

Vorlesung: Bildgebende Verfahren in der Medizin I

Leiter: Prof. Dr. rer. nat. Olaf Dössel
2. Prüfer: Giorgio Luongo, M.Sc.

Klausur

13. März 2020
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:	11	12	11	3	12	6	8	6	9	8	7	93
erreicht:												

Note:_____

Röntgentechnik

Frage 1 (11 Punkte)

Von Ihnen wird verlangt, eine Röntgenquelle für medizinisch-diagnostische Zwecke zu entwerfen.

- (a) Welche Anforderungen werden an die Röntgenquellen gestellt und warum? (5 Punkte)
- (b) Welche Typen von Röntgenröhren kennen Sie? Welcher Typ wird in der medizinischen Diagnostik bevorzugt und warum? (4 Punkte)
- (c) Welche Kriterien sind für ein gutes Anodenmaterial wichtig? Geben Sie ein Qualitätsmaß an. (2 Punkte)

Lösung:

- (a) • **Hohe Leistung:** Mit hoher Leistung können die Belichtungszeiten kurz gehalten werden, denn Aufnahmen mit kürzeren Belichtungszeiten sind weniger verwackelt. Dazu ermöglichen sie die Aufnahme von bewegten Organen (Herz).
- **Kleiner Fokus.** Ein kleiner Fokus reduziert die Halbschatten-Effekte und ermöglicht ein schärferes Bild.
- **Einstellbare Quantenenergie.** Da der Kontrast zwischen verschiedenen Gewebearten nur in bestimmten Energiebereichen optimal ist, muss die Quantenenergie einstellbar sein.
- **Kostengünstige Herstellung.**
- **Wenig Wartung und lange Lebensdauer.**

- (b) Typen: Drehanode, Festanode.

Die Drehanode. Bei ihr wird die Hitze über den gesamten Ring verteilt. Sie kann daher mit höherer Leistung betrieben werden wie die Festanodenröntgenröhre. Der Einsatz einer Festanode ist nur vorteilhaft, wenn über lange Zeit niedrige Röntgenleistungen gefordert sind. In der medizinischen Diagnostik sind aber hohe Leistungen mit kurzen Zeitintervallen gefragt.

- (c)
$$\text{Qualitätsmaß}_D = Z \cdot T_{max} \cdot \sqrt{\lambda \rho c} \quad (1)$$

Auch akzeptiert wird:

$$\text{Qualitätsmaß}_D = Z \cdot T_{max} \cdot \lambda \quad (2)$$

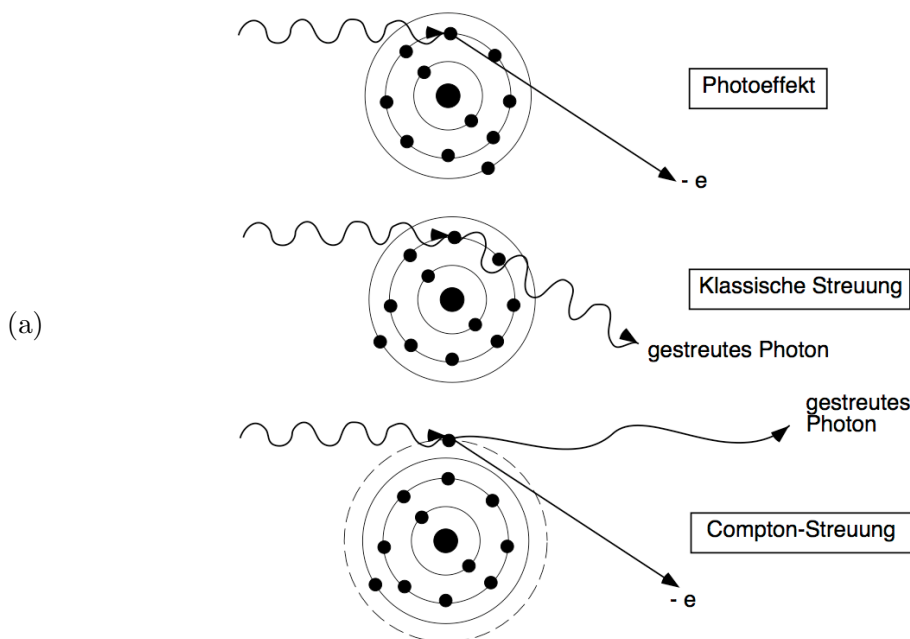
Mit:

- Z : Ordnungszahl
- T_{max} : maximal zulässige Temperatur
- λ : Wärmeleitfähigkeit
- ρ : Dichte
- c : spezifische Wärmekapazität

Frage 2**(12 Punkte)**

Die Schwächung von Röntgenstrahlung im Körper wird von unterschiedlichen Wechselwirkungsprozessen verursacht.

