

Vorlesung: Bildgebende Verfahren in der Medizin II

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

Klausur

09. September 2015
Beginn: 08:00 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. Bei Formeln müssen die verwendeten Größen angegeben werden, bei Diagrammen müssen die Achsen beschriftet werden.

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:	9	8	4	10	6	4	7	4	13	11	6	82
erreicht:												

Note:_____

Ultraschall

Frage 1

(9 Punkte)

(a) Was versteht man unter:

(3 Punkte)

- A-Mode?
- B-Mode?
- M-Mode?

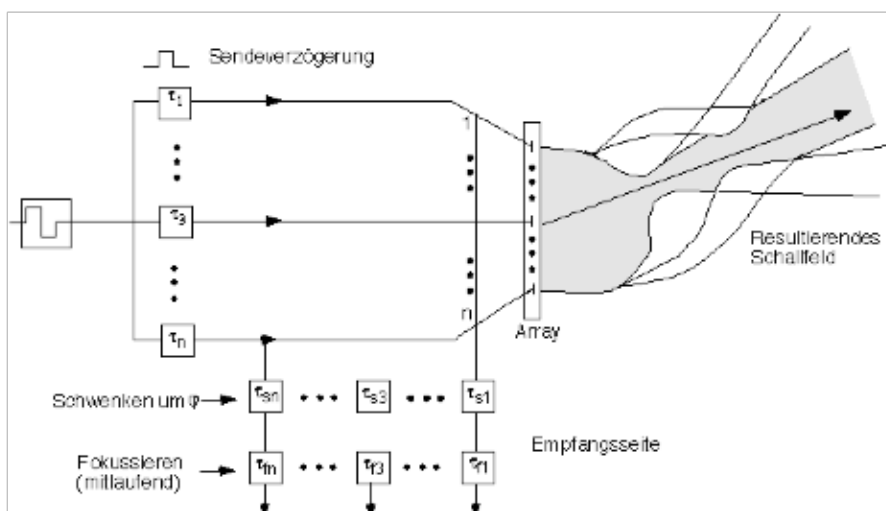
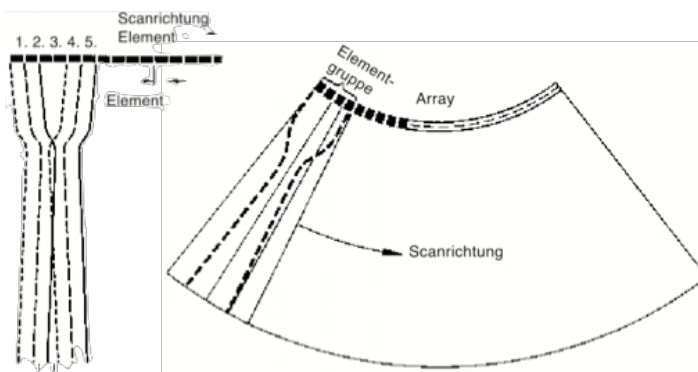
Gehen Sie in Stichworten auf die Dimensionalität der Abbildung ein und geben eine kurze Erläuterung.

(b) Welche Sende- und Empfangssysteme für den B-Mode gibt es? Stellen Sie 3 Varianten jeweils mit Skizze und kurzer Erklärung vor. (6 Punkte)

Lösung:

- (a)
- A-Mode (**A**mplituden**m**odulation) bezeichnet 1D-Ultraschallmessungen; Abbildung der reflektierten US-Intensität entlang eines einzelnen Strahl in den Körper hinein.
 - B-Mode (**B**rightness**m**odulation) bezeichnet 2D-Ultraschallmessungen; Signalintensitäten werden in Grauwerte umgewandelt.
 - M-Mode (**M**otion**m**odulation) bezeichnet zeitabhängige 1D-Ultraschallmessungen; Darstellung bewegter Organe durch Auftragen der Signale über der Zeit.

