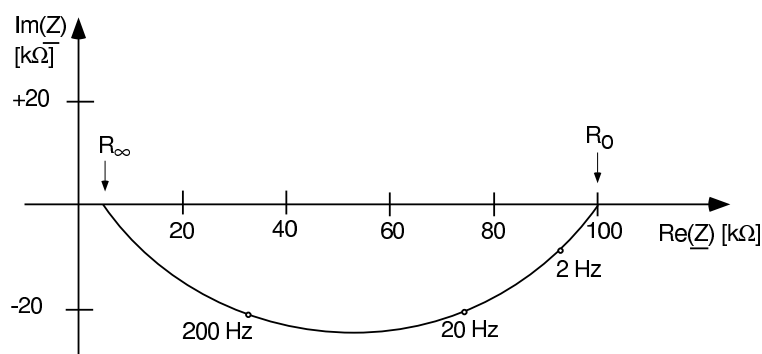
Frage 5

(6 Punkte)

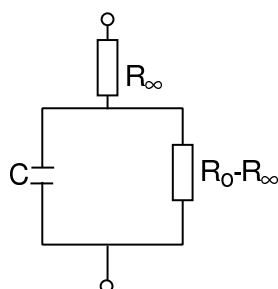
- (a) Skizzieren Sie eine typische Ortskurve der Impedanz von Körpergewebe. (2 Punkte)
- (b) Geben Sie ein einfaches Ersatzschaltbild für die Impedanz von Körpergewebe an. (2 Punkte)
- (c) Erklären Sie den Verlauf der komplexen Impedanz. (2 Punkte)

Lösung:

(a) Ortskurve der Impedanz von Körpergewebe



(b) Ersatzschaltbild für Körpergewebe



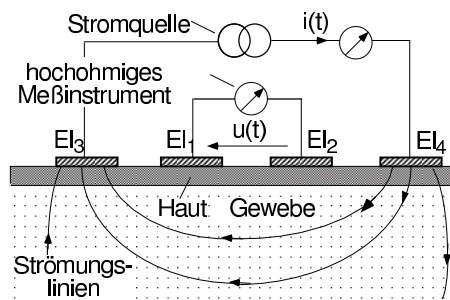
- (c) Körpergewebe ist ein Leiter mit einer hohen Dielektrizitätskonstanten. Es besteht aus vielen Zellen, die in einen Extrazellulärraum eingebettet sind. Zellmembranen verhalten sich elektrisch wie ein Kondensator, daher hat die Impedanz neben dem ohmschen Anteil einen negativen Imaginärteil.

Frage 6**(4 Punkte)**

- (a) Skizzieren Sie die Vierelektroden-Messtechnik für Körperimpedanzen. (2 Punkte)
 (b) Welche Vorteile hat sie? (2 Punkte)

Lösung:

- (a) Vier-Elektroden-Messtechnik



- (b) Bei der Vier-Elektroden-Technik geht die relativ große und stark schwankende Übergangsimpedanz zwischen dem Elektrodenmaterial und der Haut nicht in die Messung ein. Die Stromquelle liefert eine wohldefinierte Stromstärke unabhängig von der Übergangsimpedanz.
 – Das Spannungsmessgerät misst mit seinem großen Eingangswiderstand praktisch stromlos, so dass die Übergangsimpedanz keinen Beitrag zum Signal liefert.

4 Abbildung bioelektrischer Ströme**Frage 7****(4 Punkte)**

- (a) Mit welcher Matrixgleichung können Sie das Vorwärtsproblem bei der Abbildung bioelektrischer Ströme beschreiben (Gleichung und Bezeichnung der Größen)? (2 Punkte)
 (b) Welches Problem stellt sich beim inversen Problem? (2 Punkte)

Lösung:

- (a) Die Matrixgleichung lautet:

$$\mathbf{V} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{P} \quad (4)$$

Mit

V: Array der gemessenen Potentiale bzw. Magnetfelder

A: Lead-field-Matrix: diese Matrix gibt an, welches Messsignal **V** zum Stromdipol **P** gehört.