- (a) Welche drei Wechselwirkungsprozesse tragen im Energiebereich der diagnostischen Röntgenstrahlung zur Bildgebung bei? Nennen und skizzieren Sie diese Wechselwirkungen. (6 Punkte)
- (b) Welcher Parameter beschreibt die Wahrscheinlichkeit der Wechselwirkung mit einem Atom? Wie ist der Parameter definiert? Geben Sie die Formel an und nennen Sie die Einheit dieses Parameters. (2 Punkte)
- (c) Von welchen 4 Größen hängt die Schwächung von Röntgenstrahlen in Materie im Wesentlichen ab? Wie ändert sich die Schwächung mit der Zunahme der jeweiligen Größe? (4 Punkte)

Lösung:

- (b) Die Wahrscheinlichkeit der Wechselwirkung (WW) wird durch den Wirkungsquerschnitt beschrieben:

$$\sigma_{ww} = \frac{\mu_{ww}}{n_{ww}}$$

mit:

- σ_{ww} = Wirkungsquerschnitt der WW
- μ_{ww} = Schwächungskoeffizient der WW
- n_{ww} = Teilchendichte der Teilchen, mit denen die WW stattfindet

Der Wirkungsquerschnitt hat die Einheit einer Fläche, also m^2 oder mm^2 .

- (c)
- **Wellenlänge:** die Schwächung steigt mit der Wellenlänge
 - **Ordnungszahl:** die Schwächung steigt mit der Ordnungszahl des durchstrahlten Stoffs
 - **Dichte:** die Schwächung steigt mit der Dichte des durchstrahlten Stoffs
 - **Dicke:** die Schwächung steigt mit der Dicke des durchstrahlten Stoffs

Frage 3**(11 Punkte)**

Röntgenfilm und Röntgendetektor:

(a) Erläutern Sie:

(7 Punkte)

- die Vorteile einer Verstärkerfolie gegenüber einem einfachen Röntgenfilm,
- die Qualitätskriterien,
- den Verstärkungsfaktor einer Verstärkerfolie.

(b) Skizzieren Sie ein Pixel eines flachen Röntgendetektors mit “direct conversion” und mit “indirect conversion”. (4 Punkte)

Lösung:

(a) Die Vorteile von Verstärkerfolien gegenüber dem einfachen Röntgenfilm sind:

- Die Lumineszenzschicht kann einen größeren Röntgen-Schwächungskoeffizienten haben als die Emulsionsschicht, denn sie kann Elemente mit höherer Ordnungszahl Z enthalten und eine größere Dichte ρ haben.
- Die Lumineszenzschicht kann dicker sein als die Emulsionsschicht, da sie nicht entwickelt und fixiert werden muss.
- Die Lumineszenzschicht kann aus einem Röntgenquant sehr viele sichtbare Photonen erzeugen.

Die Qualitätskriterien für Verstärkerfolien sind somit:

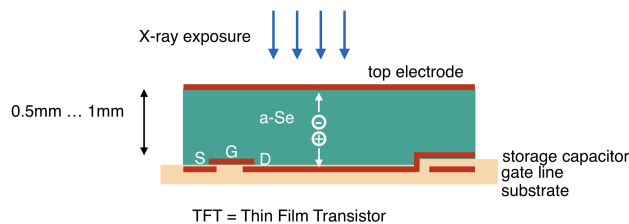
- eine hohe Röntgenabsorption,
- eine hohe Quantenausbeute,
- eine gute Anpassung des Leuchtspektrums an die Filmempfindlichkeit.

Der Verstärkungsfaktor V einer Folie ist hierfür ein Maß:

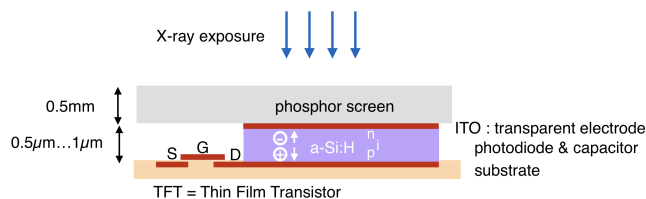
$$V = \frac{\text{Dosis ohne Verstärkerfolie}}{\text{Dosis mit Verstärkerfolie}}$$

Typische Werte für den Verstärkungsfaktor V liegen bei 10–20.

(b) Direct conversion - Single pixel:



Indirect conversion - Single pixel:



Bildverarbeitung

Frage 4

(3 Punkte)

Will man zum Beispiel ein Organ dreidimensional darstellen, so muss das umliegende Gewebe klar von dem Organ von Interesse getrennt werden können. Dafür müssen die Bilder segmentiert werden.

- (a) Ein wichtiger Algorithmus in der Segmentierung ist das "Region-growing"-Verfahren. (2 Punkte)
Erläutern Sie dieses.

Lösung: Es wird (z.B. per Hand) ein Pixel in einem zu segmentierenden Gebiet gesetzt. Von diesem beginnend werden die Nachbarn des Pixeles geprüft und sofern sie ein vorher definiertes Kriterium (z.B. das überschreiten eines Schwellwertes) erfüllen, zur Region hinzugefügt. Alle Nachbarn der hinzugefügten Pixel werden in eine "To-Do" Liste geschrieben. Das oben erklärte Vorgehen wird auf alle Pixel in der „To-Do Liste“ angewendet.

- (b) Wozu können durch Rauschen oder Artefakte verursachte Grauwert-Fehler bei diesem Verfahren führen? (1 Punkt)

Lösung: Solche Grauwert-Fehler können vor allem in der Nähe des Randes zum Auslaufen führen, womit das Überschreiten des gesuchten Gebiets und das Einlaufen in ein benachbartes Gebiet gemeint ist.

