

# Vorlesung 1

Karim Kouz

SS2017 2. Semester Biophysik

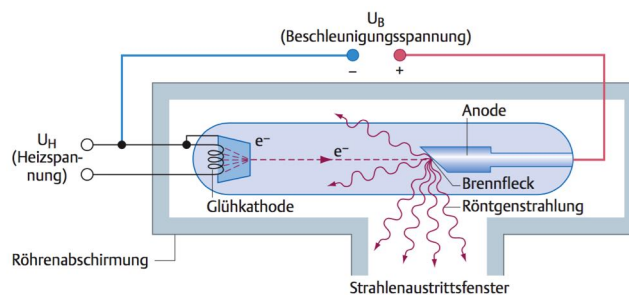
## (I) Röntgenstrahlung: Erzeugung und Eigenschaften

Karim Kouz

SS2017 2. Semester Biophysik

# Aufbau einer Röntgenröhre

- In einem hochevakuierten Glaskolben (Beschleunigung der Elektronen nur im Vakuum optimal) befinden sich zwei Elektroden: Glühkathode und Anode
- An der Glühkathode liegt die sogenannte Heizspannung  $U_H$  (ca. 6 V) an
- Die zwischen Anode (positiv) und Kathode (negativ) angelegte Beschleunigungsspannung  $U_B$  variiert, je nach Verwendungszweck, zwischen ca. 30 – 200 kV



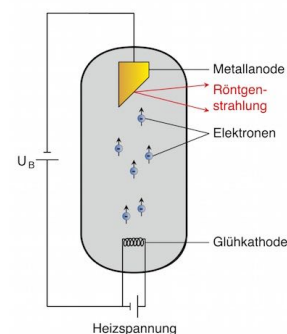
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Duale Reihe Radiologie 3. Auflage, M. Reiser, F. P. Kuhn, Thieme Verlag

3

## Glühkathode – Austritt von Elektronen

- Aus der Glühkathode treten Elektronen in das Vakuum aus und stehen zur Beschleunigung in Richtung Anode zur Verfügung
- Mechanismus:
  - Durch das Anlegen der Heizspannung an die Glühkathode, fängt diese an zu glühen
  - Die Elektronen der Glühkathode bekommen thermische Energie übertragen und können dadurch aus dem Draht austreten (glüh elektrischer Effekt)
  - Die freien Elektronen werden nun in dem elektrischen Feld zwischen Anode und Kathode Richtung Anode beschleunigt



Die Elektronen müssen genügend thermische Energie besitzen, um den Wert der Austrittsarbeit des Metalls zu überschreiten. Eine sofortige Beschleunigung Richtung Anode ist nötig, da die Elektronen ansonsten wieder in den Draht eintreten würden (Störung des Gleichgewichts).

Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: <http://physikunterricht.online.de/jahrgang-12/rontgenstrahlung/>

4

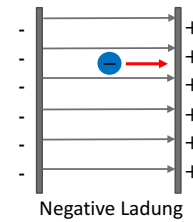
## Beschleunigung der Elektronen

- Das elektrische Feld zwischen Anode und Kathode verrichtet Arbeit auf die Elektronen und überträgt ihnen dabei Energie, die in Form von kinetischer Energie sichtbar wird
- Die Elektronen werden Richtung Anode beschleunigt
- Laut Energieerhaltungssatz muss daher gelten:

$$U_B \cdot e = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Elektrische Energie in einem  
homogenen elektrischen Feld

Kinetische Energie  
(Bewegungsenergie)



Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Karim Kouz (07/2018)

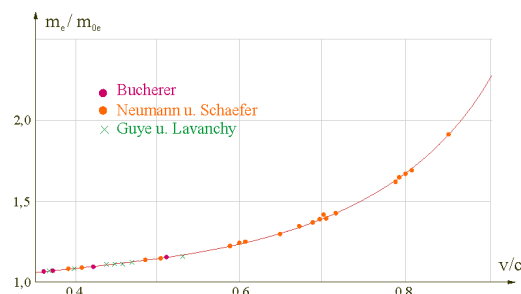
5

## Relativistische Effekte

- Erreichen die Elektronen Geschwindigkeiten, die 10% der Lichtgeschwindigkeit betragen und mehr, so treten relativistische Effekte auf
- Einer dieser Effekte ist, dass bewegte Massen schwerer werden:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- Diese Tatsache muss bei Berechnungen immer bedacht werden



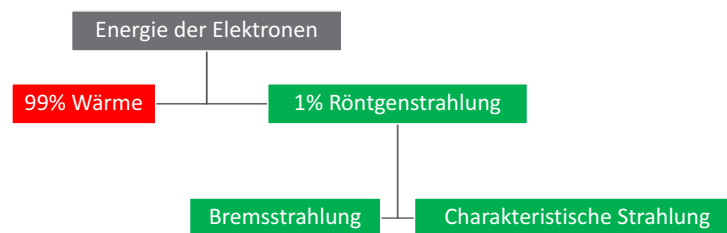
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: <http://www.kiiphyik.de/homebereich/gebiete-relativitaetstheorie>

6

# Abbremsung der Elektronen

- Die beschleunigten Elektronen werden in der Anode abgebremst und verlieren dabei ihre Energie
- Ein Teil dieser Energie wird in Form von Röntgenstrahlung frei:

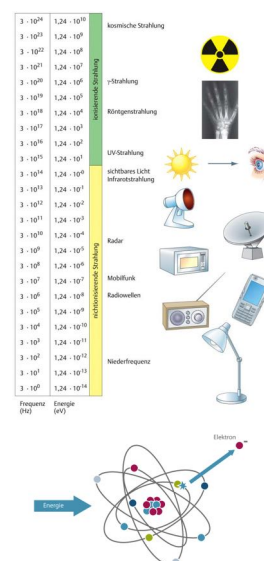


Karim Kouz, Biophysik SS2017

7

# Eigenschaften der Röntgenstrahlung

- Röntgenstrahlung ist eine elektromagnetische Strahlung
- Eigenschaften:
  - Wellenlänge im pm-Bereich
  - Ionisierende Wirkung (schädlich für Organismen – biologische Wirkung)
  - Lumineszenzeffekt (kann genutzt werden, um Strahlung sichtbar zu machen)
- Nach ihrer Entstehung kann Röntgenstrahlung eingeteilt werden in:
  - Kontinuierliche Bremsstrahlung
  - Charakteristische Strahlung
- Abhängig von ihrem Verwendungszweck werden unterschiedliche Strahlungsenergien eingesetzt:
  - Diagnostik (Röntgenaufnahmen, CT): 30 – 200 keV
  - Therapie: 5 – 20 MeV

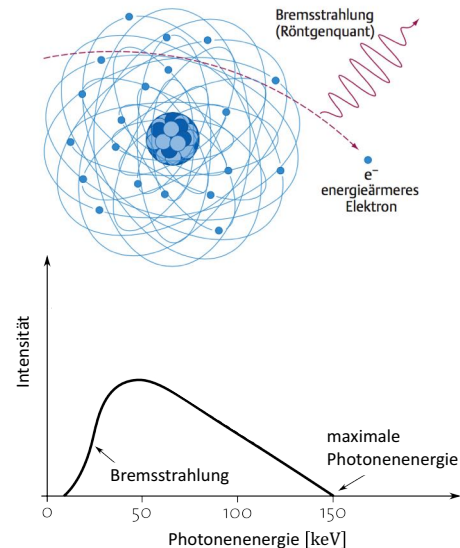


Karim Kouz, Biophysik SS2017

8

# Kontinuierliche Bremsstrahlung

- Elektronen werden im elektrischen Feld der Anodenatomkerne angezogen und dadurch abgebremst (Coulomb-Feld)
- Die Abbremsung erfolgt jedoch unterschiedlich stark – die Elektronen geben dabei in unterschiedlichem Maße Bewegungsenergie ab
- Diese Bewegungsenergie wird in Bremsstrahlung umgewandelt
- Es ergibt sich daher ein kontinuierliches Spektrum, da Elektronen auf unterschiedliche Weise mehr oder weniger schnell abgebremst werden:
  - Ein Elektron, das auf einen Schlag seine komplette Energie abgibt, erzeugt ein Röntgenphoton mit hoher Energie
  - Ein Elektron, das Stück für Stück seine Energie abgibt, erzeugt mehrere Röntgenphotonen mit weniger hoher Energie



Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Duale Reihe Radiologie 3. Auflage: M. Reiser, F.-P. Kuhn, Thieme Verlag. Verändert nach <https://www.quora.com/Why-is-the-spectrum-of-bremsstrahlung-radiation-continuous>

9

# Kontinuierliche Bremsstrahlung

- Ein Röntgenphoton kann also maximal die Energie besitzen, die das Elektron vor der Abbremsung besaß (1. Hauptsatz: Energie kann weder erzeugt, noch vernichtet werden)
- Die kinetische Energie des Elektrons vor der Abbremsung ist also immer größer oder gleich der Energie des bei der Abbremsung entstehenden Röntgenphotons:

$$E_{kin} \geq h \cdot f$$

$$U_B \cdot e = E_{kin} \geq h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

- $c = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$
- $e = 1,6 \cdot 10^{-19} C$
- $h = 6,6 \cdot 10^{-34} J \cdot s$

$$\lambda \geq \frac{h \cdot c}{U_B \cdot e} = \lambda_{min}$$

Einsetzen von Konstanten

$$\lambda_{min} = \frac{1230 \text{ kV} \cdot \text{pm}}{U_B}$$

Karim Kouz, Biophysik SS2017

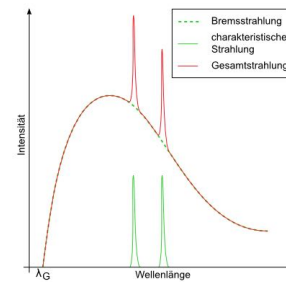
10

## Duane-Hunt-Gesetz

$$\lambda_{min} = \frac{1230 \text{ kV} \cdot \text{pm}}{U_B}$$

- Beachte: Keine SI-Basiseinheiten in dem Gesetz
- Wird die Beschleunigungsspannung in das Gesetz in kV eingesetzt, so erhält man die sogenannte Grenzwellenlänge ( $\lambda_{min} = \lambda_G$ )
- Die Grenzwellenlänge ist die Wellenlänge der Röntgenphotonen mit maximaler Energie

Die Grenzwellenlänge ändert sich nicht mit der Wahl eines anderen Anodenmaterials und auch nicht bei Variation der Geometrie der Anode.



Quelle: <http://p.un-gottigen.de/gen/lex/485>

11

Karim Kouz, Biophysik SS2017

## Spektrum der kont. Bremsstrahlung

- Anhand ihrer Energie kann Röntgenstrahlung eingeteilt werden:
  - **Weiche Strahlung** (< 100 keV)
  - **Harte Strahlung** (100 keV – 1 MeV)
  - **Ultraharte Strahlung** (> 1 MeV)

- **Weiche Strahlung: Strahlung mit...**
  - ...großer Wellenlänge
  - ...kleiner Frequenz
  - ...kleiner Photonenenergie

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

- **Harte Strahlung: Strahlung mit...**
  - ...kleiner Wellenlänge
  - ...großer Frequenz
  - ...großer Photonenenergie

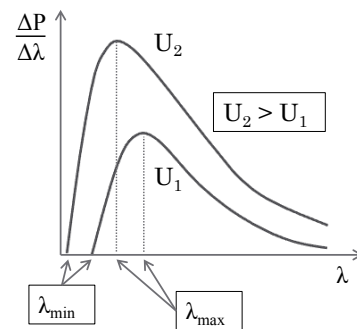
12

Karim Kouz, Biophysik SS2017

## Spannungsabhängigkeit

- Eine Erhöhung der Beschleunigungsspannung ( $U_B$ ) führt zu:
  - $\lambda_{\min}$ : wird kleiner
  - $\lambda_{\max}$ : wird größer
  - $E_{\text{Photon}}$ : nimmt zu
  - $N_{\text{Photon}}$ : nimmt zu
  - Gesamtleistung (Fläche unter der Kurve): nimmt zu
- Durch eine Erhöhung der Beschleunigungsspannung erhält man eine härtere Strahlung
- Zudem gilt folgende Proportionalität:

$$P \sim U^2$$



Karim Kouz, Biophysik SS2017

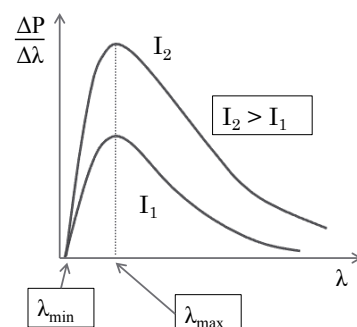
Quelle: Karim Kouz (02/2015)

13

## Stromstärkeabhängigkeit

- Die Stromstärke zwischen Anode und Kathode kann erhöht werden, indem mehr Ladungsträger pro Zeiteinheit aus der Glühkathode austreten und zur Anode fließen, also durch Erhöhung der Heizspannung
- Eine Erhöhung der Stromstärke führt zu:
  - $\lambda_{\min}$ : bleibt gleich
  - $\lambda_{\max}$ : bleibt gleich
  - $E_{\text{Photon}}$ : bleibt gleich
  - $N_{\text{Photon}}$ : nimmt zu
  - Gesamtleistung (Fläche unter der Kurve): nimmt zu
- Durch Erhöhung des Anodenstroms erhält man keine härtere Strahlung
- Es gilt folgende Proportionalität:

$$P \sim I$$



Das Ohm'sche Gesetz gilt nicht im Vakuum – daher sind Spannung und Stromstärke unabhängig voneinander regulierbar.

Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Karim Kouz (02/2015)

14

## Leistung der Röntgenröhre

- Die Leistung der Röntgenröhre ist abhängig von mehreren Faktoren:

- Beschleunigungsspannung ( $U_B$ )
- Anodenstromstärke ( $I$ )
- Ordnungszahl des Anodenmaterials ( $Z$ )

- Es gilt:

$$P_{\text{gesamt}} = c_{\text{Röntgen}} \cdot U_B^2 \cdot I \cdot Z$$

$$c_{\text{Röntgen}} = 1,1 \cdot 10^{-9} \frac{1}{V}$$

- Die Abhängigkeit von der Ordnungszahl lässt sich damit erklären, dass eine höhere Ordnungszahl mit einer höheren Elektronendichte und auch einer höheren Kernladung einhergeht
- Je mehr Elektronen anwesend sind und je größer der Atomkern bzw. dessen Ladung ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit der Abbremsung

Karim Kouz, Biophysik SS2017

15

## Wirkungsgrad der Röntgenröhre

- Verhältnis der abgestrahlten Leistung zur investierten Leistung
- Vereinfacht: Wie viel von dem, was ich reingesteckt habe, kommt als das wieder raus, was ich haben möchte?

• Allgemein:  $\eta = \frac{\text{abgestrahlte Leistung}}{\text{investierte Leistung}}$

• Mit den Parametern der Röntgenröhre:  $\eta = \frac{c_{\text{Röntgen}} \cdot I \cdot U^2 \cdot Z}{U \cdot I} = c_{\text{Röntgen}} \cdot U \cdot Z$

$$P_{\text{elektrisch}} = U \cdot I$$

Mit steigender Ordnungszahl wird der Wirkungsgrad der Röntgenröhre größer. Daher wird z.B. Wolfram mit einer Ordnungszahl von  $Z = 74$  oft verwendet. Trotz dieser hohen Ordnungszahl beträgt der Wirkungsgrad gerade einmal 1%, d.h. 99% der Energie wird in Form von Wärme abgegeben (hohe Schmelztemperatur des Anodenmaterials – **Kühlkopf und Drehanode**).

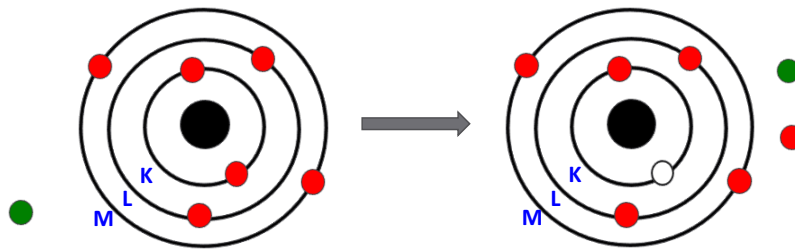
Karim Kouz, Biophysik SS2017

16



## Charakteristische Röntgenstrahlung

- Ein **beschleunigtes Elektron** schlägt ein Elektron der inneren Schale eines Atoms der Anode heraus
- Das Elektron muss dabei mindestens die Austrittsenergie/Bindungsenergie in Form von kinetischer Energie besitzen (innere Schalen im keV-Bereich, äußere Schalen im eV-Bereich)



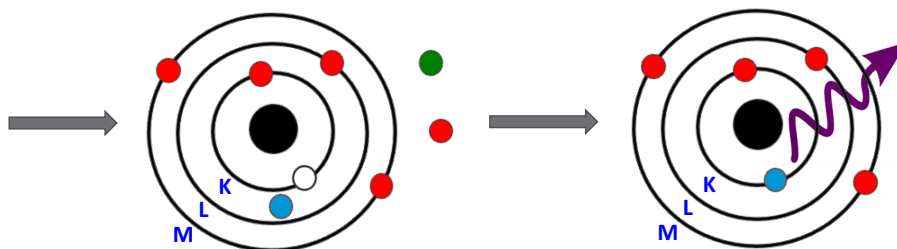
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Karim Kouz (03/2017)

17

## Charakteristische Röntgenstrahlung

- Beide Elektronen (herausgelöstes und beschleunigtes) bewegen sich weiter, wobei das aus der Glühkathode stammende Elektron deutlich weniger Energie besitzt als vor dem Auftreffen auf die Anode (Energie wurde an das herausgelöste Elektron abgegeben)
- Die entstandene Leerstelle wird von einem **Elektron** der äußeren Schale aufgefüllt
- Beim Auffüllen wird Energie in Form von Röntgenstrahlung frei, da die Elektronen der äußeren Schalen mehr Energie besitzen als die der inneren Schalen



Karim Kouz, Biophysik SS2017

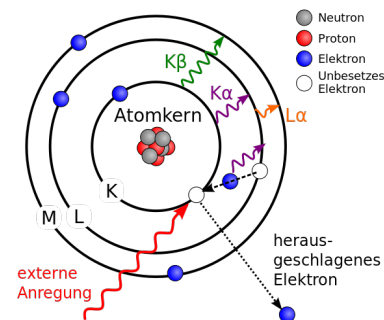
Quelle: Karim Kouz (03/2017)

18

# Charakteristische Röntgenstrahlung

- Das Anodenmaterial besitzt mehrere Schalen, sodass auch mehrere Elektronenübergänge möglich sind:
  - $K_{\alpha}$ : Leerstelle der K-Schale wird mit einem Elektron der L-Schale gefüllt
  - $K_{\beta}$ : Leerstelle der K-Schale wird mit einem Elektron der M-Schale gefüllt
  - $L_{\alpha}$ : Leerstelle der L-Schale wird mit einem Elektron der M-Schale gefüllt (diese Übergänge können, je nach freigesetzter Energie, auch nur zur Lichtemission und nicht zur Röntgenstrahlung führen)

Jedes Atom weist einen unterschiedlichen Aufbau und somit unterschiedliche diskrete Energieniveaus auf. Die Übergänge sind daher charakteristisch für das jeweilige Atom.



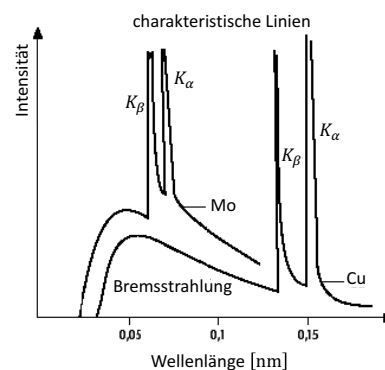
Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Charakteristische\\_Röntgenstrahlung](http://de.wikipedia.org/wiki/Charakteristische_Röntgenstrahlung)

19

Karim Kouz, Biophysik SS2017

# Charakteristische Röntgenstrahlung

- Charakteristische Röntgenstrahlung erscheint erst bei bestimmten Beschleunigungsspannungen, da die Energie groß genug sein muss, um die Ionisierungsenergie der Atome zu erreichen
- Es sind für das jeweilige Material charakteristische Spektrallinien zu beobachten
- Bei der charakteristischen Röntgenstrahlung handelt es sich um (nahezu) monochromatische Strahlung



Quelle: Variiert nach [http://www.groetz.com/dau/diagram/1415\\_rontgenroethne.png](http://www.groetz.com/dau/diagram/1415_rontgenroethne.png)

20

Karim Kouz, Biophysik SS2017

# Schwächungsgesetz

- Die Schwächung der Röntgenstrahlung durch einen homogenen Absorber – z.B. einen Bleiklotz – folgt einem exponentiellen Verlauf und kann mit Hilfe des Schwächungsgesetzes beschrieben werden:

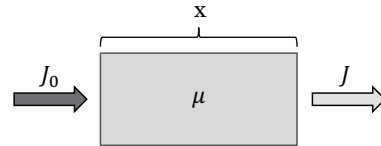
$$J = J_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}$$

$\mu$ : linearer Schwächungskoeffizient (**1/cm**)  
 $x$ : Schichtdicke

- Zudem gilt für die Halbwertsdicke ( $D$ ) bzw. die Eindringtiefe ( $\delta$ ):

$$D = \frac{\ln(2)}{\mu}$$

$$\delta = \frac{1}{\mu}$$

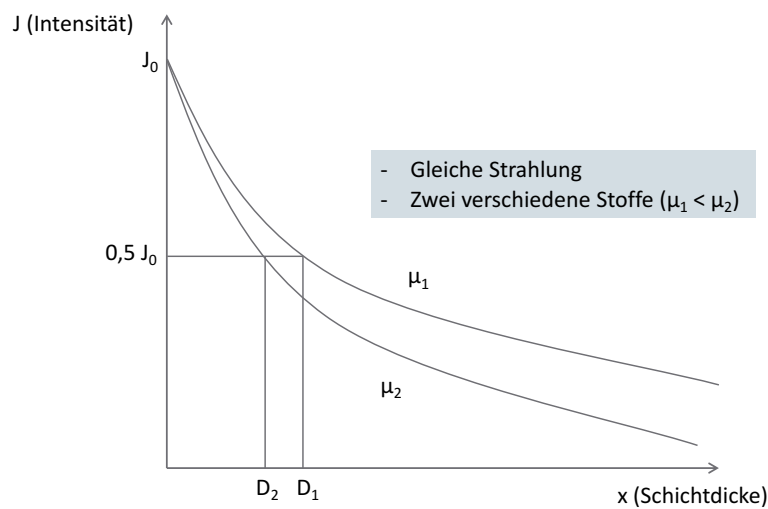


Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Karim Kouz (03/2017)

21

# Schwächungsgesetz



Karim Kouz, Biophysik SS2017

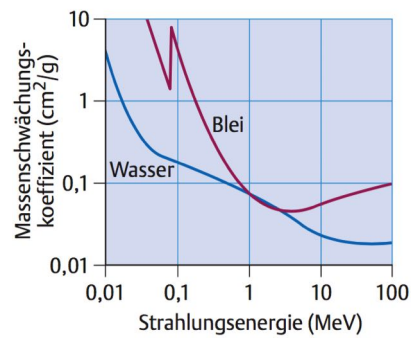
Quelle: Karim Kouz (November 2014)

22

# Schwächungskoeffizienten

- $\mu$  ist abhängig von:
  - Dem absorbierenden Material (Z)
  - Der Dichte des Materials ( $\rho$ )
  - Der Art der Strahlung (= Strahlungsenergie)
- $\mu_m$  (Massenschwächungskoeffizient) ist abhängig von:
  - Dem absorbierenden Material (Z)
  - Der Art der Strahlung (= Strahlungsenergie)

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \left[ \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \right]$$



Quelle: Duale Reihe Radiologie 3. Auflage: M. Reser, F. P. Kuhn, Thieme Verlag

23

Karim Kouz, Biophysik SS2017

# Massenschwächungskoeffizient

- Viele Stoffe können in verschiedenen Formen bzw. Aggregatzuständen vorkommen
- Diese Stoffe haben den gleichen Massenschwächungskoeffizienten (aber unterschiedliche lineare Schwächungskoeffizienten)
- Beispiele:
  - Blei, Bleiglas, Bleigummi
  - Wasser, Eis, Wasserdampf
- Rechnet man mit dem Massenschwächungskoeffizienten, so darf man nicht mit der Schichtdicke rechnen, sondern mit der Massenbedeckung  $x_m$ :

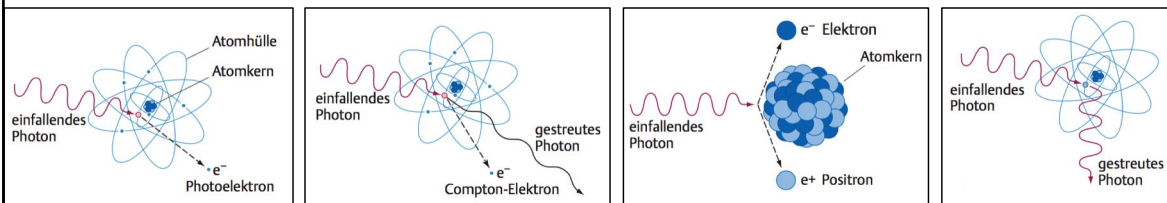
$$x_m = x \cdot \rho \left[ \frac{\text{g}}{\text{cm}^2} \right]$$

Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017

24

# Schwächungsmechanismen

- Zur Schwächung der Röntgenstrahlung tragen vier Mechanismen bei:
  - Photoeffekt
  - Compton-Streuung
  - Paarbildung
  - Elastische Streuung



Karim Kouz, Biophysik SS2017

25

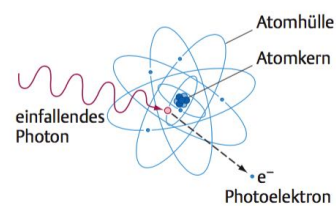
Quelle: Verändert nach Duale Reihe Radiologie 3. Auflage: M. Reiser, F.-P. Kuhn, Thieme Verlag

## Photoeffekt ( $\tau_m$ )

- Die komplette Energie des Röntgen-Photons wird absorbiert und an ein kernnahes Elektron abgegeben
- Ist die Energie des Röntgen-Photons groß genug, kann das Elektron das Atom verlassen
- Das ausgelöste Elektron hat eine sehr hohe kinetische Energie und kann viele weitere Atome ionisieren (indirekt ionisierende Strahlung)

$$E_{\text{photon}} = A + E_e$$

Austrittsarbeit



Karim Kouz, Biophysik SS2017

26

Quelle: Verändert nach Duale Reihe Radiologie 3. Auflage: M. Reiser, F.-P. Kuhn, Thieme Verlag

## Photoeffekt ( $\tau_m$ )

- Für den Photoeffekt gilt Folgendes:

$$\tau_m = \text{const.} \cdot \lambda^3 \cdot Z^3$$

$$\tau_m = \text{const.}' \cdot \frac{Z^3}{E_{\text{photon}}^3}$$

- D.h., dass der Photoeffekt:
  - Bei großen Wellenlängen (weiche Strahlung) mit einer größeren Wahrscheinlichkeit auftritt
  - Bei Atomen mit großer Ordnungszahl ( $Z$ ) mit einer größeren Wahrscheinlichkeit auftritt
- Die starke Abhängigkeit von der Ordnungszahl ist besonders wichtig bei diagnostischen Verfahren: besteht zwischen zwei Organen ein Unterschied von 10% in Bezug auf die Massenzahl, so erhöht sich die Wahrscheinlichkeit des Photoeffekts um ca. 33%

Karim Kouz, Biophysik SS2017

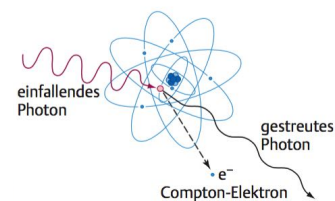
27

## Compton-Streuung ( $\sigma_m$ )

- Ein Teil der Energie des Röntgen-Photons wird an ein Elektron (Compton-Elektron) abgegeben
- Das Elektron (Compton-Elektron) wird dabei herausgelöst
- Das Röntgen-Photon (Compton-Photon) hat nach der Wechselwirkung eine kleinere Restenergie und auch eine andere Ausbreitungsrichtung

$$E_{\text{photon}} = A + E_{\text{Compton-Elektron}} + E_{\text{Compton-Photon}}$$

Der Prozess stellt also keine echte Absorption dar, sondern eher eine unelastische Streuung, die Compton-Streuung.



Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Verändert nach Diale Reihe Radiologie 3. Auflage, M. Reiser, F.-P. Kuhn, Thieme Verlag

28

# Compton-Streuung ( $\sigma_m$ )

- Für die Compton-Streuung gilt Folgendes:

$$\sigma_m = \text{const.} \cdot \frac{Z}{A}$$

$$\sigma_m \sim \sqrt{A}$$

- Das bedeutet, dass die Compton-Streuung praktisch unempfindlich gegenüber dem Stoff ist, da normalerweise Ordnungszahl (Z) und Massenzahl (A) gleichmäßig ansteigen

Karim Kouz, Biophysik SS2017

29

# Compton-Streuung ( $\sigma_m$ )

- Kohlenstoff:  $\frac{Z}{A} = 0,4995$
- Calcium:  $\frac{Z}{A} = 0,4990$
- Phosphor:  $\frac{Z}{A} = 0,4843$

Legende

Ordnungszahl	Symbol	Ordnungszahl	Serie
1	H	schwarz = nicht radioaktiv	Alkalimetalle
2	He	rot = radioaktiv	Metalle
3	Li		Erdealkalimetalle
4	Be		Übergangsmetalle
5	B		Nichtmetalle
6	C		Halogenide
7	N		Halogene
8	O		Erdalkalimetalle
9	F		Übergangsmetalle
10	Ne		Nichtmetalle
11	Na		Alkalimetalle
12	Mg		Metalle
13	Al		Erdealkalimetalle
14	Si		Übergangsmetalle
15	P		Nichtmetalle
16	S		Halogenide
17	Cl		Halogene
18	Ar		Erdalkalimetalle

Atomgewichte  
Elektronenkonfiguration  
Schwarz = Feststoff  
Rot = Gas  
Blau = Flüssigkeit

Gruppe

Periode

Lanthanoide

Actinoide

Quelle: [http://gonu.tu.ifi.munich/chemie/periodic/PSE\\_Eng/view](http://gonu.tu.ifi.munich/chemie/periodic/PSE_Eng/view)

Karim Kouz, Biophysik SS2017

30

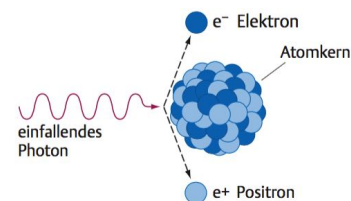
## Paarbildung ( $\kappa_m$ )

- Trifft Röntgenstrahlung ausreichend hoher Energie auf Materie, so kann diese Energie in Materie umgewandelt werden, gemäß:

$$E = m \cdot c^2$$

- Dabei entstehen zwei Materieteilchen, ein Elektron und ein Positron

Die bei diesem Prozess entstehenden zwei Masseteilchen, die vorher nicht vorhanden waren, sind ein Umwandlungsprodukt von Energie. Die beiden Teilchen gab es vorher nicht – sie sind neu entstanden.



Quelle: Verändert nach Duale Reihe Radiologie 3. Auflage, M. Heiser, F. P. Kuhn, Thieme Verlag

31

Karim Kouz, Biophysik SS2017

## Paarbildung: Mathematische Beschreibung

- Für die Paarbildung gilt Folgendes:

$$h \cdot f \geq 2 \cdot m_e \cdot c^2 \approx 1 \text{ MeV}$$

Energie des eintreffenden Photons...

...wird in Masse nach  $E = m \cdot c^2$  umgewandelt und zwar in zwei Masseteilchen.

$$E_{\text{photon}} = 2 \cdot m_e \cdot c^2 + E_e + E_p$$

Da die Schwächung aufgrund von Paarbildung erst bei sehr hohen Energien (mind. 1 MeV) eine Rolle spielt, kommt ihr in der Diagnostik keine große Relevanz zu.

32

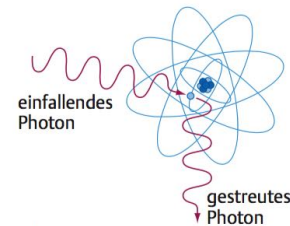
Karim Kouz, Biophysik WS2016/2017



## Elastische Streuung ( $\iota_m$ )

- Das Röntgen-Photon tritt auf ein Hüllenelektron und verändert dadurch seine Richtung, ohne Energie an das Elektron abzugeben
- Bei diesem Prozess findet also keine Ionisation statt – das Röntgen-Photon wird lediglich gestreut

Bei diesem Prozess tritt Schwächung auf, obwohl die Energie des Photons gleich bleibt. Die Ursache der Schwächung beruht hier auf der Tatsache, dass das Photon aus dem Gebiet, in dem es „wirken“ soll, herausgestreut wird und somit nicht mehr der Untersuchung zur Verfügung steht = Streustrahlung.

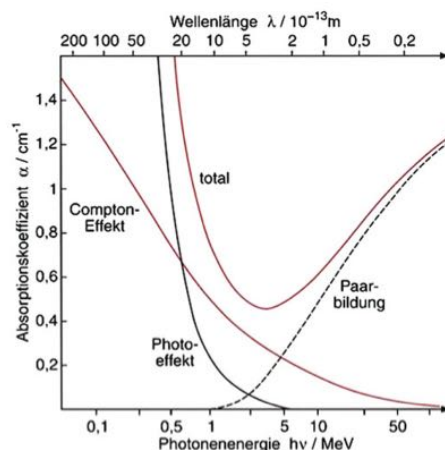


Quelle: Verändert nach Duale Reihe Radiologie 3. Auflage; M. Heiser, F. P. Adny, Thieme Verlag

Karim Kouz, Biophysik SS2017

33

## Abschwächung der Röntgenstrahlung



Beachte:  $\mu_m$  kann 1 sein, muss es aber nicht. Die 4 Schwächungsmechanismen müssen sich also nicht unbedingt auf 1 aufsummieren, im Gegensatz zu der Schwächung von Licht durch Absorption, Reflexion, Streuung und Transmission.

$$\mu_m = \tau_m + \sigma_m + \kappa_m + \iota_m$$

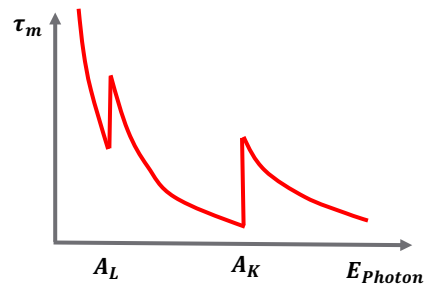
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Tipler, Paul A.; Mosca, Gene; Kommer, Christoph (2015): Physik. Für Wissenschaftler und Ingenieure, 7. Aufl. Hg. v. Jerry Walker. Springer Spektrum

34

# Absorptionskanten

- Absorptionskanten treten im Bereich von weicher Strahlung auf
- Reicht die Energie der Röntgenphotonen nicht mehr aus, Elektronen aus einer der inneren Schalen herauszulösen, so fällt die Wahrscheinlichkeit des Photoeffektes für diese Schale drastisch ab
- Dieser Abfall entspricht einer Absorptionskante
- Die Energie reicht jetzt nur noch aus, um Elektronen von der nächst äußeren Schale (kleinere Bindungsenergie – Coulombkraft nimmt mit Entfernung<sup>2</sup> ab) herauszulösen



Der Graph verläuft zwischen zwei Absorptionskanten kurvenförmig, da für den Photoeffekt gilt:

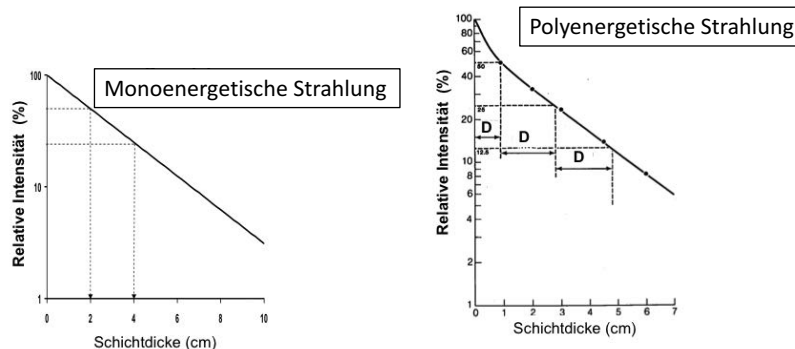
$$\tau_m \sim \frac{1}{E_{\text{Photon}}^3}$$

Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Karim Kouz (03/2013)

35

# Schwächungsdiagramme und Halbwertsdicken



- Monoenergetische Strahlung: Halbwertsdicke bleibt immer gleich groß
- Polyenergetische Strahlung:
  - Halbwertsdicke ist nicht immer gleich groß und ändert sich
  - Polyenergetische Strahlung besteht sowohl aus harter als auch aus weicher Strahlung
  - Weiche Strahlung wird „einfacher“ (= kleinere Halbwertsdicke) geschwächt als harte Strahlung

Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Vorlesungsskript Biophysik, Semmelweis Universität Budapest

36

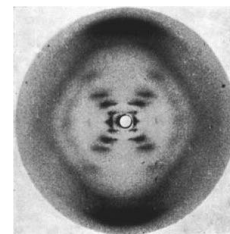
# (II) Physikalische Grundlagen der Röntgendiagnostik

Karim Kouz

SS2017 2. Semester Biophysik

## Anwendung der Röntgenstrahlung

- Diagnostik (z.B. Röntgenbilder, CT)
- Therapie (z.B. Strahlentherapie)
- Forschung (z.B. Röntgendiffraktion)



Quelle: <http://www.radiologie-bonn.de/untersuchungen/ct-computerized-tomography/>, <http://www.monique-westenhagen.de/portfolio/science-technology/>, [http://scienceblog.de/verbreiten/files/2013/07/Photo\\_51\\_x-ray\\_diffraction\\_image.jpg](http://scienceblog.de/verbreiten/files/2013/07/Photo_51_x-ray_diffraction_image.jpg)

Karim Kouz, Biophysik SS2017

38

# Röntgenbilder

- Röntgenbilder können in Summations- und Schnittbilder (= tomographische Bilder) unterteilt werden

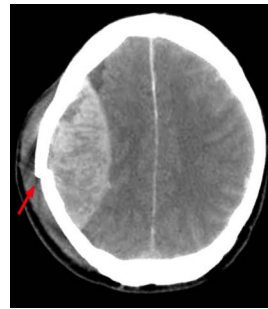
## Summationsbilder:

- Filmaufnahmen (statisch)
- Fluoroskopie („live“)



## Tomographische Bilder

- Schnittbilder
- (Dreidimensionale Bilder)



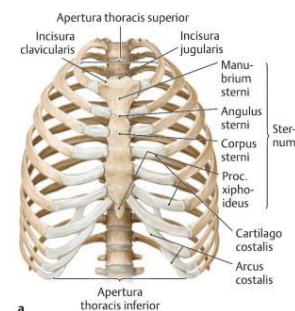
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: <http://www.kleinmanul.de/images/main/L.jpg> <https://de.wikipedia.org/wiki/Hirnbildung>

39

# Summationsbilder

- Unterschiedliche Gewebe absorbieren Röntgenstrahlung unterschiedlich stark:
  - Knochen absorbiert viel Röntgenstrahlung
  - Weichteilgewebe absorbiert weniger Röntgenstrahlung
  - Luft absorbiert fast keine Röntgenstrahlung
- Absorption ist mit einem Intensitätsverlust verbunden, der für das menschliche Auge sichtbar ist, z.B. in Form der Schwärzung eines Röntgenfilms:
  - Kommt viel Strahlung auf den Film, ist er an dieser Stelle dunkel
  - Kommt wenig Strahlung auf den Film, ist er an dieser Stelle hell
- Der (menschliche) Körper ist inhomogen – das Schwächungsgesetz, das nur für homogene Körper gilt, muss modifiziert werden



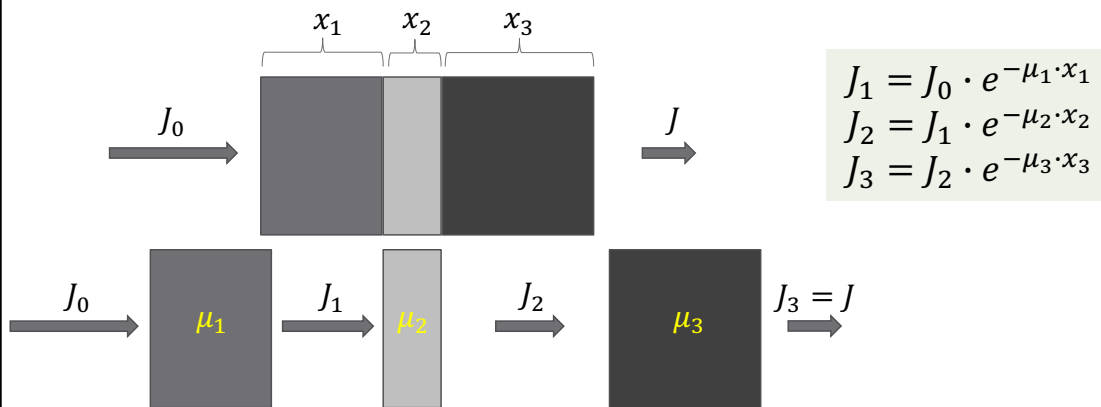
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Aumüller, Gerhard, Würlinger, Laurenz J. (2009): Anatomie. 208 Tabellen. 2. überarb. Aufl. Stuttgart: Thieme (Duke Reihe).