P: Array der Stromdipole im Körper

- (b) Beim inversen Problem muss die Matrix **A** invertiert werden, jedoch ist das Problem schlecht gestellt, d.h. kleine Änderungen im Messsignal können zu großen Abweichungen in der Lösung führen.

5 Optische Tomographie

Frage 8

(4 Punkte)

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

Lösung: Bei der Monte-Carlo-Methode werden in einer Computersimulation Millionen von Photononen auf das Gewebe eingestrahlt und der Weg jedes einzelnen Photons mit statistischen Methoden verfolgt.
Beim Diffusionsmodell wird die Ausbreitung von Photonen im Gewebe mit einer Diffusionsgleichung beschrieben.

6 Magnetresonanztomographie (MRT)

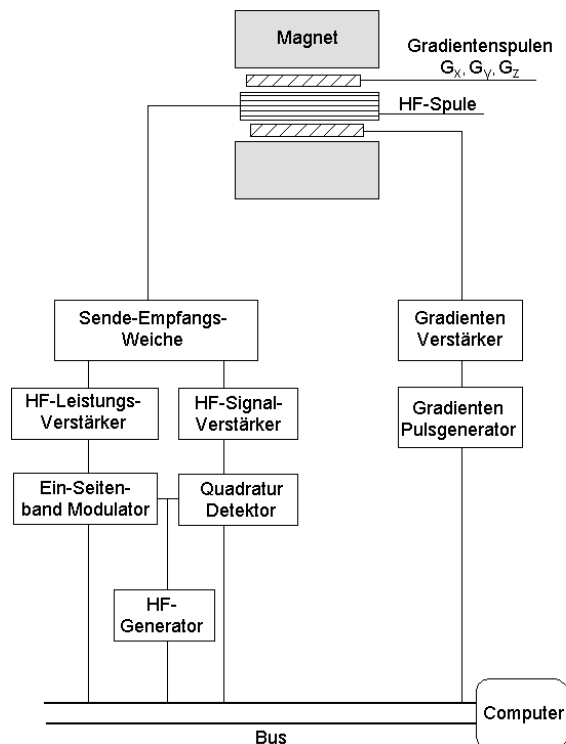
Frage 9

(12 Punkte)

- (a) Skizzieren Sie ein MRT-System, beschriften Sie die wesentlichen Komponenten. (6 Punkte)
- (b) Im Inneren des Magneten befinden sich zwei verschiedene Spulensysteme. Wie heißen sie? (2 Punkte)
- (c) Welchen Zweck erfüllen die beiden Spulensysteme? (2 Punkte)
- (d) Skizzieren Sie jeweils einen typischen Aufbau der Spulen. (2 Punkte)

Lösung:

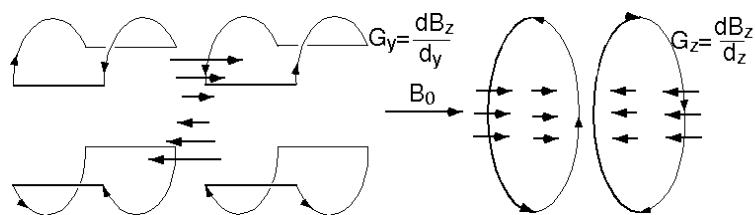
(a) Komponenten eines MRT-Systems



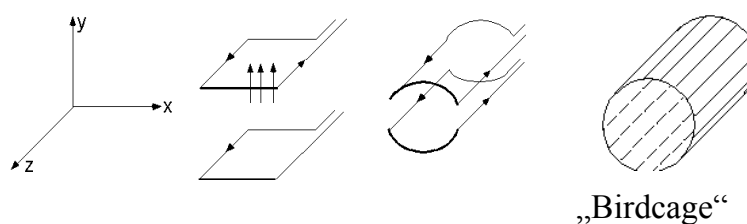
(b) Der Magnet enthält Gradientenspulen und eine HF-Spule

(c) Die Gradientenspulen erzeugen Magnetfeldgradienten zur Ortskodierung. Die HF-Spule erzeugt ein rotierendes Wechselfeld, transversal zum Grundmagnetfeld. Ihr Feld ändert sich gemäß der Larmorfrequenz der Kernspins.