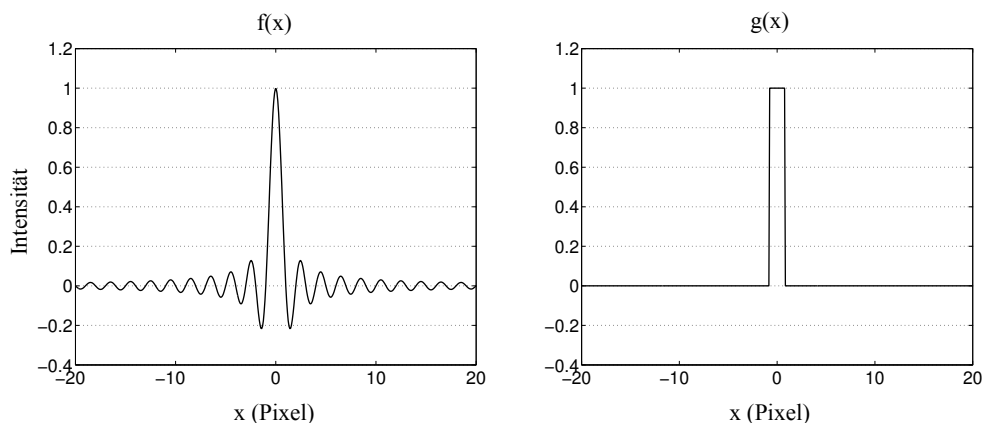
Systemtheorie

Frage 5

(12 Punkte)

- (a) Im Folgenden sind zwei Funktionen $f(x)$ und $g(x)$ dargestellt. Skizzieren Sie das Betragsspektrum der Fouriertransformierten der Faltung der beiden Funktionen qualitativ (siehe untenstehende Formel). Skizzieren Sie ebenso eventuelle Zwischenschritte. (4 Punkte)

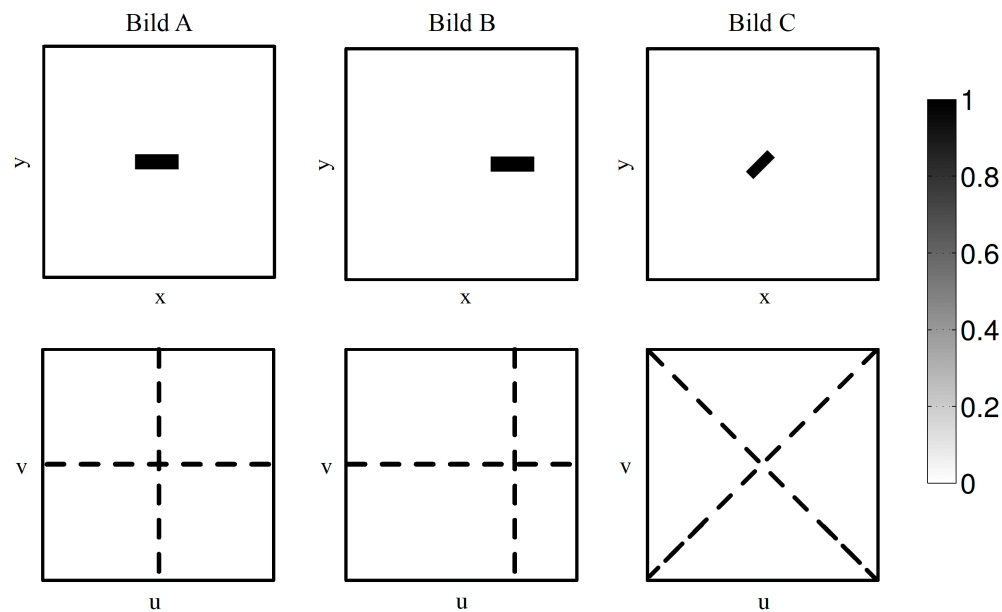
$$|\mathcal{F}\{f(x) * g(x)\}|$$



- (b) Welche Frequenzauflösung (Δu) lässt sich mit einer diskreten Fouriertransformation, die 512 Punkte umfasst, erzielen wenn der Ortsraum mit einer Auflösung von 0,5 mm abgetastet wird? (2 Punkte)
- (c) Im Folgenden sind 3 Bilder dargestellt, die alle das gleiche Objekt in unterschiedlichen Positionen zeigen. Skizzieren Sie die Betragsspektren der 2D Fouriertransformierten dieser Bilder qualitativ. Skizzieren Sie außerdem die Betragsspektren der (6 Punkte)

1D-Fouriertransformierten entlang der mit unterbrochenen Linien darunter dargestellten Hauptachsen des Objekts qualitativ.

In den Bildern A, B und C treten nur die Werte 0 und 1 auf.