- (b)
- Linear array
 - Curved array
 - Phased array



Bei den Linear- und Curved-Arrays sind viele kleine US-Wandler in einem Array angeordnet. Wandler werden gruppenweise aktiviert. Zum Scannen wird dann die ganze Gruppe Element für Element weitergeschoben. Mit einer gekrümmten Anordnung von US-Wandlern (curved Arrays) kann ein Bildausschnitt in Form eines Kreissegments dargestellt werden.

Beim Phased-Array kann jedes Wandlerelement eines Arrays sowohl beim Senden als auch beim Empfangen mit einer individuellen Verzögerung angesteuert werden.

Frage 2**(8 Punkte)**

- (a) Wovon hängt die theoretische Grenze der axialen Auflösung bei der Ultraschall Diagnostik ab (Begründung)? (2 Punkte)
- (b) Welche axiale Auflösung im Muskelgewebe kann mit einer US-Frequenz von 2 MHz theoretisch erreicht werden? (Schallgeschwindigkeit in Muskel 1568 m/s) (1 Punkt)
- (c) Warum wird die theoretische Auflösung aus b) in der Praxis nicht erreicht und wo liegt die erreichte Auflösung typischerweise? (2 Punkte)
- (d) In welchem Bereich ist die laterale Auflösung am größten? (2 Punkte)
- (e) Wie groß ist der Bereich der größten lateralen Auflösung für den Fall aus b) wenn der Durchmesser des US-Wandlers 5 mm beträgt? (1 Punkt)
- Hinweis: $N = D^2/4\lambda$*

Lösung:

- (a) Die axiale Auflösung ist in erster Näherung proportional zur US-Wellenlänge. Echos von zwei Grenzflächen sind dann unterscheidbar wenn deren Abstand größer als die halbe Wellenlänge ist. Hinzu kommt die Bandbreite des Sende- und Empfangssystems (siehe Aufgabenteil c)).

- (b) Mit

$$\lambda = \frac{c_{\text{Muskel}}}{f}$$

und

$$d = \frac{\lambda}{2}$$

ergibt sich eine theoretische Grenze von

$$d = \frac{c_{\text{Muskel}}}{2 \cdot f} = \frac{1568\text{ m/s}}{2 \cdot 2e6\text{ Hz}} \approx 0.39\text{ mm}$$

- (c) Die Wellenpakete werden durch die endliche Bandbreite des Senders und die Dispersion verschmiert. Typische erreichbare axiale Auflösungen liegen in Muskelgewebe bei etwa 0.8 mm .
- (d) Die laterale Auflösung ist im Fokusbereich am größten und nimmt im Nah- und Fernbereich ab. Der Fokusbereich liegt zwischen $x/N = 1$ und $x/N = 2$ mit $N = D^2/4\lambda$.
- (e) Für die angegebenen Werte ergibt sich ein Fokusbereich von

$$x_{\min} = \frac{D^2}{4 \cdot \lambda} = \frac{D^2 \cdot f}{4 \cdot c_{\text{Muskel}}} = \frac{(5\text{ mm})^2 \cdot 2e6\text{ Hz}}{4 \cdot 1568\text{ m/s}} \approx 8\text{ mm}$$

$$x_{\max} = 2 \cdot x_{\min} \approx 16\text{ mm}$$

Frage 3**(4 Punkte)**

Bei der Anwendung der US-Scanner müssen auch Sicherheitsaspekte berücksichtigt werden. Auf welche zwei Arten können die US-Wellen den Körper schädigen? Beschreiben Sie kurz die jeweilige Wirkung.

Lösung: US-Wellen können den Körper auf zwei Arten schädigen:

- durch Wärmeentwicklung
- durch Kavitation

Wärme entsteht lokal proportional zur absorbierten Schallintensität, wird aber durch Blutströmung und Wärmeleitung abgeführt.

Kavitation wird ein Effekt genannt, bei dem in der Unterdruckphase einer Schallwelle im Gewebe Gasbläschen entstehen, die dann in der Druckphase kollabieren. Hierbei können Zellen zerstört werden.