40

## Schwächungsgesetz für inhomogene Körper

- Ein inhomogener Körper kann in viele kleine Körper zerlegt werden, wobei jeder dieser kleineren Körper als homogen angenommen wird:



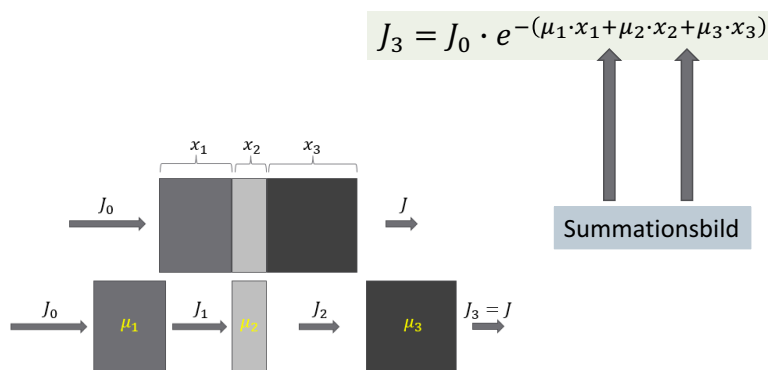
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Karim Kouz (02/2019)

41

## Schwächungsgesetz für inhomogene Körper

- Durch Zusammenfassen und mathematisches Umformen erhält man:



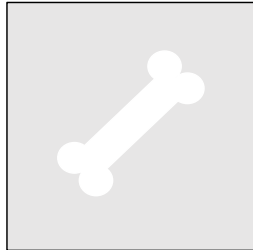
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Karim Kouz (02/2019)

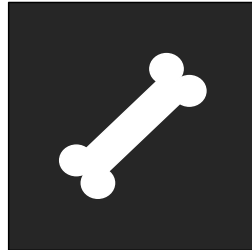
42

## Ziele der Bildgebung

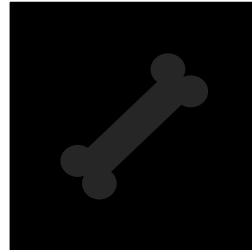
- Bei der Aufnahme/Erstellung von Röntgenbildern ist eines der Ziele, ein Bild mit möglichst gutem Kontrast zu erhalten
- Definition Kontrast: „Bezeichnet den Unterschied zwischen hellen und dunklen Bereichen eines Bildes“



Strahlung zu schwach: Kontrast ↓



Kontrast ✓



Strahlung zu stark: Kontrast ↓

- Zahlreiche Faktoren verschlechtern bzw. verbessern den Kontrast eines Röntgenbildes – u.a. der bei der Bildentstehung stattfindende Schwächungsmechanismus

Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Karim Kouz (09/2015)

43

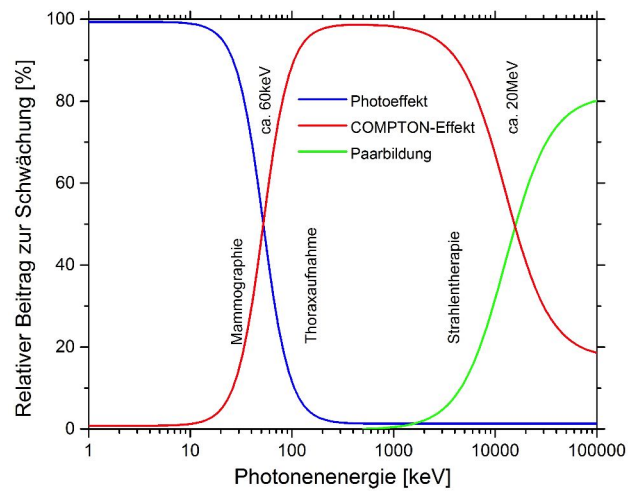
## Schwächungsmechanismen

Mechanismus	Energieabhängigkeit	Ordnungszahl-abhängigkeit	Wichtige Energiebereiche im Gewebe
Photoeffekt	$\sim \frac{1}{E^3}$	$\sim Z^3$	10 – 100 keV
Compton-Streuung	Nimmt mit steigender Energie ab	$\sim \frac{Z}{A}$	0,1 – 5 MeV
Paarbildung	Nimmt mit steigender Energie zu	$\sim Z^2$	> 5 MeV

Karim Kouz, Biophysik SS2017

44

## Schwächungsmechanismen

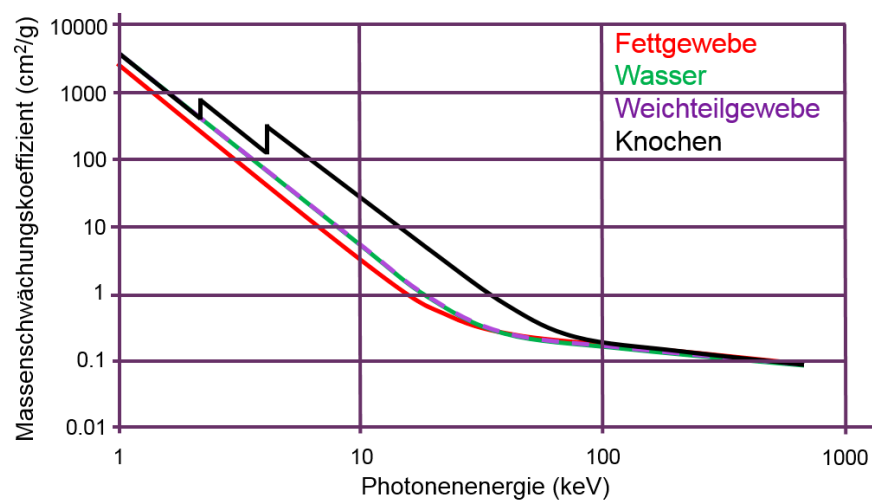


Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Thomas Dose [10/2016] angelehnt an Duale Reihe Radiologie 3. Auflage: M. Reser, F.-P. Kuhn, Thieme Verlag

45

## Schwächungsmechanismen



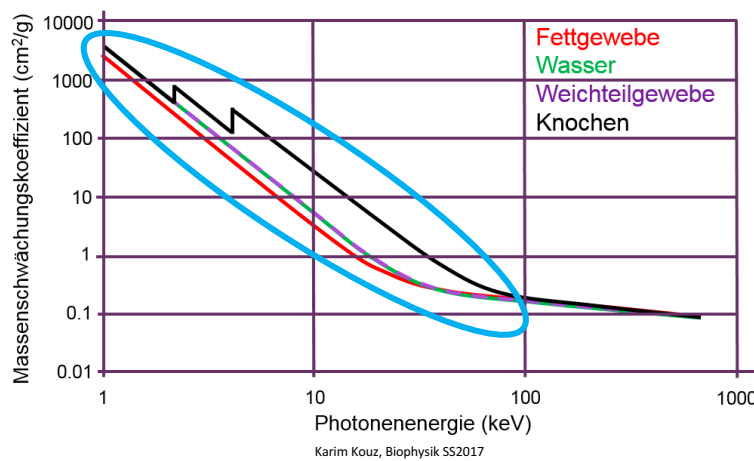
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Karim Kouz (03/2013)

46

## Schwächungsmechanismen

Photoeffekt-Bereich: Verschiedene Absorber haben unterschiedliche (Massen)Schwächungskoeffizienten und rufen damit eine unterschiedlich starke Schwächung der Strahlung hervor.

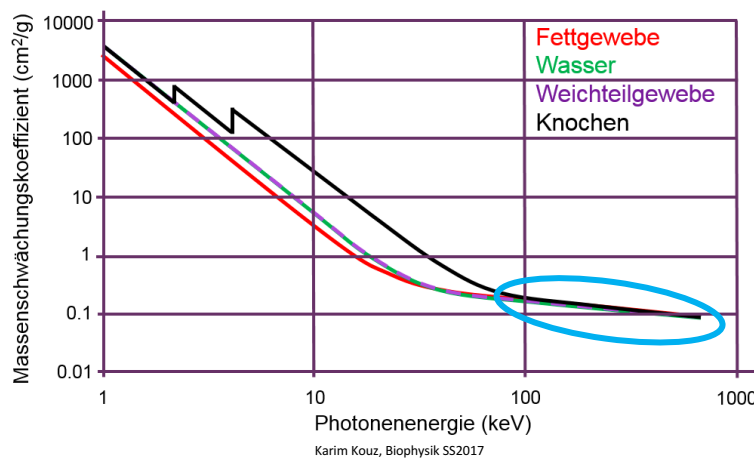


Quelle: Karim Kouz (9/2013)

47

## Schwächungsmechanismen

Compton-Bereich: Absorber haben nahezu gleiche (Massen)Schwächungskoeffizienten – die Schwächung der Strahlung ist unabhängig vom Absorber, d.h. Knochen schwächt die Strahlung genauso stark wie Weichteilgewebe.

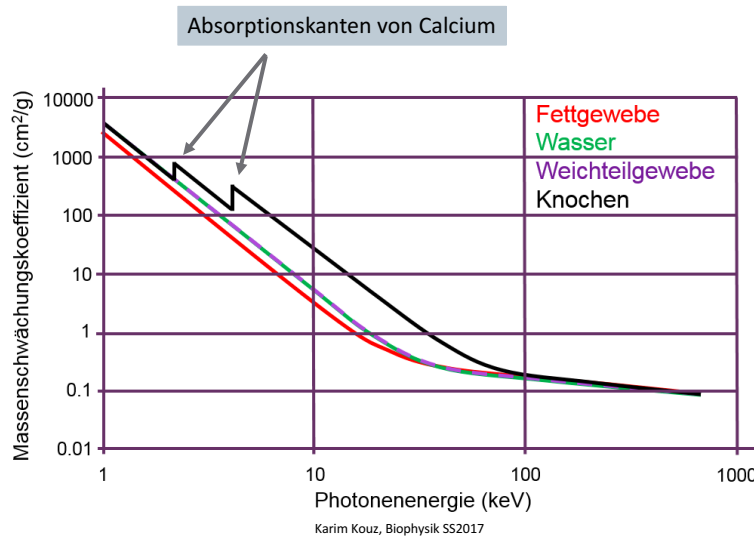


Quelle: Karim Kouz (03/2013)

48



# Schwächungsmechanismen



Quelle: Karim Kouz (9/2013)

49

## Fazit I

- Der Photoeffekt ist der kontrastbestimmende Schwächungsmechanismus
- Durch ihn wird Strahlung – abhängig vom Material – unterschiedlich stark geschwächt wird:
  - $Z_{\text{Fettgewebe}} = 6$
  - $Z_{\text{Weichteilgewebe}} = 7,4$
  - $Z_{\text{Knochen}} = 13,8$
- Für röntgendiagnostische Zwecke sollte die Röntgenenergie in dem Bereich des Photoeffektes liegen



Knochen schwächt die Strahlung aufgrund des Photoeffektes stärker als Weichteilgewebe wegen der starken Abhängigkeit des Schwächungsmechanismus von der Ordnungszahl.

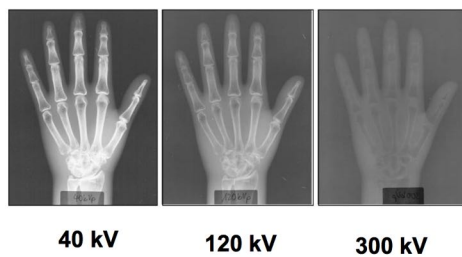
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Aumüller, Gerhard; Watzinger, Laurence J. (2018): Anatomie. 208 Tabellen. 2., überarb. Aufl. Stuttgart: Thieme (Duale Reihe).

50

## Fazit II

- Je höher die Energie der Strahlung, desto mehr wird diese aufgrund der Compton-Streuung und nicht mehr durch den Photoeffekt geschwächt
- Da die Compton-Streuung (nahezu) unabhängig vom Material gleich stark schwächt, geht der Kontrast verloren
- Zu niedrige Energien bedeuten eine zu weiche Strahlung, die nahezu vollständig im Körper absorbiert wird – es kann somit keine Strahlung mehr am Detektor detektiert werden



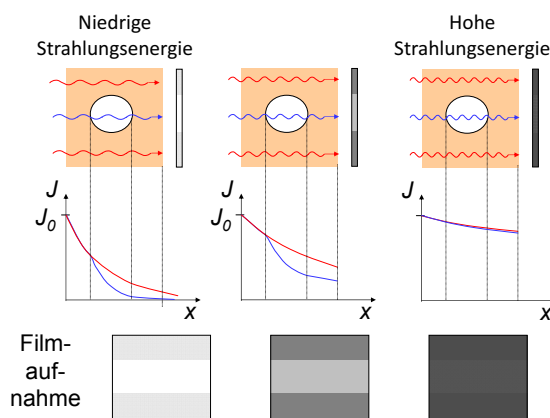
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Vorlesungsskript Physik für Mediziner „Wirkung und Nutzen von ionisierenden Strahlen I“ 2015, Universität Hamburg

51

## Fazit III

- Die Bildqualität hängt entscheidend von der gewählten Photonenenergie ab:



Niedrigere Strahlungsenergien sind mit einer erhöhten Absorption und somit einer erhöhten Gefahr für lebende Zellen verbunden.

Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: verändert nach Vorlesungsskript Biophysik 2011/12, Sommersemester Universität Budapest

52

# Effektive Ordnungszahl

- Der Photoeffekt ist stark abhängig von der Ordnungszahl
- Im Organismus kommen jedoch Stoffgemische/Verbindungen vor, sodass eine „durchschnittliche“ Ordnungszahl der Verbindung bestimmt werden muss – die effektive Ordnungszahl:

$$Z_{eff} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^n w_i \cdot Z_i^3}$$

$Z_i$ : Ordnungszahl des i-ten Atoms  
 $w_i$ : Elektronenzahlverhältnis des i-ten Atoms

- Bei der effektiven Ordnungszahl handelt es sich um kein arithmetisches Mittel

Karim Kouz, Biophysik SS2017

53

# Effektive Ordnungszahl

- Beispielrechnung für Wasser ( $H_2O$ ):
  - Ordnungszahl von Wasserstoff ist 1
  - Ordnungszahl von Sauerstoff ist 8
  - Insgesamt 10 Elektronen (8 von Sauerstoff und je 1 von Wasserstoff)
  - Elektronenzahlverhältnis für Wasserstoff ist  $2/10 = 0,2$
  - Elektronenzahlverhältnis für Sauerstoff ist  $8/10 = 0,8$

$$Z_{eff} = \sqrt[3]{0,2 \cdot 1^3 + 0,8 \cdot 8^3} = 7,4$$

Gewebe	$Z_{eff}$
Fett	6
Weichteile	7,4
Knochen	13,8

Karim Kouz, Biophysik SS2017

54

# Kontrast bei der Röntgenaufnahme

- Der Photoeffekt erhöht den Kontrast:

$$\frac{\tau_{m, Knochen}}{\tau_{m, Weichteil}} = \frac{Z_{eff, Knochen}^3}{Z_{eff, Weichteil}^3} = \frac{13,8^3}{7,4^3} = 6,5$$

- Der Compton-Effekt erniedrigt den Kontrast:

$$\frac{\sigma_{m, Knochen}}{\sigma_{m, Weichteil}} = 1$$

- Der Kontrast ist abhängig von der Ordnungszahl und der Dichte des durchleuchteten Materials:

$$\mu_m = \tau_m + \sigma_m$$

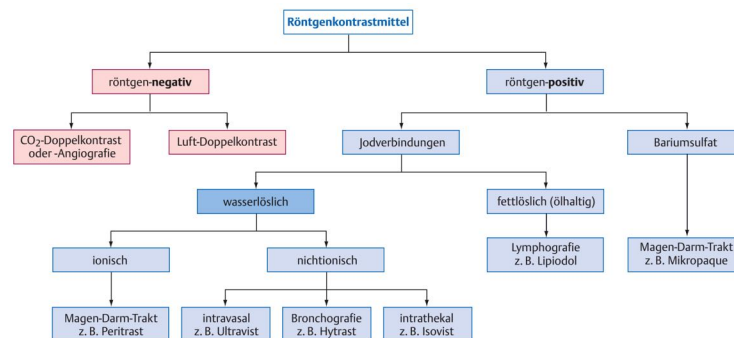
$$\mu = \mu_m \cdot \rho$$

Karim Kouz, Biophysik SS2017

55

# Kontrastmittel

- Eine von außen applizierte Substanz (Flüssigkeit, Feststoff, Gas), die Kontraste schafft, die durch herkömmliche Bilder (Röntgen, CT, MRT,...) nicht vorliegen
- Strukturen werden damit durch einen künstlichen Kontrast sichtbar gemacht
- Man unterscheidet zwischen positiven und negativen Röntgenkontrastmitteln



Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Duale Reihe Radiologie 3. Auflage, M. Reiser, F. P. Kahn; Thieme Verlag

56

## Positive Kontrastmittel

- Erhöht die Absorption der Strahlung
- Beinhaltet Verbindungen mit hoher Ordnungszahl (Iod oder Barium)
  - Iodhaltige KM für Angiographien
  - Bariumhaltige KM für Magen-/Darmuntersuchungen
- Schwächungskoeffizient und Massenschwächungskoeffizient werden größer



Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: <http://www.med.uni-bonn.de/~hy/lunge/5ammHGF.html>; <http://www.klinik.uni-heidelberg.de/fkadmin/radiologie/radiodiagnostik/FallSammlung/casus/425/mah7.html>

57

## Negative Kontrastmittel

- Reduziert die Absorption der Strahlung
- Problem: Es ist schwierig, Stoffe zu finden, die niedrigere Ordnungszahlen besitzen als z.B. Weichteilgewebe
- Reduzierung erfolgt über Stoffe mit niedriger Dichte (z.B. Luft, CO<sub>2</sub>, Methylcellulose)
- Durch Dichteverringern wird der Schwächungskoeffizient kleiner
- Massenschwächungskoeffizient und effektive Ordnungszahl verändern sich nicht



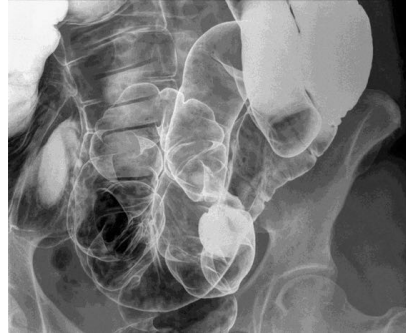
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: <http://www.giftszentrum-bremen.de/aktuell/archiv/2011/02/19/027-coentgen-mit-luft-in-den-arm>

58

## Doppelkontrast

- Gleichzeitige Anwendung von einem positiven und einem negativen KM (z.B. Luft und Bariumsulfat)
- Schafft durch unterschiedliche Mechanismen einen stärkeren Kontrast als ein Kontrastmittel allein
- So wird z.B. durch Einblasen von Luft das Darmlumen aufgebläht und das bariumhaltige Kontrastmittel an die Darmwand gedrückt



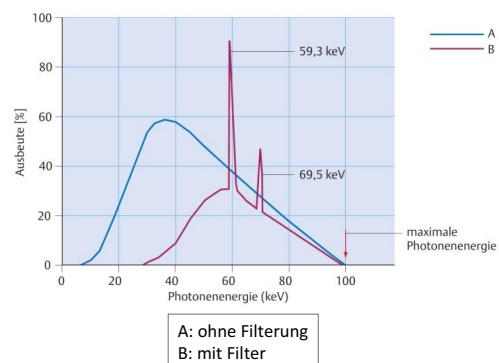
Quelle: <http://www.klinikum.uni-heidelberg.de/filadmin/radiologie/radiodiagnostik/all-sammlungen/images/normalbefunde/colon/k7.html>

Karim Kouz, Biophysik SS2017

59

## Filterung der Röntgenstrahlung

- Röntgenstrahlung ist polychromatisch (sowohl weiche als auch harte Strahlung)
- Der Schwächungskoeffizient der Strahlung ist u.a. von der Wellenlänge (Energie) der Strahlung abhängig – harte Strahlung hat einen kleineren Schwächungskoeffizienten als weiche Strahlung
- Weiche Strahlung wird nahezu vollständig vom Körper absorbiert:
  - Sie trägt keinen wesentlichen Teil zur Bildgebung bei (erreicht den Detektor nicht)
  - Hohe Strahlenbelastung
  - Besserer Weichteilkontrast
- Weiche Strahlung sollte somit bei vielen Untersuchungen herausgefiltert werden, z.B. durch die Verwendung eines Aluminium- oder Kupferfilters
- Der Filter macht die Strahlung monochromatischer durch Filterung der weichen Strahlung



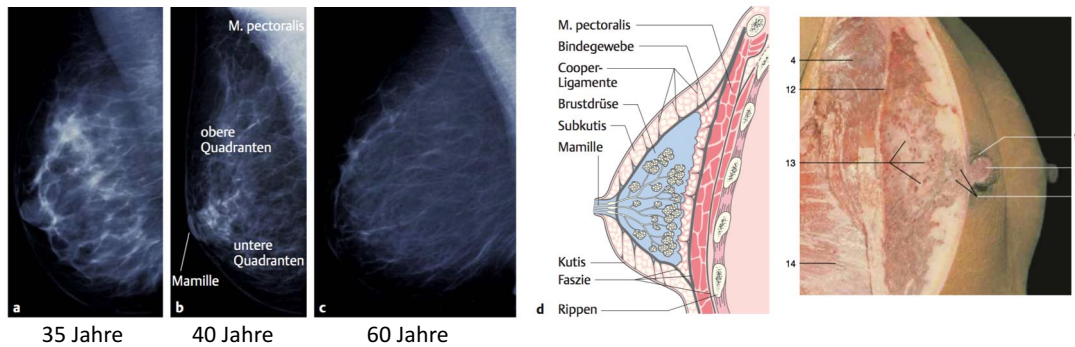
Quelle: Danks Reihe Radiologie 3. Auflage, M. Reiser, F.-P. Kuhn, Thieme Verlag

Karim Kouz, Biophysik SS2017

60

## Kontraste in der Mammographie

- Problem:
  - Altersbedingte Unterschiede der Anatomie
  - Absorptionsunterschiede der verschiedenen Weichteilstrukturen der Mamma sind gering



35 Jahre

40 Jahre

60 Jahre

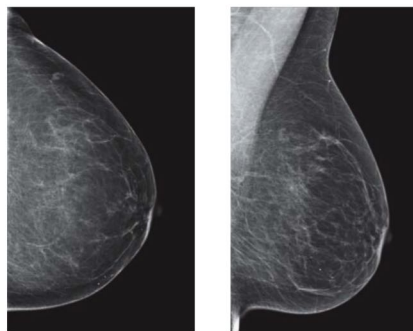
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Duale Reihe Radiologie 3. Auflage: M. Reiser, F.-P. Kuhn, Thieme Verlag; Color Atlas of Anatomy, Sobotta, Thieme-Verlag; 7th Edition: Schattauer

61

## Kontraste in der Mammographie

- Um trotz der geringen Absorptionsunterschiede einen guten Kontrast zu erhalten, wird die Mammographie in der sogenannten Weichstrahltechnik durchgeführt
- Hierzu wird z.B. die charakteristische Strahlung des Molybdäns verwendet – eine monochromatische und weiche Strahlung (wird hier nicht herausgefiltert)



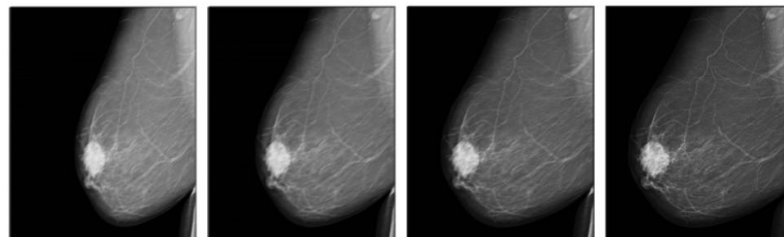
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Duale Reihe Radiologie 3. Auflage: M. Reiser, F.-P. Kuhn, Thieme Verlag

62

# Kompression bei der Mammographie

- Durch Kompression der Brust während der Aufnahme kann man folgende Probleme vermindern:
  - Niedriger Kontrast (geringe Absorptionsunterschiede, Streustrahlung)
  - Bewegungsunschärfe
  - Geometrische Unschärfe
  - Strahlenbelastung



0%

25%

50%

100%

Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: <http://www.gettyimages.de/detail/photo/womans-breast-being-compressed-for-a-high-res-stock-photography/128590587>; Vorlesungsskript Physik für Mediziner, „Wirkung und Nutzen von ionisierender Strahlung 1“ 2015, Universität Hamburg

63

# Kollimator

- Technisches Bauteil aus z.B. Blei oder Wolfram, das Röntgenstrahlung auf einen Bereich bündelt und fokussiert
- Nur Strahlung, die (nahezu) senkrecht durch das Loch geht, kann passieren – der Rest der Strahlung wird vollständig absorbiert
- Der Kollimator verbessert den Strahlenschutz und vermindert Streustrahlung



Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: [http://www.kunststoffwerk.uni.de/information/artikel\\_daten.php?id=4990](http://www.kunststoffwerk.uni.de/information/artikel_daten.php?id=4990)

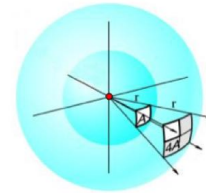
64



# Abstand und Strahlenbelastung

- Die Leistung verteilt sich auf die geometrische Form einer Kugel
- Die Intensität nimmt mit wachsendem Abstand wie folgt ab:

$$J = \frac{\Delta P}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \sim \frac{1}{r^2}$$



Oberfläche einer Kugel:  $A = 4 \cdot \pi \cdot r^2$

- Die Röntgenröhre ist ein Punktstrahler und strahlt in den Raum einer Halbkugel:

$$J = \frac{\Delta P}{2 \cdot \pi \cdot r^2} \sim \frac{1}{r^2}$$

Karim Kouz, Biophysik WS2014/2015

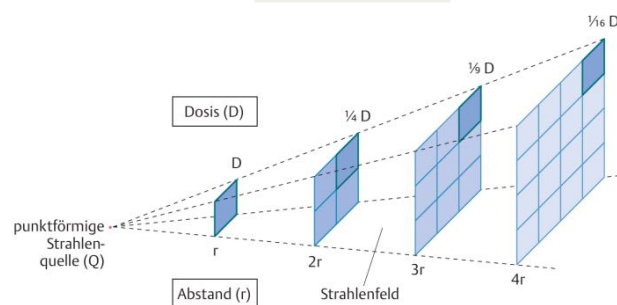
Quelle: Vorlesungsskript Biophysik SS 2012 Sommer Universität