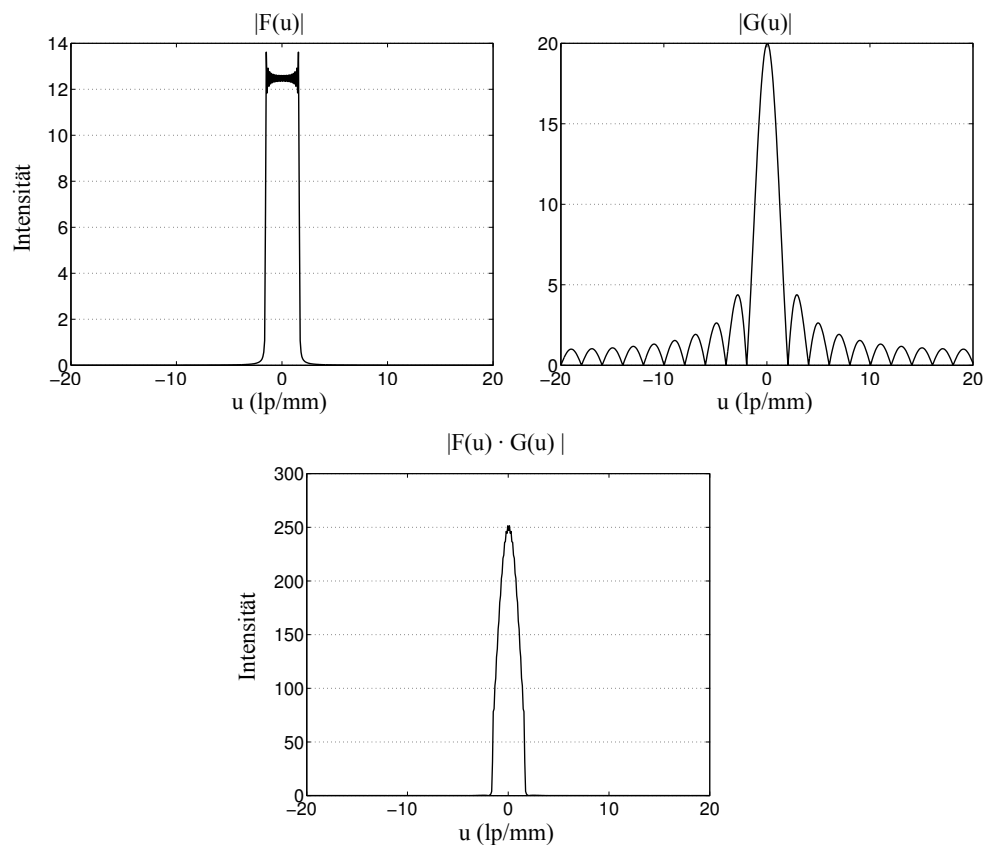


Lösung:

- (a) Nach dem Faltungstheorem ergibt sich die Fouriertransformierte der Faltung von $f(x)$ und $g(x)$ als Produkt der Fouriertransformierten von $f(x)$ und $g(x)$:

$$|\mathfrak{F}\{f(x) * g(x)\}| = |\mathfrak{F}\{f(x)\} \cdot \mathfrak{F}\{g(x)\}|$$

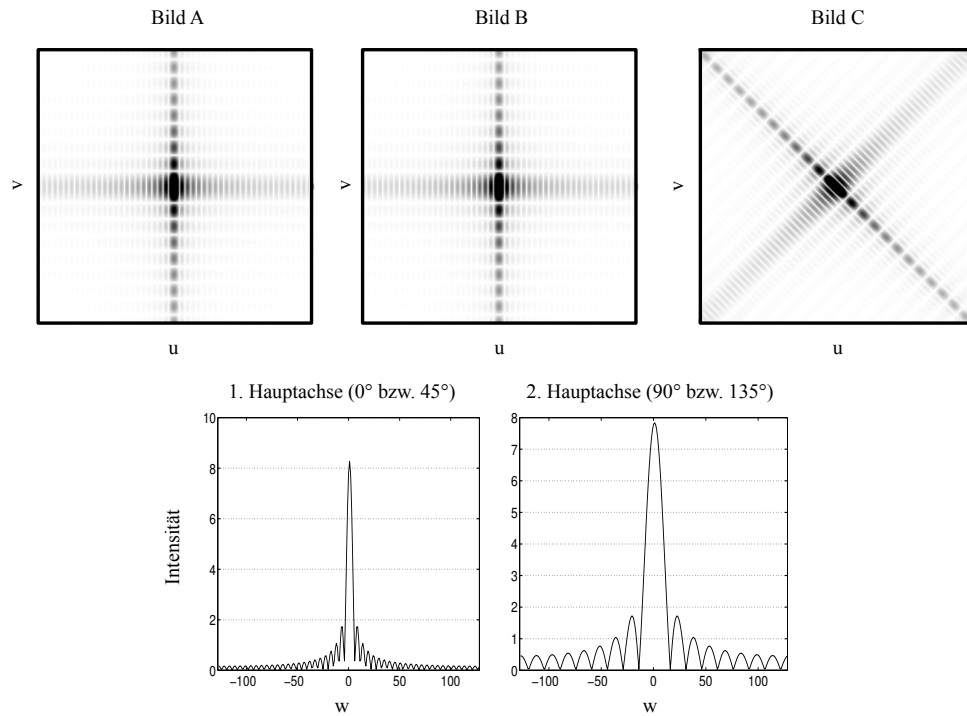
Die gesuchte Funktion ergibt sich damit wie folgt:



(b) Die Frequenzauflösung ergibt sich wie folgt:

$$\Delta u = \frac{1 lp}{N \cdot \Delta s} = \frac{1 lp}{512 \cdot 0,5 mm} = \frac{1}{256} lp/mm$$

(c) Die Betragsspektren von Bild A und B unterscheiden sich nicht. Nur die Phase hat sich geändert, dies ist aber im Betragsspektrum nicht sichtbar. Das Spektrum von Bild C ist um 45° rotiert. Die Betragsspektren der 1D Fouriertransformierten entlang der Hauptachsen unterscheiden sich nicht.