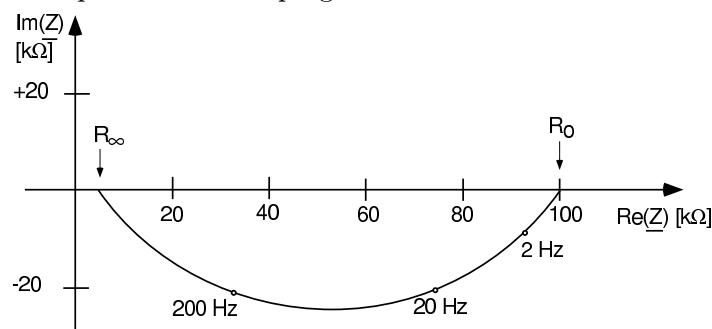
Impedanztomographie

Frage 4**(10 Punkte)**

- (a) Skizzieren Sie eine typische Ortskurve der Impedanz von Körpergewebe und erklären Sie deren Verlauf mit Hilfe eines einfachen Ersatzschaltbilds. (4 Punkte)
- (b) Bei der Impedanz-Tomographie wird die Bildrekonstruktion mit der gefilterten Rückprojektion verwendet. Beschreiben Sie das Verfahren (Erklärung und Skizze mit Elektrodenanordnung und Äquipotentiallinien). (6 Punkte)

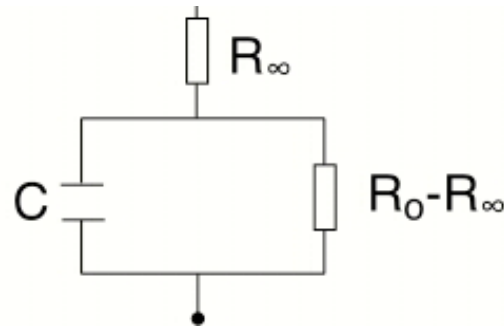
Lösung:

(a) Ortskurve der Impedanz von Körpergewebe



Körpergewebe besteht aus vielen Zellen, die in einen Extrazellulärraum eingebettet sind. Zellmembranen verhalten sich elektrisch hauptsächlich wie ein Kondensator, daher hat die Impedanz neben dem ohmschen Anteil einen negativen Imaginärteil.

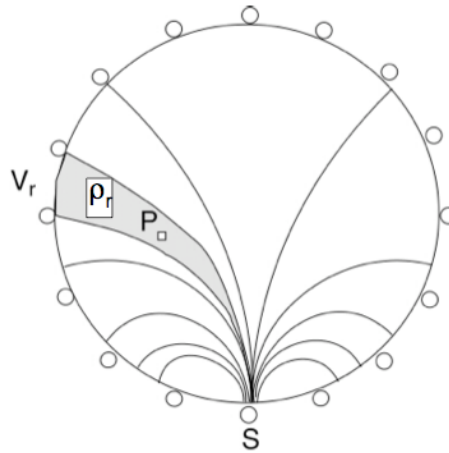
Bei der Frequenz $= 0 \text{ Hz}$ (DC) verhält sich die Gewebekapazität wie eine offene Leitung weswegen der Imaginärteil zu 0 wird. Die Impedanz wird durch den Widerstand R_∞ und den Gleichstromwiderstand $R_0 - R_\infty$ bestimmt. Für Frequenzen gegen ∞ verhält sich die Gewebekapazität wie ein Kurzschluss weswegen der Imaginärteil ebenso zu 0 wird. Die Impedanz wird nur durch den Widerstand R_∞ bestimmt.



- (b) Im ersten Schritt wird die relative Abweichung der gemessenen Spannungen V_m von den Spannungen eines homogenen leitfähigen Zylinders V_H bestimmt:

$$V_r = \frac{V_m - V_H}{V_H} = \frac{\rho_m - \rho_H}{\rho_H} = \rho_r$$

Hierbei wird angenommen, dass das gesamte Gebiet, das zwischen den Äquipotentiallinien liegt, die durch die beiden Messelektroden gehen, eine Leitfähigkeitsänderung ρ_r aufweist.



Der Bereich zwischen den Äquipotentiallinien wird als eine Projektion aufgefasst (grauer Bereich in der Skizze). Bei der Verarbeitung wird somit jede Projektion ρ_r in das Bild zurückgeschrieben. Das endgültige Bild entsteht durch Aufaddieren der Einträge innerhalb der Pixel.