65

# Abstand und Strahlenbelastung

- Die Intensität nimmt mit dem Quadrat des Abstandes ab:

$$J = \frac{\Delta P}{2 \cdot \pi \cdot r^2} \sim \frac{1}{r^2}$$



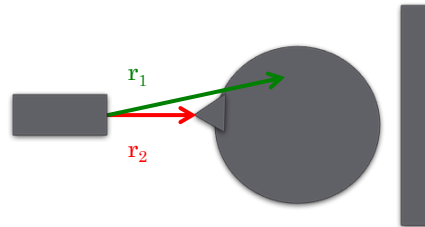
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Duale Reihe Radiologie 3. Auflage, M. Reiser, F.-P. Kuhn, Thieme Verlag

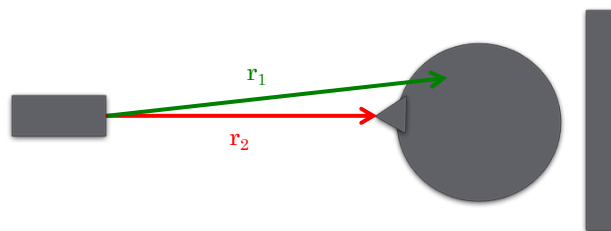
66

## Abstand und Strahlenbelastung

- Verhältnis der Radien:  $\frac{r_1}{r_2} \approx 2$
- Große Intensitäts- und Strahlenbelastungsunterschiede



- Verhältnis der Radien:  $\frac{r_1}{r_2} \approx 1$
- Nahezu homogene Intensitäts- und Strahlenbelastungsverteilung



Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Karim Kouz (03/2015)

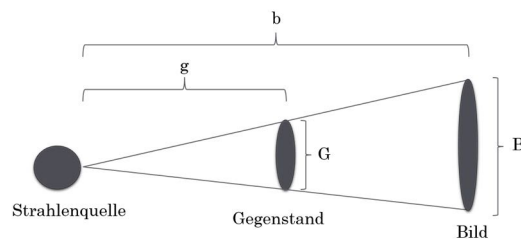
67

## Abstand und Vergrößerung

- Für die Vergrößerung gilt:

$$V = \frac{B}{G} = \frac{b}{g}$$

- Der Abstand der Röntgenröhre zum Objekt sollte so gewählt werden, dass dieser möglichst groß ist, um die Bildrelation zu wahren
- Organe, die weit vorne liegen, würden ansonsten unverhältnismäßig groß im Vergleich zu anderen abgebildet werden



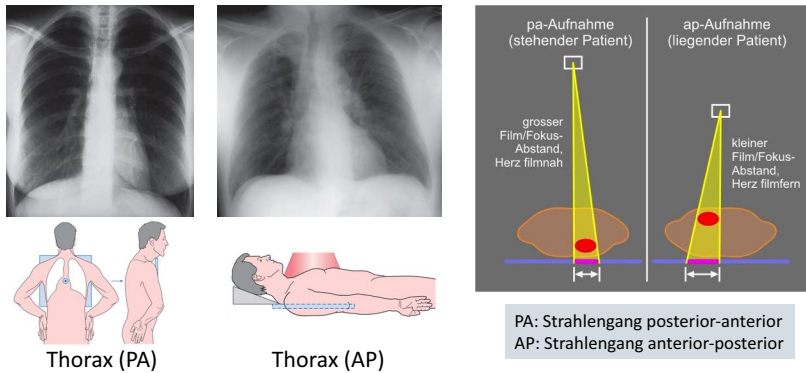
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Karim Kouz (03/2015)

68

## Abstand und Vergrößerung

- Bei der Befundung von Röntgenbildern sollte immer der Strahlengang mit beachtet werden, um geometrische Verzerrungen nicht falsch zu interpretieren



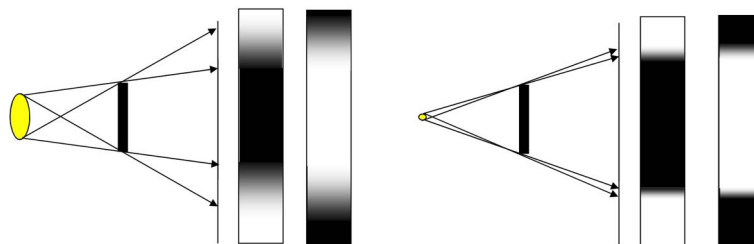
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: verändert nach Diale, Radiologie 3. Auflage, M. Reiser, F. P. Kuhn, Thieme Verlag, http://e-learning.studmed.uni-erlangen.de/radiologie/film/print\_all.htm?radioverf%2Cauthora%2Cklassisch%2Cstandardmod

69

## Bildschärfe

- Um die Bildschärfe zu optimieren, ist eine möglichst kleine Strahlenquelle zu wählen
- Die Schattenverläufe werden dadurch klarer und das Bild wirkt nicht verwischt
- Umsetzung:
  - Beschleunigte Elektronen werden auf einen Punkt der Anode fokussiert
  - Die sich dabei stark erwärmende Anode wird durch Drehen (Drehanode) bzw. durch Kühlung (Kühlkopf) vor übermäßiger Erhitzung und einhergehender Zerstörung geschützt



Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Vorlesungs-Mkript Biophysik SS 2012, Sammelklausur Universität

70



# (III) Spezielle Röntgenverfahren

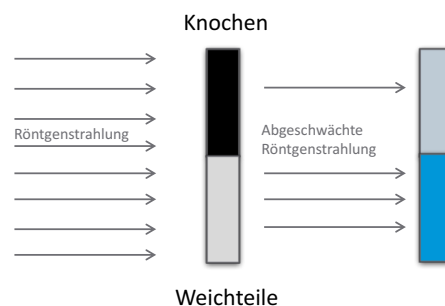
Karim Kouz

SS2017 2. Semester Biophysik

## Szintillationsbildschirm

- Hinter dem zu durchleuchtenden Körper wird ein großer Szintillationskristall positioniert
- Abhängig davon, wie stark die Röntgenstrahlung durch den Körper geschwächt wurde, leuchtet der Kristall mehr oder weniger stark auf
- An Stellen starker Abschwächung leuchtet der Kristall weniger hell

Beachte: Umgekehrte Farben im Vergleich zum Röntgenfilm – Knochen ist auf dem Röntgenfilm weiß (hell), bei diesem Verfahren jedoch dunkel.



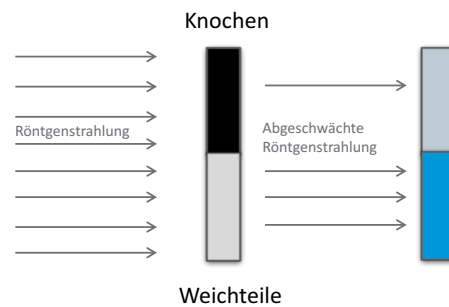
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Karim Kouz (02/2016)

74

# Szintillationsbildschirm

- Röntgenstrahlung wird durch „Aufleuchten“ des Kristalls sichtbar gemacht
- Vorteile:
  - Keine Entwicklungszeit
  - Manipulationen sind direkt beobachtbar (Lichtintensitäten ändern sich z.B. bei Veränderung der Knochenstellung)
- Nachteile:
  - Hohe Strahlenbelastung/Expositionszeit – Verfahren wird daher in der Art nicht mehr angewendet
  - Sehr schwaches Fluoreszenzlicht
- Lösung: Bildverstärker



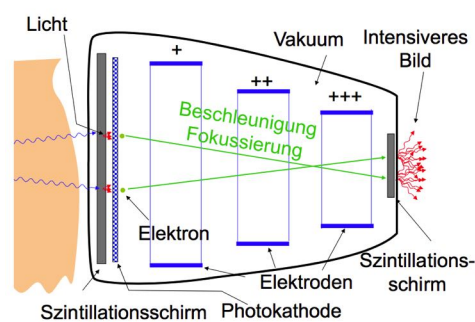
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Karim Kouz (02/2018)

75

# Bildverstärker

- Besteht primär aus:
  - 2 Szintillationsschirmen
  - Photokathode
  - Elektroden/Elektrodenlinsen
- Licht kann an sich nicht verstärkt werden – es muss zur Verstärkung in ein elektrisches Signal umgewandelt werden
- Das elektrische Signal kann jetzt verstärkt werden und wird dann wieder in Licht umgewandelt



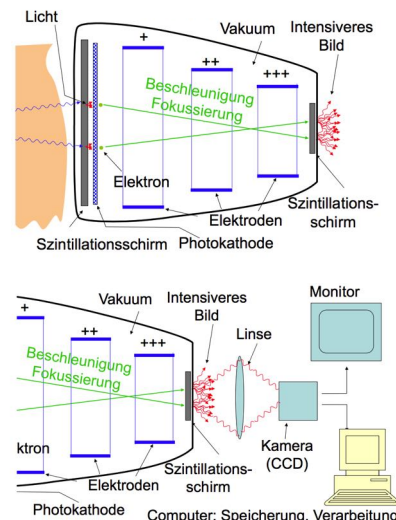
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Vorlesungsskript Biophysik SS 2012 Semmelweis Universität

76

## Vorgänge beim Bildverstärker

- Röntgenstrahlung bringt den ersten Szintillationsschirm durch Anregung zum Leuchten (schwach)
- Lichtphotonen lösen an der dahinter positionierten Photokathode den äußeren photoelektrischen Effekt aus
- Ausgelöste Elektronen werden durch Elektronenlinsen (Anoden) beschleunigt und gebündelt (steigende Spannung von Linse zu Linse)
- Elektronen treffen auf den zweiten Fluoreszenzschirm und es findet erneut Anregung statt
- Fluoreszenzschirm leuchtet (stark)
- Bild kann nun betrachtet bzw. digitalisiert werden



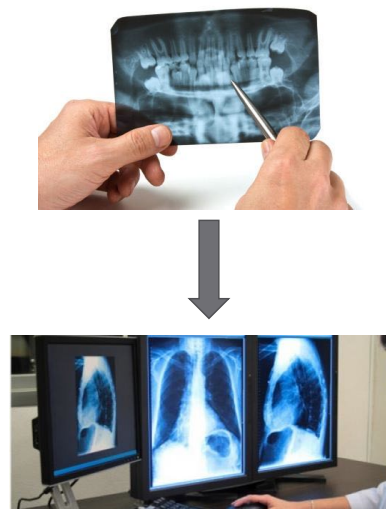
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Vorlesungsskript Biophysik SS 2012, Semmelweis Universität

77

## Digitale direkte Röntgentechnik

- Konventionelle Röntgenfilme werden durch digitalisierte Bilder ersetzt, z.B. mit Hilfe von Flat-Panel-Detektoren
- Vorteile:
  - Digitalisiertes Bild ist überall verfügbar und muss nicht erst gesucht werden (PACS – Picture Archiving and Communication System)
  - Digitalisierte Bilder können nachbearbeitet werden
  - Erweiterte Auswertungen am Computer sind möglich (z.B. Größenbestimmung,...)
  - Bilder können innerhalb kürzester Zeit verschickt werden (Fernbefundung,...)
  - Archivierung ohne Qualitätsverlust
  - Niedrigere Strahlenbelastung
  - Schnellere Untersuchungszeiten



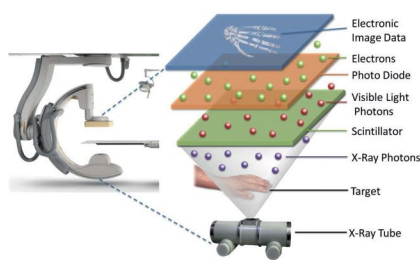
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: <http://www.stm.de/gesundheits/zukunft/typen/röntgen-die-strahlendose-kann-das-immer-nach-aussen-407941.html>; <http://www.dba-ug.de/foag/digital-röntgenbilder-in-der-medizin/>

78

## Flat-Panel-Technik

- Klassische Röntgenfilme, die durch eine photochemische Reaktion durch die Röntgenstrahlung geschwärzt werden, finden heutzutage keine Anwendung mehr
- Stattdessen werden sogenannte Flachbilddetektoren (flat panel detector) verwendet
- Indirekte Detektoren:
  - Nadelförmige Szintillationskristalle werden durch die Röntgenstrahlung zum Leuchten angeregt
  - Das erzeugte Licht wird mittels Fotodioden registriert und das Signal an einen Computer weitergeleitet, an dem das Bild rekonstruiert und digitalisiert gespeichert wird
  - Die Nadelkristalle wirken wie Lichtleiter und haben verminderte Streuwerte – die Auflösung des Bildes wird besser



Karim Kouz, Biophysik SS2015

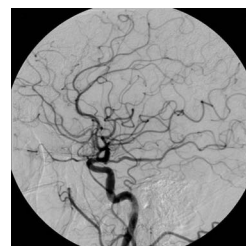
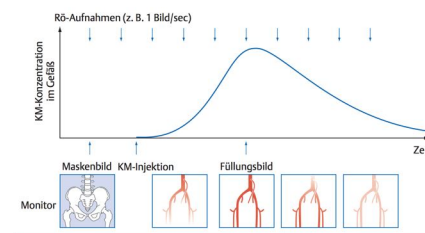


Quelle: <https://www.tue.nl/en/university/departments/applied-physics/education/applied-physics/graduate-program/design-and-technology-of-instrumentation/program/design-projects/transparent-barriers-on-scintillators/>; <http://www.medicalexpo.de>

79

## Digitale Subtraktionsangiographie (DSA)

- Für diese Untersuchung müssen die Röntgenbilder digital gespeichert sein
- Es werden mindestens zwei Bilder angefertigt:
  - Erstes Röntgenbild (Basisbild/Maskenbild): Anfertigung eines Bildes, das das zu untersuchende Gefäß enthält
  - Zweites Röntgenbild (Füllungsbild): Exakt gleicher Bildausschnitt wie bei dem Basisbild, jedoch wurde in das zu untersuchende Gefäß Kontrastmittel gespritzt
- Computer subtrahiert das Füllungsbild vom Basisbild (alles, was auf beiden Bildern gleich ist, „verschwindet“)
- Es bestehen viele weitere Bearbeitungs- und Auswertungsmöglichkeiten



Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Duale Reihe Radiologie 3. Auflage, M. Reiser, F. P. Kain; Thieme Verlag; [http://dx.wikiwand.org/de/wiki/Digitale\\_Subtraktionsangiographie](http://dx.wikiwand.org/de/wiki/Digitale_Subtraktionsangiographie)

80



## Dual-Energy

- Anfertigung von zwei exakt gleichen Röntgenaufnahmen mit jedoch unterschiedlichen Röntgenenergien
- Strukturen haben, abhängig von der Strahlungsenergie, unterschiedliche Absorptionskoeffizienten
- Subtraktion der beiden Bilder ermöglicht somit z.B. die „Entfernung“ von Knochen aus dem Bild zur präzisen Darstellung des Thorax
- Bild mit harter Strahlung: fast nur Knochen ist zu sehen
- Bild mit weicher Strahlung: Knochen und Weichteilgewebe sind zu sehen



Weiche Strahlung



Harte Strahlung



Bone Subtracted



Tissue Subtracted

Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: [http://en.wikipedia.org/wiki/Basic\\_Physics\\_of\\_Nuclear\\_Medicine/Dual\\_Energy\\_Absorptiometry](http://en.wikipedia.org/wiki/Basic_Physics_of_Nuclear_Medicine/Dual_Energy_Absorptiometry)

81

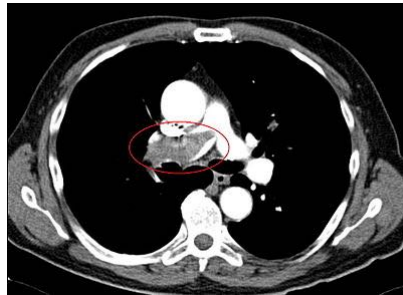
## (IV) Röntgentomographie

Karim Kouz

SS2017 2. Semester Biophysik

## Wofür brauchen wir Schnittbilder?

- **Schnittbilder haben viele Vorteile gegenüber konventionellen Röntgenbildern:**
  - Bessere Beurteilung komplizierter Verletzungen
  - Feststellung von Verletzungen/Prozessen, die nicht mit herkömmlichen Bildern erfasst werden können
  - Weit aus mehr Möglichkeiten der Vermessung/Auswertung,...
  - Spezial-Untersuchungen



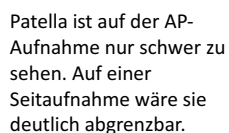
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: [http://de.wikibooks.org/wiki/Sammlung\\_Medizin:Lunge](http://de.wikibooks.org/wiki/Sammlung_Medizin:Lunge)

83

# Summationsbild vs. Schnittbild

- Konventionelles Röntgenbild = Summationsbild = durchschnittliche Schwächung der Röntgenstrahlung – kein räumlicher Eindruck auf einem einzigen Bild vermittelbar (fast immer mindestens zwei Ebenen anfertigen)



Auf der AP-Aufnahme ist die Hinterkantenfraktur der Tibia nicht zu sehen.



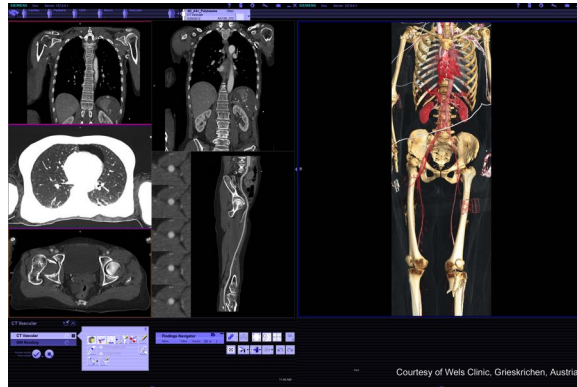
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: <http://www.biberburg.de/img/photo/Roentgen-Knie-1.jpg>; [http://www.meriv-research.de/~hjh/SielTraum/mmsSiTr/inatralld/traillg\\_volkim\\_06.JPG](http://www.meriv-research.de/~hjh/SielTraum/mmsSiTr/inatralld/traillg_volkim_06.JPG)

84

# Tomographische Verfahren

- Tomographische Bilder = Schnittbilder (Schnitt ist senkrecht zur Körperachse)
- Technische Verfahren ermöglichen auch andere Schnittführungen
- Zwei Typen:
  - Absorptionstomographien: CT und MRT
  - Emissionstomographie: SPECT und PET



Courtesy of Wels Clinic, Grieskirchen, Austria

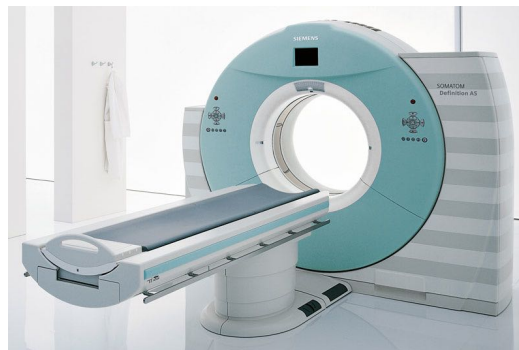
Karim Kouz, Biophysik SS2017

85

Quelle: [http://health.liebert.com/CT\\_Application/omatomissions/index.php/wels-clinic-miles-on-scanner-sharing/](http://health.liebert.com/CT_Application/omatomissions/index.php/wels-clinic-miles-on-scanner-sharing/)

# Aufbau eines Computertomographen

- Ein CT-Gerät besteht aus:
  - Gantry (Hochspannungsgenerator, Röntgenröhre, Detektoren, Blendensysteme, Kühlung)
  - Patientenlagerungstisch
  - Bedienungseinheit
  - Computer



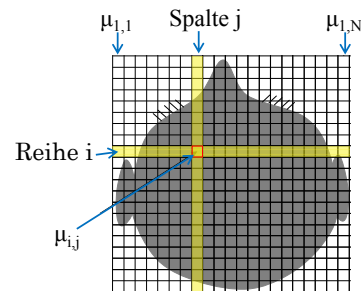
Karim Kouz, Biophysik SS2017

86

Quelle: [http://www.radiologie-baden-baden.de/cms/front\\_content.php?idcat=38](http://www.radiologie-baden-baden.de/cms/front_content.php?idcat=38)

# Grundlagen der CT

- CT = computed tomography
- Im Gegensatz zur konventionellen Röntgenaufnahme entsteht hier nicht unmittelbar ein Bild – das Bild muss nach der Untersuchung erst berechnet werden
- Grundprinzip:
  - Die zu untersuchende Schicht wird in viele kleine Quadrate aufgeteilt
  - Einzelheiten, die kleiner sind als ein solches Quadrat, werden nicht aufgelöst – die Auflösung des Bildes hängt von der Größe der Quadrate ab
  - Für jedes dieser Quadrate wird ein Schwächungskoeffizient bestimmt, der innerhalb eines jeden Quadrates als konstant angesehen wird



Quelle: Verändert nach Vorlesungsskript Biophysik SS 2012, Sammelweis Universität

87

Karim Kouz, Biophysik SS2017

# Grundlagen der CT

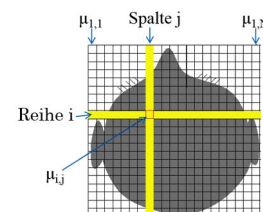
- Bei einer Messung kann lediglich der Schwächungskoeffizient einer ganzen Reihe/Spalte bestimmt werden („Summationsaufnahme“)
- Die Röntgendichte einer solchen Reihe/Spalte berechnet sich nach:

$$D_i = \lg \frac{J_0}{J_i}$$

- Die Röntgendichte ist eine additive Größe, d.h. die Röntgendichten der einzelnen Quadrate einer Reihe/Spalte aufsummiert ergeben die Röntgendichte der gesamten Reihe/Spalte:

$$D_{i,j} = \lg \frac{J_{i,j,0}}{J_{i,j}} \sim \mu_{i,j}$$

$$D_i = \sum_{j=1}^n D_{i,j}$$



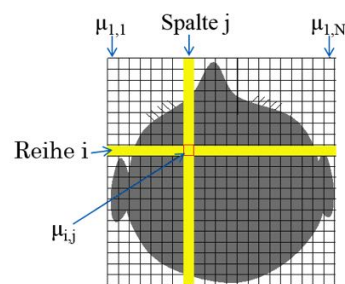
Quelle: Verändert nach Vorlesungsskript Biophysik SS 2012, Sammelweis Universität

88

Karim Kouz, Biophysik SS2017

## Von der Reihe/Spalte zum Quadrat

- Ziel ist es, den Schwächungskoeffizienten eines jeden Quadrates zu bestimmen
- Bei der Vermessung aller Reihen/Spalten erhält man  $N$  Messwerte
- Das ganze Bild enthält jedoch  $N \times N$  Quadrate und somit  $N \times N$  zu bestimmende Messwerte (Schwächungskoeffizienten)
- Um  $N \times N$  Messwerte zu bestimmen, müssen  $N \times N$  verschiedene Messungen durchgeführt werden – es müssen also Aufnahmen aus mehreren Richtungen gemacht werden



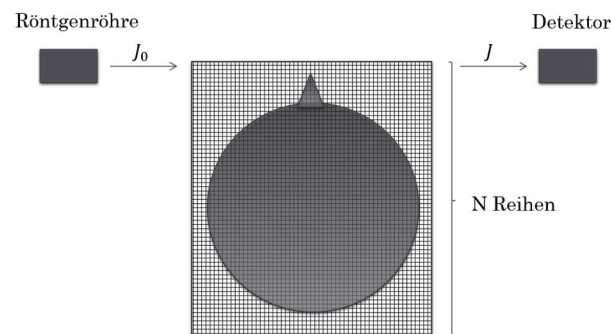
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Verändert nach Vorlesungsskript Biophysik SS 2012, Sigmund-Welt Universität

89

## Prinzip der Abtastung

- Die 1. Generation von CT-Geräten basierte auf dem Prinzip der Abtastung
- Nach der 1. Abtastung wurden  $N$  Messwerte von  $N$  Reihen gemessen



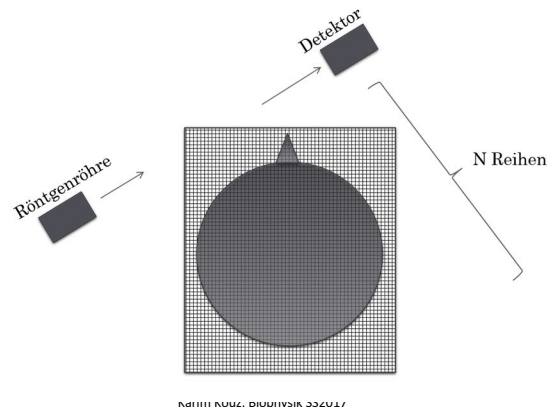
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Karim Kouz (08/2019)

90

# Prinzip der Abtastung

- Nach der 1. Abtastung wird die Röntgenröhre mit dem Detektor um einen bestimmten Winkel gedreht und das Objekt wird erneut abgetastet
- Nach der 2. Abtastung wurden weitere N Messwerte von N Reihen bestimmt

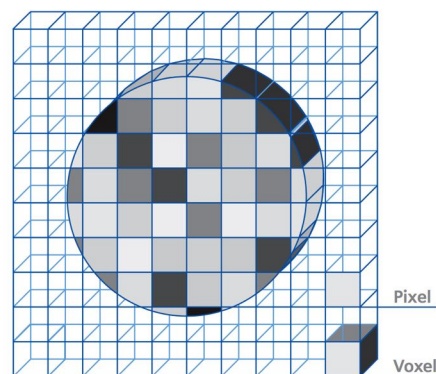


Quelle: Karim Kouz (03/2015)

91

# Prinzip der Abtastung

- Ein herkömmliches Bild besteht aus 512 x 512 Bildpunkten (Quadraten) oder sogar mehr
- Es müssten also pro Bild mehr als rund 250.000 Messungen durchgeführt und mathematisch ausgewertet werden
- Nach der Berechnung eines solchen Bildes ist jedoch nur eine Schicht des Patienten fertig untersucht
- Das Prinzip der Abtastung ist also sehr zeitaufwändig
- Die ersten CT-Geräte benötigten allein für die Messzeit einer Schicht mehr als 5 Minuten



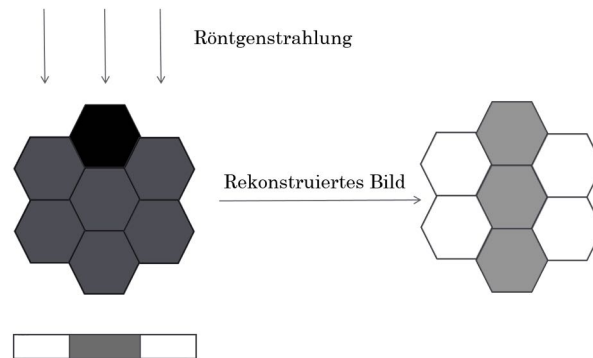
Quelle: Magnetische Spins und Resonanzen: Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Siemens medical

92

Karim Kouz, Biophysik SS2017

# Rückprojektion

- Das Gerät registriert die Schwächung der Röntgenstrahlung, kann den Grund der Schwächung jedoch nicht einem Quadrat zuordnen und schwärzt somit die komplette Reihe/Spalte ein



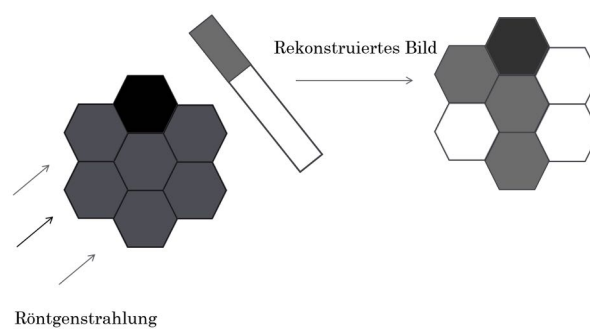
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Karim Kouz (03/2015)