Dosimetrie

Frage 6

(6 Punkte)

- (a) Welche Energiedosis und welche Äquivalentdosis bekommt ein Mensch ab, der sich 0,5 m vor einer Röntgenröhre (2 mm Al) befindet, die mit 80 kV und 20 mA betrieben wird (Belichtungszeit 0,3 s)? (3 Punkte)

Berücksichtigen Sie bei der Lösung die folgenden Abbildungen.

Abbildung 5/1:

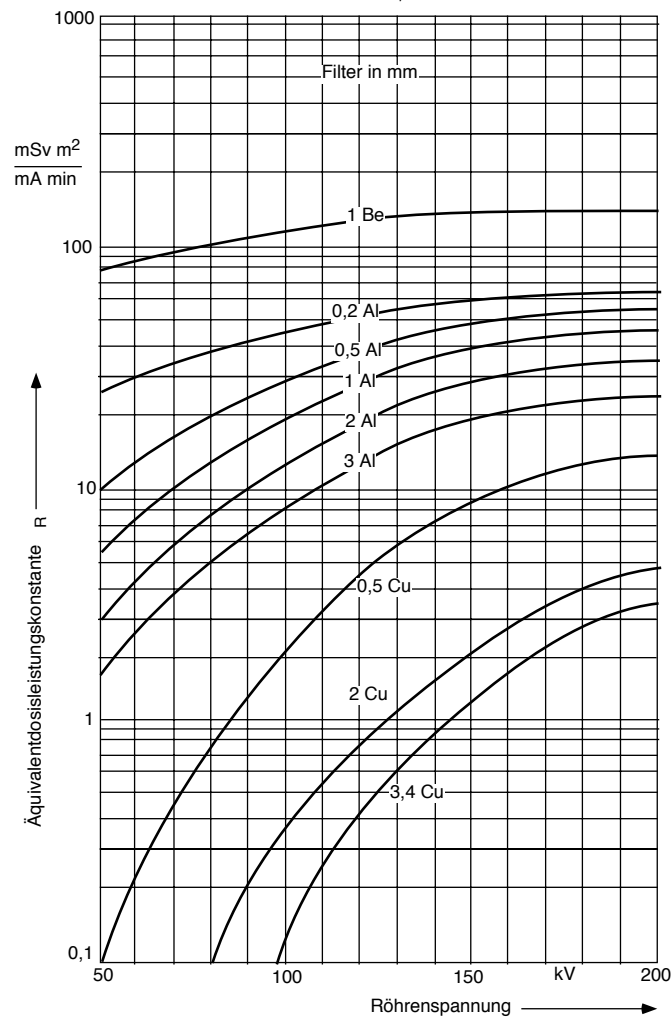
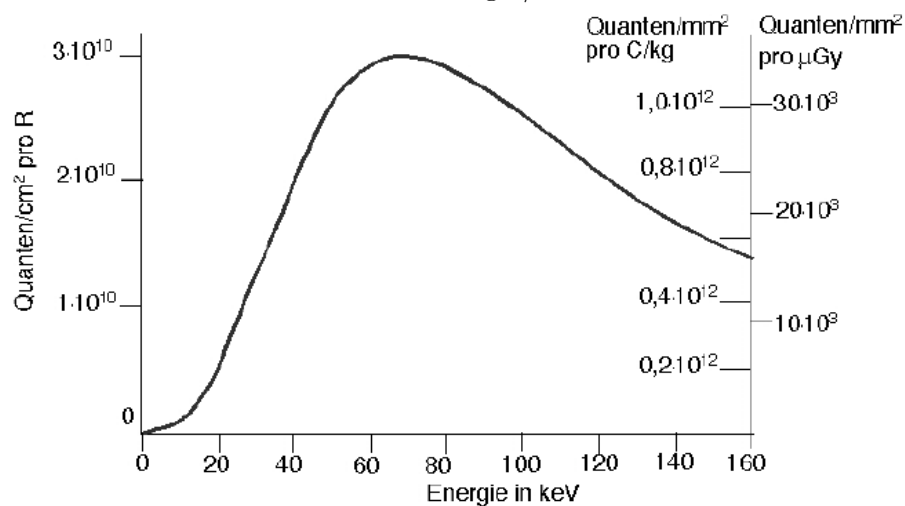


Abbildung 5/2:



- (b) Wie vielen Quanten/mm² entspricht diese Dosis (ungefähr) und welcher Kontrast (K_{min} ließe sich theoretisch bei einer Pixelgröße von $d = 0,1 \text{ mm}$ damit erreichen ($\kappa = 5$) ?