(d) Gradientenspulen (ein Beispiel ausreichend):



HF-Spulen (ein Beispiel ausreichend):



- (a) Bei einer Phasenkodierung in x-Richtung gilt die folgende Formel um die Raumfrequenz im k-Raum zu beschreiben: (3 Punkte)

$$k_x = \gamma \cdot G_x \cdot T_x \quad (5)$$

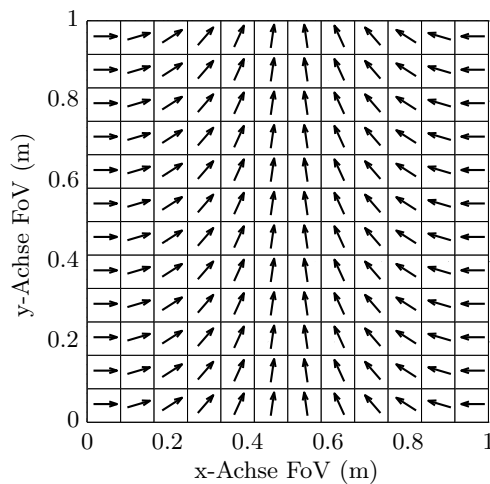
Hierbei ist γ das gyromagnetische Verhältnis, G_x der Gradient in x-Richtung und T_x die Zeitdauer, für die der Gradient angeschaltet wird.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Orientierung der Spins in einer x-y-Scheibe des Field of View (FoV), nach der Phasenkodierung im rotierenden Koordinatensystem dargestellt. Ordnen Sie den Abbildungen die folgenden Zeiten T_x zu und geben Sie eine kurze Erklärung für Ihre Wahl:

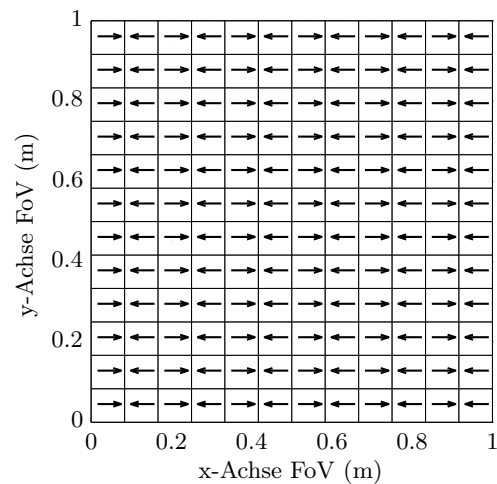
- $T_{x,1} = 88,6 \mu s$
- $T_{x,2} = 17,4 \mu s$
- $T_{x,3} = 7,4 \mu s$

Anmerkung: Aus Darstellungsgründen entsprechen die Phasenkodierungen nicht genau denjenigen, der aufgeführten Zeiten. Der qualitative Zusammenhang ist jedoch für die Zuordnung ausreichend.