Gefilterte Rückprojektion bedeutet, dass das Bild nachträglich gefiltert wird, um Details hervorzuheben und a priori bekannte Artefakte des Rekonstruktionsalgorithmus zu entfernen.

Diffuse optische Tomographie

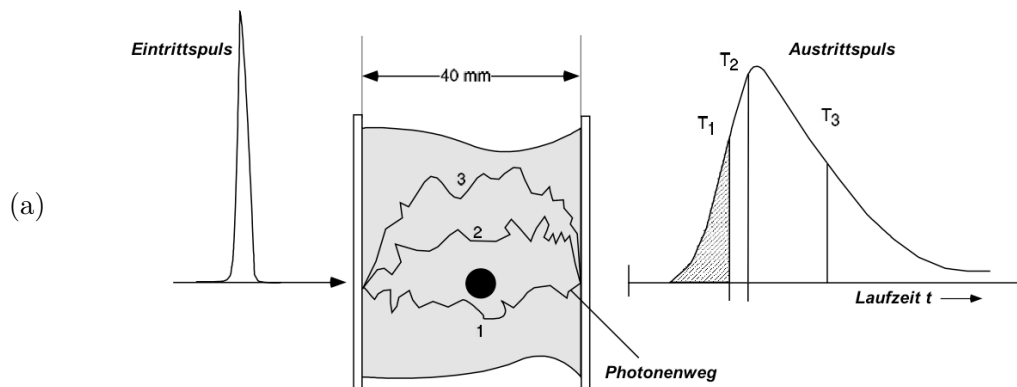
Frage 5

(6 Punkte)

Ein Lichtblitz (δ -Puls) wird auf eine Scheibe aus Körpergewebe gegeben.

- (a) Skizzieren Sie den zeitlichen Verlauf der Lichtintensität des transmittierten Lichtes. (2 Punkte)
- (b) Wie hängt der Verlauf vom Streu- bzw. Absorptionskoeffizienten ab (Begründung)? (2 Punkte)
- (c) Wie kann man das Bild schärfer machen? In welcher Größenordnung liegen die Zeitfenster? (2 Punkte)

Lösung:



- (b)
- Weniger Streuung: Die Kurve wird schmaler, da das Licht eine kürzere Strecke zurücklegt.
 - Weniger Absorption: Die Kurve wird breiter. Es kommt über die Zeit mehr Licht im Detektor an.
- (c) Die Abbildung kann schärfer gemacht werden, wenn nur die ersten ankommenden Photonen zur Auswertung benutzt werden (Zeitfenster Größenordnung 100 ps).

Optische Kohärenztomographie

Frage 6

(4 Punkte)

- (a) Was beschreibt die Kohärenzlänge? Wie ist sie definiert? Geben sie die Gleichung an, hierbei dürfen konstante Faktoren ignoriert werden. (2 Punkte)
- (b) Sind bei der optischen Kohärenztomographie (OCT) eher kurze oder eher lange Kohärenzlängen erstrebenswert? Warum? (1 Punkt)
- (c) In welchem Bereich liegen übliche Kohärenzlängen bei der OCT? (1 Punkt)

Lösung:

- (a) Die Kohärenzlänge l_c ist die maximale Weglänge bzw. der maximale Laufzeitunterschied, den zwei Lichtstrahlen aus der gleichen Quelle haben dürfen, damit bei ihnen noch Interferenzphänomene beobachtet werden.

$$l_c = \frac{4 \cdot \ln 2}{\pi} \cdot \frac{\lambda_0^2}{\Delta \lambda}$$

mit:

- λ_0 : zentrale Wellenlänge
 - $\Delta\lambda$ = Bandbreite der Lichtquelle
- (b) Bei der OCT ist eine kurze Kohärenzlänge aufgrund der damit verbundenen größeren Bandbreite erstrebenswert.
- (c) Übliche Kohärenzlängen bewegen sich im Bereich einiger μm . (Femtosekunden-Ti:Al₂O₃-Laser: 15 μm)