Lösung:

- (a) Aus Abb. 1 abzulesen

$$\Gamma_R(80 \text{ kV}, 2 \text{ mmAl}) = 8 \frac{\text{mSv m}^2}{\text{mA min}} \quad (3)$$

Äquivalentdosis:

$$8 \frac{\text{mSv m}^2}{\text{mA min}} \cdot \frac{20 \text{ mA} \cdot 0,3/60 \text{ min}}{(0,5 \text{ m})^2} = 3,2 \text{ mSv} \quad (4)$$

Die Energiedosis ist in diesem Fall gleich der Äquivalentdosis, da es sich um γ -Quanten handelt ($q = 1$)

$$D = H = 3,2 \text{ mGy} \quad (5)$$

- (b) Aus Abb. 2 abzulesen:

Umrechnungsfaktor bei 80 kV: 34000 Quanten/mm²/μGy.

Anzahl der Quanten:

$$N = 3200 \mu\text{Gy} \cdot 34000 \frac{\text{Quanten}}{(\text{mm}^2 \cdot \mu\text{Gy})} \cdot 0,01 \text{ mm}^2 = 1,088 \cdot 10^6 \text{ Quanten} \quad (6)$$

Mit

$$K_{min} = \frac{\kappa}{\sqrt{N}} \quad (7)$$

folgt: $K_{min} = 4,8 \%$

Computer Thomographie (CT)

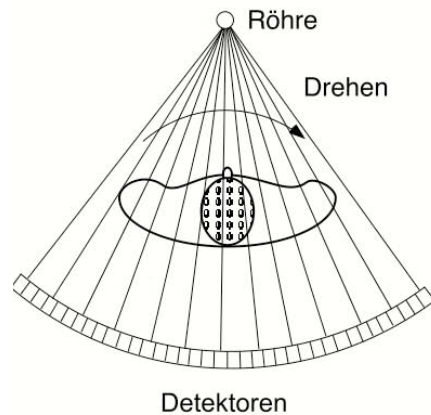
Frage 7**(8 Punkte)**

Im Laufe der Entwicklung der Computertomographie wurde der Aufbau der CT-Scanner immer weiter entwickelt.

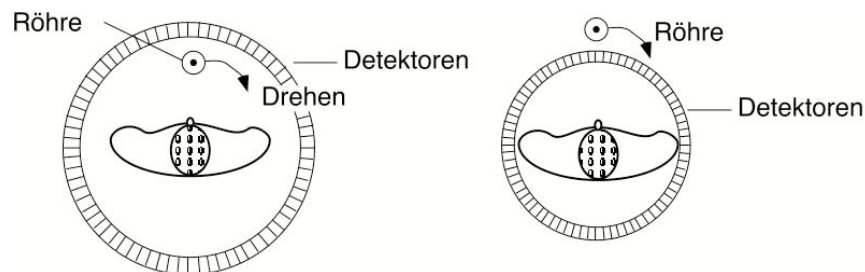
- (a) Skizzieren Sie jeweils einen CT-Scanner der 3. und der 4. Generation. (4 Punkte)
- (b) Erläutern Sie, wie eine Aufnahmesequenz in einem Scanner der 4. Generation abläuft und veranschaulichen Sie die Positionen der Messwerte im Radon-Raum für eine Aufnahme-position. (4 Punkte)

Lösung:

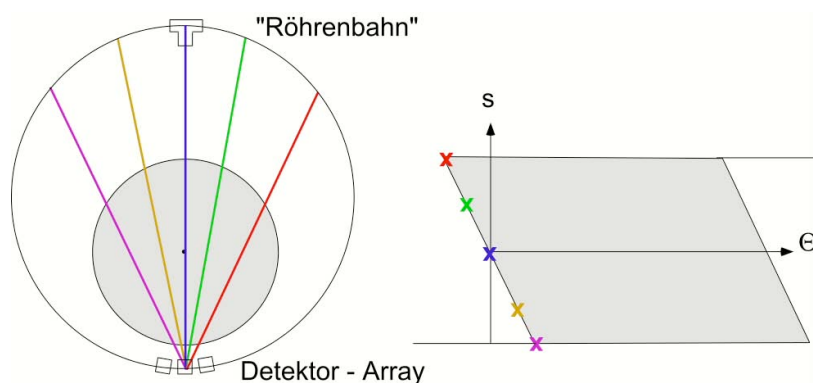
- (a) CT-Scanner der 3. Generation



CT-Scanner der 4. Generation



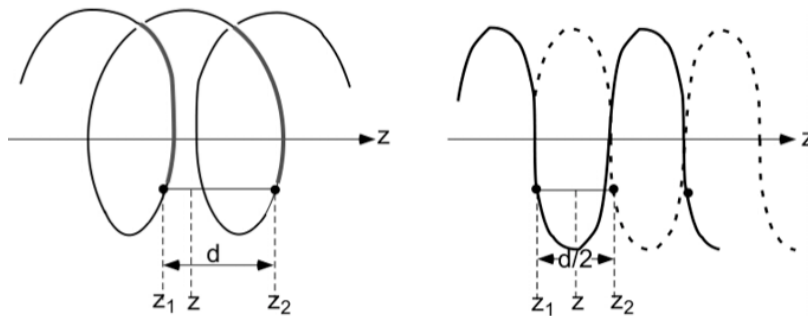
- (b) Der CT-Scanner der 4. Generation verfügt über einen stehenden Detektorring. Die verschiedenen Projektionen werden durch die Bewegung der Röntgenröhre erzielt. Durch die punktförmige Röntgenquelle ergibt sich zu jeder Aufnahme ein "Fächer", von Linienintegralen zu verschiedenen Winkeln. Die Punkte zu einer Messung liegen somit auf einer relativ zur s -Achse gekippten Geraden im Radonraum (siehe Abbildung).