93

# Rückprojektion

- Nach einer weiteren Messung aus einer anderen Richtung registriert das Gerät erneut eine Schwächung der Strahlung
- Erneut kann es die Schwächung nicht genau zuordnen und schwärzt die komplette Reihe/Spalte ein
- An der Stelle der Überschneidung der beiden Schwärzungen wird die Schwärzung intensiver



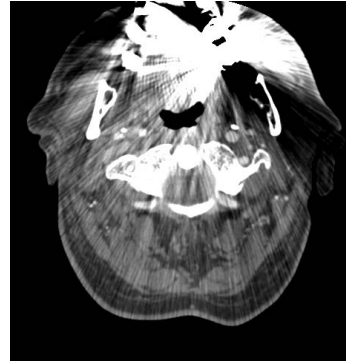
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Karim Kouz (03/2015)

94

# Rückprojektion

- Durch wiederholte Messungen kommt man immer näher an das „wahre“ Bild
- Auch hier wird die Röntgenröhre gedreht, jedoch wird nicht jedes Quadrat einzeln berechnet, sondern die Quadrate werden, je nach Anzahl der Schnittmengen, weniger bzw. stärker grau angefärbt
- Das Bild muss nachbearbeitet werden, da Felder grau angefärbt werden, obwohl diese nicht grau gehören (verwischtes Bild)
- Mit Hilfe eines mathematischen Verfahrens (Filterung/gefilterte Rückprojektion) wird das Bild wieder klar gemacht



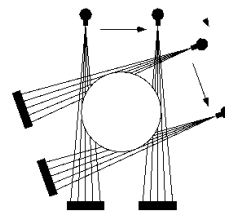
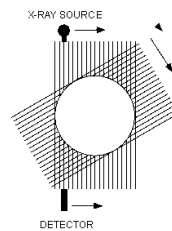
Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Gelfert/Rückprojektion>

95

Karim Kouz, Biophysik SS2017

## 1./2. Generation

- 1. Generation:
  - Röntgenröhre sendet einen Nadelstrahl aus
  - Röntgenröhre und gegenüberliegender Detektor führen Translations- und Rotationsbewegungen aus
- 2. Generation:
  - Röntgenröhre sendet einen Fächerstrahl aus – weniger Translationsbewegung nötig
  - Gegenüberliegende breite Detektoren führen mit der Röntgenröhre Translations- und Rotationsbewegungen aus



Quelle: Verändert nach <http://www.ctlab.geo.utexas.edu/about-cf/essentials-of-computed-tomography/>

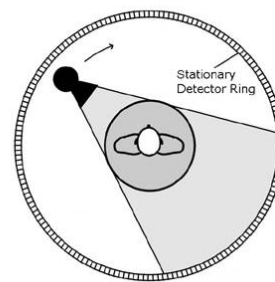
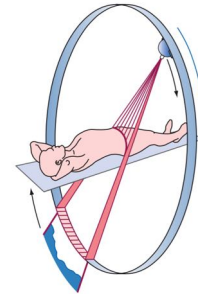
96

Karim Kouz, Biophysik SS2017



## 3./4. Generation

- 3. Generation:
  - Röntgenröhre sendet einen Fächerstrahl aus, der den gesamten Patientenquerschnitt durchstrahlt – keine Translation mehr nötig
  - Gegenüberliegendes Kreissegment aus Detektoren dreht sich mit der Röntgenröhre um den Patienten
- 4. Generation:
  - Lediglich die Röntgenröhre dreht sich um den Patienten unter Aussendung eines Fächerstrahls
  - Ein stationärer (sich nicht drehender) Detektorring detektiert die Röntgenstrahlung



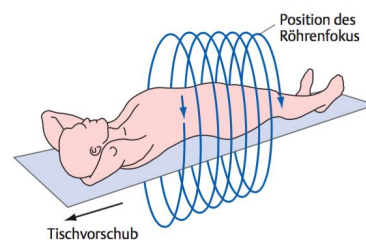
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Diale Reihe Radiologie 3. Auflage: M. Reiser, F.-P. Kuhn, Thieme Verlag. Verändert nach <http://www.bmbl.com/books/en/1.511.1.25/>

97

## 4. Generation

- Einzelschicht-CT
  - Problem: Kabel für die Hochspannungszufuhr der Röntgenröhre und die Messdatenübertragung rollen sich bei der Umdrehung auf
  - Lösung: Nach einer 360°-Umdrehung muss sich die Messeinheit zurückdrehen – in dieser Zeit wird der Patiententisch in Körperlängsachse vorgeschoben
- Spiral-CT:
  - Durch den Einbau eines Schleifringsystems als Spannungszuführung muss keine Drehrichtungsänderung zur Kabelrückführung mehr stattfinden
  - Der Patiententisch kann sich kontinuierlich vorwärtsbewegen – die Röntgenröhre beschreibt dann eine spiralförmige Bahn um den Patientenkörper



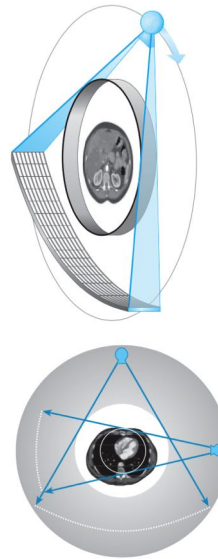
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Diale Reihe Radiologie 3. Auflage: M. Reiser, F.-P. Kuhn, Thieme Verlag

98

# Multislice-/Dual-Source-CT

- Multislice-CT = Mehrzeilen-CT = Multidetektor-CT (MDCT):
  - Scanner-Geometrie der 3. Generation
  - 2-256 (320) Detektorzeilen sind parallel nebeneinander angeordnet
  - Vorteile: hohe Rotationsgeschwindigkeit
- Dual-Source-CT:
  - Statt einer Röntgenröhre werden bei diesem Verfahren zwei um 90° versetzte Röntgenröhren verwendet, die mit unterschiedlicher Spannung betrieben werden können
  - Effektive Rotationszeit kann auf bis zu 165 ms reduziert werden – Anwendung bei der Herz-CT

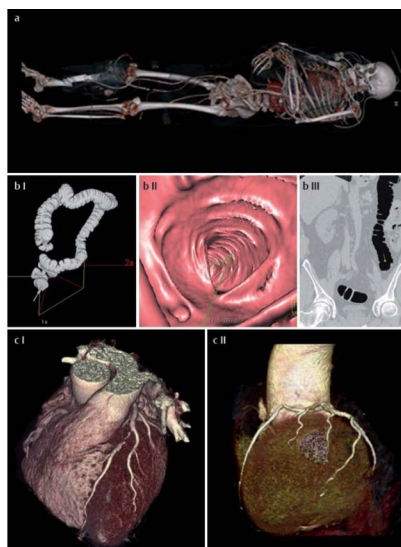


Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Duale Reihe Radiologie 3. Auflage, M. Reiser, F.-P. Kuhn, Thieme Verlag

99

# Multislice CT



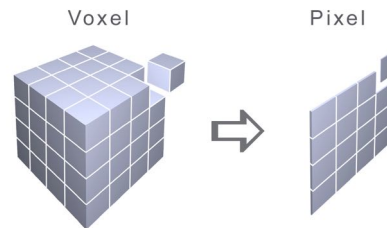
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Duale Reihe Radiologie 3. Auflage, M. Reiser, F.-P. Kuhn, Thieme Verlag

100

## Rekonstruierte Bilder

- Obwohl man von Schichtbildern spricht, besteht der abzubildende Körper aus 3-dimensionalen Bildeinheiten (Voxeln)
- Voxel = Pixel x Schichtdicke
- Jedes Element des zweidimensionalen Bildes (Pixel) repräsentiert also eine Volumeneinheit (Voxel)
- Je größer der Schwächungskoeffizient innerhalb eines Voxels, desto heller wird der Bildpunkt (Pixel) im Bild abgebildet (analog zum Röntgenfilm)
- Die Schichtdicke trägt entscheidend zur Auflösung des Bildes bei (heutzutage unter 1 mm)
- Kleine Objekte können nur dann abgebildet werden, wenn sie sich stark von der Umgebung abheben



Quelle: <http://doc.hu-berlin.de/dissertationen/helene-christian-nicolaus-2004-09-23/HTML/chapter1.html>

Karim Kouz, Biophysik SS2017

101

## CT-Werte

- Die Schwächung der Röntgenstrahlung ist neben der Zusammensetzung des Gewebes auch von der Strahlungsenergie abhängig
- Um einen von der Strahlungsenergie unabhängigen Wert zu erhalten und Gewebearten besser vergleichen zu können, wird in der CT der CT-Wert mit der Hounsfield-Einheit verwendet:

$$HU = \frac{\mu - \mu_{Wasser}}{\mu_{Wasser}} \cdot 1000$$

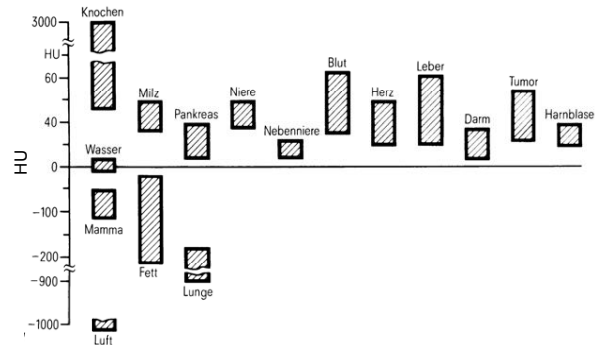
- „Eigenschaften“ des CT-Wertes:
  - Maß für die Dichte
  - Relativer Schwächungskoeffizient
  - Bezugswert ist Wasser

Karim Kouz, Biophysik SS2017

102

# Hounsfield-Skala

- Absoluter Nullpunkt bei  $-1000$  (CT-Wert von Luft) – nichts wird absorbiert
- CT-Wert von Wasser ist  $0$
- Knochen und Weichteilgewebe (bis auf wenige Ausnahmen) haben positive CT-Werte
- Lungengewebe hat einen negativen CT-Wert (ist größtenteils mit Luft gefüllt)
- Skala ist theoretisch nach oben offen – theoretisch sind unendlich große CT-Werte möglich



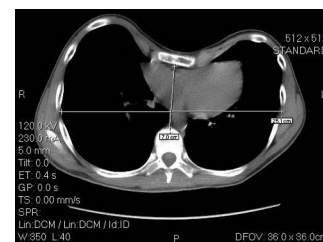
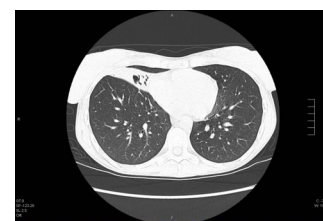
Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: Vorlesungsskript Biophysik SS 2012 Semmelweis Universität

103

# Fensterung

- Die CT-Werte werden im Computer-Tomogramm als Graustufen dargestellt
- Das menschliche Auge kann jedoch nur ca. 20 Graustufen unterscheiden
- Daher verwendet man das Prinzip der Fensterung:
  - Für jede Untersuchung wird eine geeignete Fenstereinstellung verwendet, die nur die zu beurteilenden Organstrukturen als Graustufen darstellt
  - CT-Werte ober- und unterhalb dieses Fensters werden einheitlich weiß oder schwarz dargestellt
- Besondere Fenster:
  - Lungenfenster
  - Weichteilfenster
  - Doppelfenster (zwei Fenster werden angepasst z.B. ein Weichteil- und ein Lungenfenster – die Bildqualität wird dadurch herabgesetzt, das Bild enthält jedoch mehr Informationen; unterschiedliche CT-Werte werden jetzt zum Teil gleich dargestellt)



Karim Kouz, Biophysik SS2017

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Fensterung\\_\(Computertomographie\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Fensterung_(Computertomographie))

104



# 3D-Darstellungen

- **Surface-Rendering:**
  - Oberflächenbetrachtung
  - Eingabe eines CT-Schwellenwertes: Es werden jetzt nur Strukturen dargestellt, die mindestens diesen Wert besitzen (z.B. Knochenoberfläche)
- **Volume-Rendering:**
  - „Transparentdarstellung“
  - Den CT-Werten werden Transparenz-Werte (Durchsichtigkeits-Werte) zugeordnet
  - Knochen hat die geringste (keine) Durchsichtigkeit und Luft die größte (komplette)



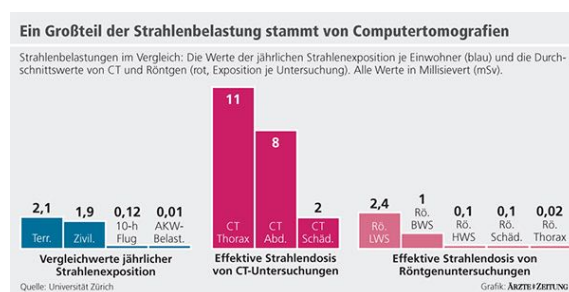
Quelle: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:3D\\_CT\\_of\\_bilateral\\_mandible\\_fracture.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:3D_CT_of_bilateral_mandible_fracture.jpg)

107

Karim Kouz, Biophysik SS2017

# Strahlenexposition

- Ca. 7% der radiologischen Untersuchungen sind CT-Untersuchungen
- Der Anteil der medizinisch bedingten Strahlenexposition aufgrund von CT-Untersuchungen beträgt jedoch ca. 54%



Quelle: <http://www.aerztezeitung.de/medizin/krankheiten/artikel/614353/weniger-strahlung-roentgen-aber-unzufriedene-stahlenschuetzer.html>

108

Karim Kouz, Biophysik SS2017