Thermographie

Frage 7

(7 Punkte)

- (a) Was besagt das Planck'sche Strahlungsgesetz? (2 Punkte)
- (b) Welche Probleme hat die thermographische Bildgebung bei medizinischen Anwendungen? (3 Punkte)
- (c) Welche 4 wesentlichen Gewebe- und Bluteigenschaften beeinflussen die Diffusionsgleichung für den Wärmetransport? (2 Punkte)

Lösung:

- (a) Das Planck'sche Strahlungsgesetz beschreibt die Abhängigkeit der spektralen Strahlungsdichte des schwarzen Körpers von der Temperatur und der Wellenlänge.
- (b)
- Wegen der Temperaturregelung des Körpers sind die Temperaturunterschiede relativ gering.
 - Die Temperaturerhöhung fällt mit dem Abstand vom betroffenen Organ schnell ab. Durch Messung der Hauttemperatur werden nur oberflächliche Organe erfasst.
 - Äußere Luftströmungen beeinflussen die Temperaturverteilung auf der Oberfläche relativ stark.
- (c)
- Wärmekapazität des Gewebes
 - Wärmekapazität des Blutes
 - Wärmeleitfähigkeit des Gewebes
 - Blutflussgeschwindigkeit
 - Quellterm für Metabolismus

Abbildung bioelektrischer Ströme

Frage 8**(4 Punkte)**

- (a) Wie lautet die Matrixgleichung zur Beschreibung des Vorwärtsproblems bei der Abbildung bioelektrischer Ströme? (2 Punkte)
- (b) Welches Problem stellt sich beim inversen Problem? (2 Punkte)

Lösung:

(a)

$$\vec{v} = \mathbf{A} \cdot \vec{p} \quad (1)$$

Mit

- $\vec{v}$: Vektor der gemessenen Potentiale bzw. Magnetfelder
 - $\mathbf{A}$: Lead-Field-Matrix: diese Matrix gibt an, welches Messsignal $\vec{v}$ zum Stromdipol $\vec{p}$ gehört
 - $\vec{p}$: Vektor der Stromdipole im Körper (x -, y - und z -Komponenten)
- (b) Beim inversen Problem muss die Matrix $\mathbf{A}$ invertiert werden, jedoch ist das Problem schlecht gestellt, d.h. kleine Änderungen im Messsignal können zu großen Abweichungen in der Lösung führen.