**Frage 8****(6 Punkte)**

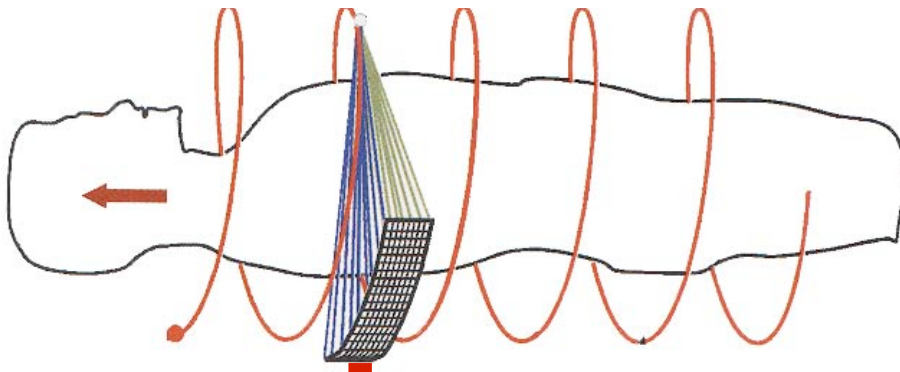
- (a) Was versteht man unter Spiral-CT? Wie werden die Projektionen für die Rekonstruktion gewonnen? (3 Punkte)
- (b) Was versteht man unter Mehrzeilen-CT? Was ist das Problem bei der Bildrekonstruktion? (3 Punkte)

Lösung:

- (a) Spiral-CT ist eine Methode, die es ermöglicht, relativ schnell 3D CT-Aufnahmen zu machen. Dabei wird der Patient kontinuierlich langsam weitergeschoben, während die Röhre um das Zentrum rotiert. Da kein geschlossener Kreis dabei gemessen wird, kann man aus den Messdaten direkt kein Bild rekonstruieren. Um vollständige Datensätze für jede Schicht zu erzeugen, muss eine Interpolation zwischen den Schleifen der Spirale eingesetzt werden. Da die Röhre einen vollen Kreis macht, kann redundante Information eingesetzt werden, so dass effektiv nur in Zwischenebenen im Bereich $0 < z < d/2$ interpoliert werden muss.



- (b) Bei der Mehrzeilen-CT besteht der Detektor aus bis zu 64 Zeilen und rotiert um das Zentrum. Damit kann entweder der Vorschub bei der Spiral-CT beschleunigt werden, oder z. B. bei Herzaufnahmen eine hohe Zeitauflösung erreicht werden. Problem: Die äußeren Detektorzeilen empfangen Kegelstrahlen, die nicht ohne zusätzliche Korrektur eingesetzt werden können.

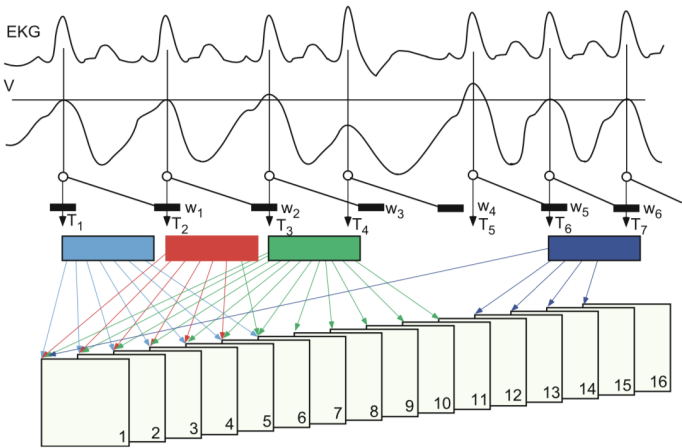


Nuklearmedizinische Messtechnik

Frage 9

(9 Punkte)

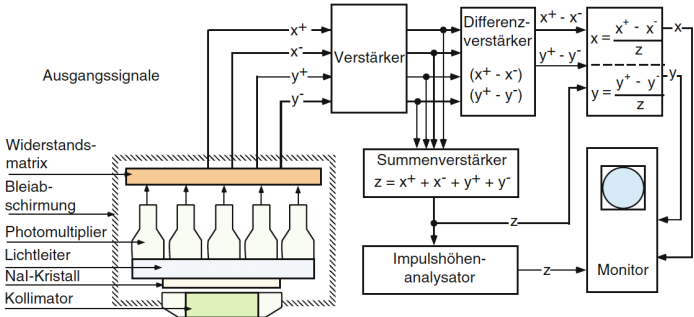
- (a) Skizzieren Sie eine Anger-Kamera (Gamma-Kamera). Beschriften und beschreiben Sie kurz die Komponenten. (5 Punkte)
- (b) Beschreiben Sie die Funktionsweise der MUGA-Technik, die in der folgender Abbildung dargestellt wird. (1 Punkt)