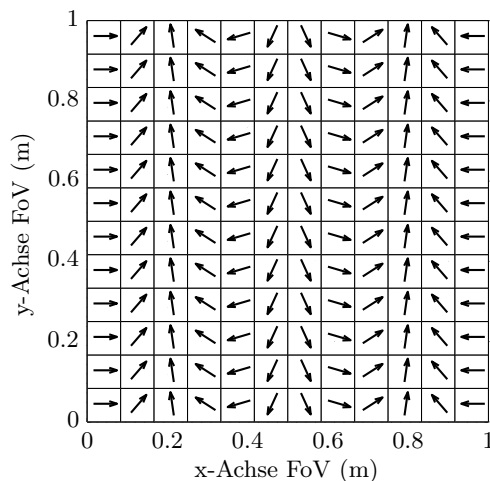
Phasenkodierung 1



Phasenkodierung 2

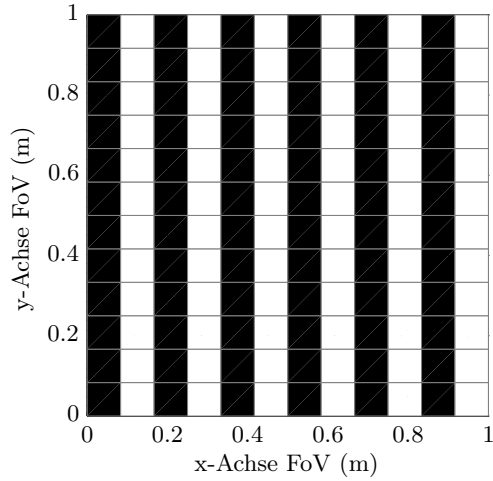


Phasenkodierung 3

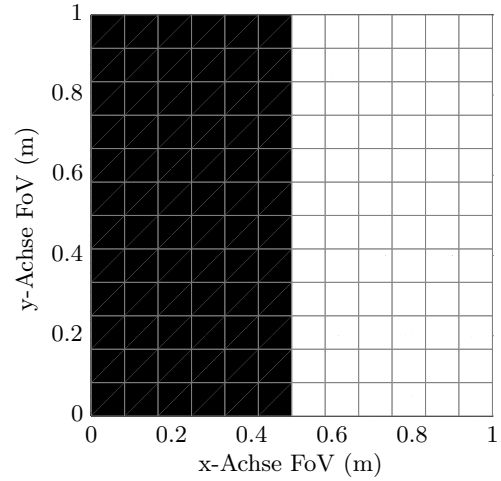


- (b) Im Folgenden sind drei Magnetisierungsmuster dargestellt, wobei weiß für hohe Intensität steht. Ordnen Sie zu, welches Muster bei welcher Phasenkodierung zu einem besonders hohen Signal führt. Geben Sie eine kurze Erklärung für Ihre Wahl. (3 Punkte)

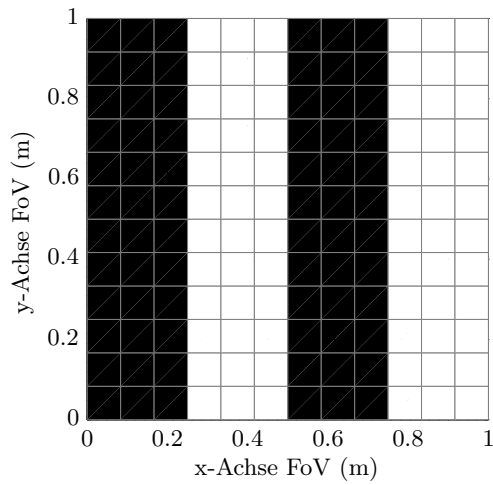
Muster 1



Muster 2



Muster 3



Lösung:

- (a) Je länger der Gradient eingeschaltet bleibt desto größer wird die Phasenverschiebung zwischen nebeneinander liegenden Voxeln. Daher folgt:

$T_{x,1}$ = Phasenkodierung 2

$T_{x,2}$ = Phasenkodierung 3

$T_{x,3}$ = Phasenkodierung 1

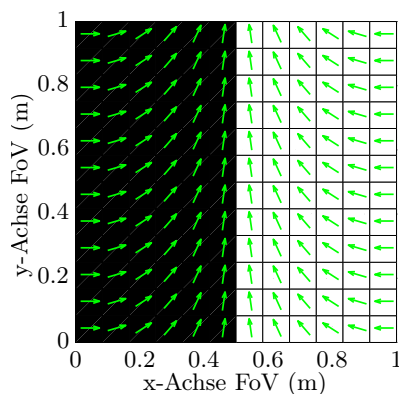
- (b) Das Signal einer Messung ist die vektorielle Summe der Intensitäten aller Voxel. Daher ist das Signal immer dann groß wenn die Spins in einem Bereich hoher Intensität gleich ausgerichtet sind. Somit ergibt sich die folgende Zuordnung.