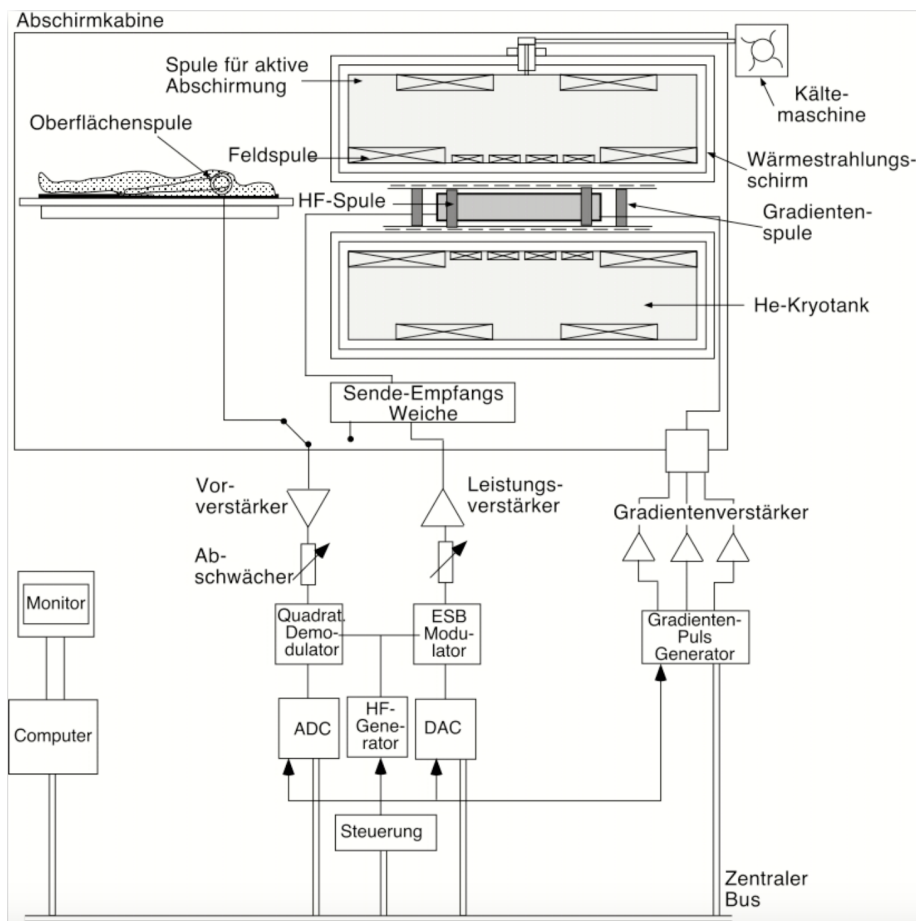
Magnetresonanztomographie

Frage 9**(13 Punkte)**

- (a) Skizzieren Sie ein MRT-System. Dabei sollten mindestens 8 wichtige Komponenten abgebildet und bezeichnet sein. (8 Punkte)
- (b) Im Inneren des Systems befinden sich zwei Spulensysteme. Wie heißen sie und welche Aufgaben übernehmen die beiden Spulensysteme? (2 Punkte)
- (c) Skizzieren Sie jeweils einen typischen Aufbau der Spulen aus Aufgabenteil b). Kennzeichnen Sie auch die Stromrichtung. (3 Punkte)

Lösung:

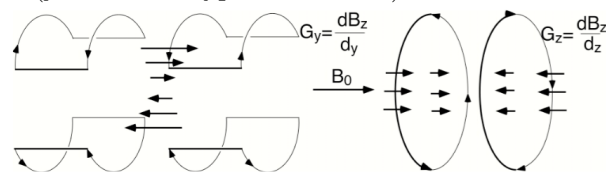
(a)



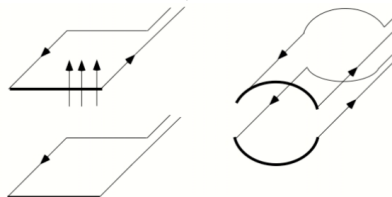
(b) Gradientenspule: dreidimensionale Ortskodierung

HF-Spule: Signalanregung und -auslesung

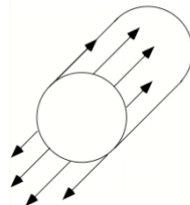
(c) Gradientenspulen (jeweils ein Typ ausreichend):



HF-Spulen (jeweils ein Typ ausreichend):



Bridgeway-Spule:



Frage 10**(11 Punkte)**

MRT Aufnahmen mit einer „Inversion-Recovery“ Sequenz.

- (a) Wie lange muss ein Transversalfeld der Amplitude $20 \mu T$ eingeschaltet werden, um die Spins von M_{z0} auf $-M_{z0}$ umzuklappen? (Hinweis: $\gamma^* = 42.6 \text{ MHz/T}$) (2 Punkte)
- (b) Mit welchen Gleichungen lassen sich die Längs- und Querrelaxation beschreiben? (2 Punkte)
- (c) Tragen Sie den zum Aufgabenteil a) gehörenden HF-Puls, sowie den Verlauf der Längs- und Quermagnetisierung in ein Schaubild ein. (3 Punkte)
- (d) Vervollständigen Sie im gleichen Schaubild die Pulssequenz einschließlich der entsprechenden Magnetisierungen zu einer „Inversion-Recovery“ Sequenz. (3 Punkte)
- (e) Welche Größe kann man damit bestimmen? (1 Punkt)

Lösung:

- (a) Umklappen der Spins von
- M_{z0}
- auf
- $-M_{z0}$
- .
- 180°
- Impuls:

$$\alpha = \gamma \cdot B_T \cdot t$$

$$t = \frac{\alpha}{\gamma \cdot B_T} = \frac{\alpha}{2\pi\gamma^* \cdot B_T} = \frac{\pi}{2\pi \cdot 42.6 \text{ MHz/T} \cdot 20 \mu T} = 0.58 \text{ ms}$$