(c) Nennen Sie drei diagnostische Fragestellungen mit zugehörigem Organ bei der planaren Szintigraphie. (3 Punkte)

Lösung:

(a)



- **Kollimator:** Nachweisgebiet wird auf “Säulen” vor der Kamera beschränkt
- **NaI-Kristall / Szintillator:** Umwandlung in sichtbares Licht
- **Photomultiplier:** Lichtnachweis
- **Widerstandsmatrix:** Ermittlung des Schwerpunkts des Lichtblitzes.
Alternativ: viele A/D-Wandler und digitale Berechnung des Schwerpunkts
- **Summensignal:** Maß für die gesamte Lichtintensität
- **Impulshöhenanalysator:** Sortiert gestreute Quanten aus

(b) MUGA-Technik (Multigated Acquisition). Der Trigger T_i , der aus der R-Zacke des EKG erzeugt wird, startet die Akquisition von Daten. Später ankommende Ereignisse werden in später datierte Bilder eingetragen (Bild 1,2,...16). Fällt ein Trigger nicht in das vorgegebene Zeitfenster w , werden die Daten verworfen. Sie stammen mit großer Wahrscheinlichkeit nicht von einem regulären Herzschlag.

(c)

Organ	Diagnostische Fragestellung	Präparat (Beispiele)
Herz	Septum-Defekte, Schlagvolumen (ejection fraction)	^{201}Th -Chlorid, $^{99\text{Tc}}$ -Phosphat
Schilddrüse	Tumor, Überfunktion	^{131}J , ^{123}J , $^{99\text{Tc}}$ -Pertechnetat
Lunge	Belüftung	^{133}Xe , $^{99\text{Tc}}$ -Makroalbumin
Niere	Durchblutung, Sekretion, Exkretion	$^{99\text{Tc}}$ -Chelate (z. B. Tc-DMSA , Tc-DTPA)
Knochen	Tumor	$^{99\text{Tc}}$ -Phosphate

Single Photon Emission Computed Tomography (SPECT)

Frage 10**(8 Punkte)**

- (a) Wie ist die Aktivität definiert und in welcher Einheit wird sie gemessen? (2 Punkte)
- (b) Wozu dient der Impulshöhenanalysator in einer Gamma-Kamera? (2 Punkte)
- (c) Wie funktioniert die vereinfachte Absorptionskorrektur bei der SPECT? (4 Punkte)

Lösung:

- (a) Zahl der Zerfälle pro Sekunde; Einheit: Becquerel, Bq
- (b) Gestreute Quanten kommen nicht vom Ort des Tracers. Sie haben meistens eine kleinere Energie als die primären Quanten. Mit einem energieaufgelösten Nachweis können gestreute Quanten unterdrückt werden.
- (c) Eine Messung anterior liefert das Signal S_A :

$$S_A = k \cdot A \cdot e^{-\mu x}$$

Eine Messung posterior liefert das Signal S_P :

$$S_P = k \cdot A \cdot e^{-\mu(D-x)}$$

Das geometrische Mittel S_{GM} aus S_A und S_P ist:

$$S_{GM} = \sqrt{S_A \cdot S_P} = k \cdot A \cdot e^{-\mu D/2}$$

Aus einer Transmissionsmessung ist $\mu \cdot D$ bekannt ($\ln \frac{I_0}{I} = \mu D$). So kann das Signal S_{GM} korrigiert werden.

Positronen Emissions Tomographie (PET)

Frage 11**(7 Punkte)**

- (a) Erklären Sie die Abläufe bei der PET. Welche speziellen Detektoren werden genutzt. (4 Punkte)
- (b) Von welchen drei Faktoren ist die Auflösung bei der PET abhängig. (3 Punkte)

Lösung:

- (a) Bei der PET-Methode werden die Moleküle, die man im Körper des Patienten verfolgen möchte, mit einem Positronen-Strahler markiert. Bei der Positronen-Emission wandelt sich im Kern eines Elementes ein Proton in ein Neutron n, ein Positron e^+ und ein Neutrino ν um. Diese Positronen stoßen schon nach einem sehr kurzen Weg mit einem Elektron zusammen und erzeugen dabei zwei Gamma-Quanten (Annihilation), die dann detektiert werden. Beim Nachweis der beiden Gamma-Quanten benutzt man eine sogenannte Koinzidenzdetektion. Es werden nur solche Ereignisse gezählt und weiter ausgewertet, bei denen zwei Gamma-Quanten gleichzeitig (in einem Zeitfenster von ca. 10 ns bis 20 ns) nachgewiesen werden.
- (b) Auflösung:

1. Mittlere freie Weglänge der Positronen
2. Halbwertsbreite der Winkelverteilung
3. Genauigkeit, mit der ein Gamma-Quant im Detektorring lokalisiert werden kann.