Muster 1: hohes Signal bei Phasenkodierung 2

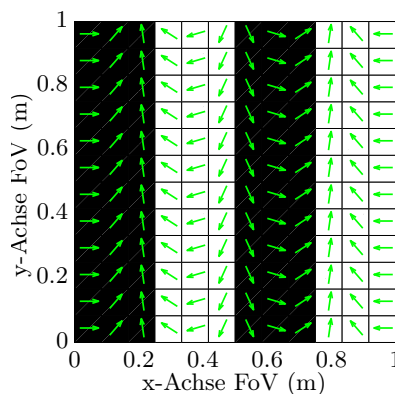
Muster 2: hohes Signal bei Phasenkodierung 1

Muster 3: hohes Signal bei Phasenkodierung 3

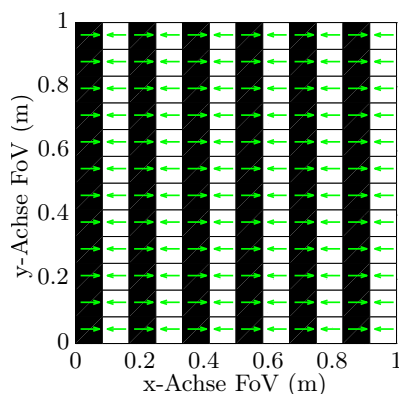
Muster 2 mit Phasenkodierung 1



Muster 3 mit Phasenkodierung 3



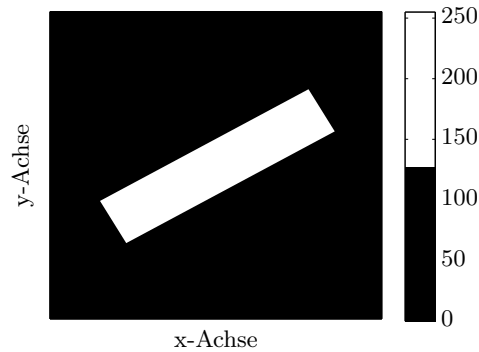
Muster 1 mit Phasenkodierung 2

**Frage 11**

(6 Punkte)

- (a) Wie lautet der mathematische Zusammenhang zwischen dem Messsignal $S(k_x, k_y)$ im k-Raum und der Quermagnetisierung $M'_{T_0}(x, y)$? Benennen Sie den Zusammenhang und geben Sie die entsprechende Formel an. (2 Punkte)
- (b) In der folgenden Abbildung ist die Quermagnetisierung $M'_{T_0}(x, y)$ eines Objekts dargestellt. Die Hauptachse des Rechtecks ist gegenüber der x-Achse um 30° verkippt. Markieren Sie diejenigen Bereiche im k-Raum, in denen (2 Punkte)

bei der Aufnahme dieses Objekts durch ein MRT-System hohe Signalintensität zu erwarten ist. (Kennzeichnen Sie die k_x - und die k_y -Achse! Ein Maßstab an den Achsen ist nicht gefordert.)



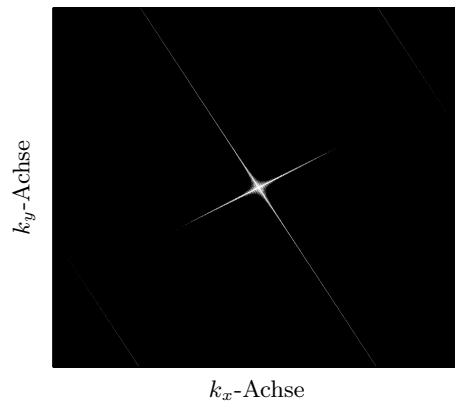
- (c) Geben Sie den Amplitudenverlauf des Messsignales $|S(k_x, k_y)|$ (Betrag) entlang der 1. Hauptachse des Objektes im k-Raum im Eindimensionalen an, indem Sie die Amplitude über dem Weg auftragen. (2 Punkte)

Lösung:

- (a) Das Messsignal im k-Raum ist die zweidimensionale Fouriertransformierte der Quermagnetisierung.

$$S(k_x, k_y) = \int \int M'_{T_0}(x, y) \cdot \exp(-jk_x x - jk_y y) dx dy \quad (6)$$

- (b) Die 2D-Fouriertransformation des dargestellten Objekts ist im Folgenden dargestellt. (Als Lösung ist die Darstellung der beiden Hauptachsen ausreichend).



- (c) Der Verlauf entlang der 1. Hauptachse entspricht dem Betrag der Fouriertransformierten einer Rechteckfunktion, was dem Betrag einer $\text{Si}(x)$ -Funktion entspricht.