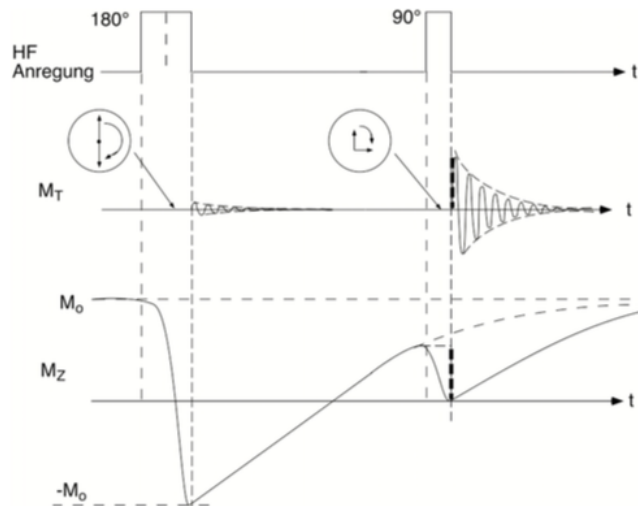
- (b) Blochgleichung für Längsrelaxation nach
- 180°
- Impuls:

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

Blochgleichung für Querrelaxation:

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

- (c) Zeichnung für Aufgabe c) und d)

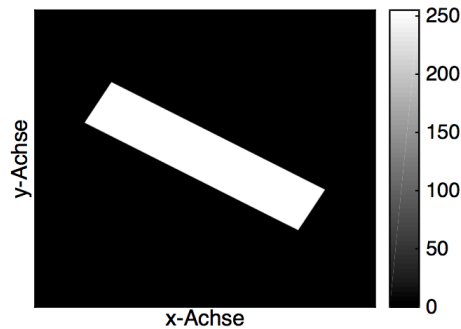


- (d) siehe Aufgabenteil c)

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

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 Objektes dargestellt. Die Hauptachse des Rechtecks ist gegenüber der x-Achse um 150° verkippt. Markieren Sie diejenigen Bereiche im k-Raum, in denen bei der Aufnahme dieses Objektes 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.) (2 Punkte)



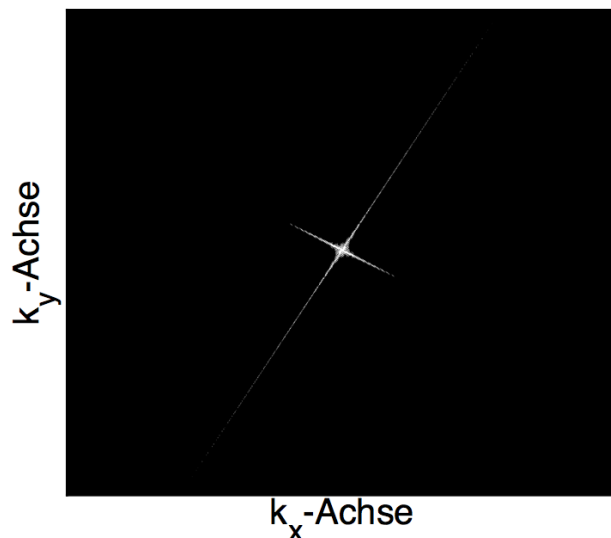
- (c) Geben Sie den Amplitudenverlauf des Messsignals $S(k_x, k_y)$ (Betrag) entlang der 1. Hauptachse des Objektes im k-Raum im Eindimensionalen an, indem Sie die Amplitude über dem Weg im k-Raum auftragen. (2 Punkte)

Lösung:

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

$$S(k_x, k_y) = \iint M'_{T_0}(x, y) \cdot e^{-jk_x x - jk_y y} dx dy$$

- (b) Die 2D-Fouriertransformierte des dargestellten Objektes 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 $\frac{\sin(x)}{x}$ -Funktion (Si(x)-Funktion) entspricht.

