

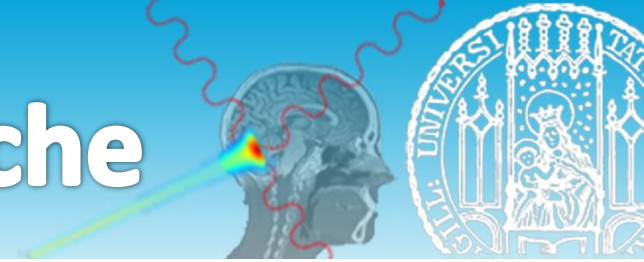
# Physik für Mediziner

## WS 2016/2017

**Jörg Schreiber**

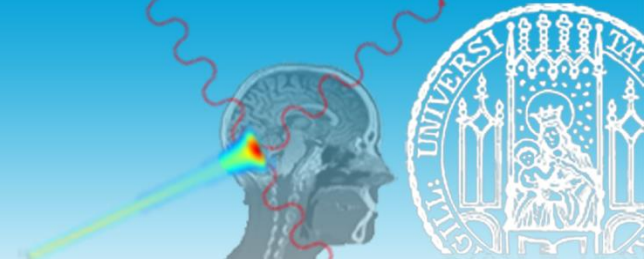
Department of Medical Physics,  
Am Coulombwall 1,  
85748 Garching  
[Joerg.Schreiber@lmu.de](mailto:Joerg.Schreiber@lmu.de)

Material: **Dr. Sabine Reinhardt**



WS

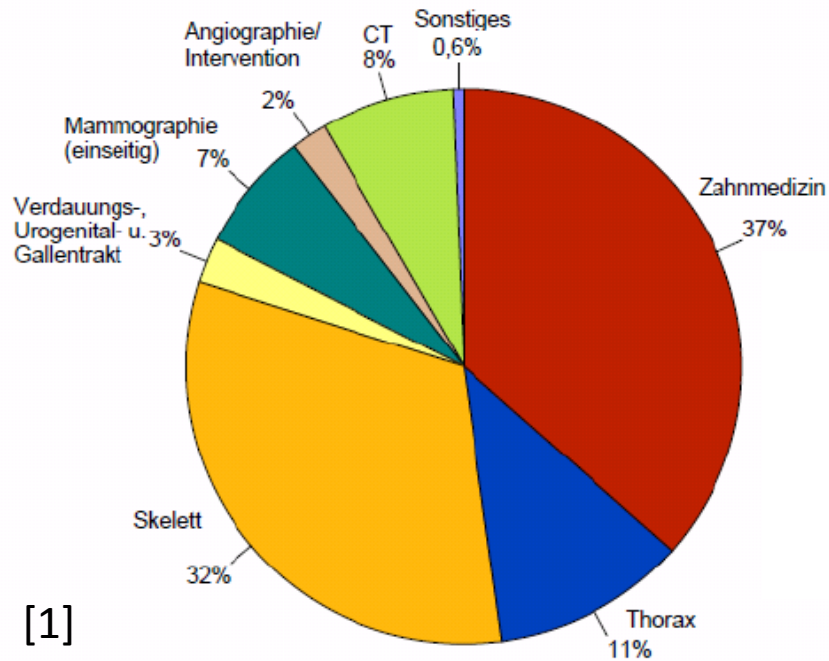
Versuch		Teilgebiet der Physik
SON	Sonographie	Mechanik
SIG	Akustische und elektrische Signale	Mechanik, Elektrizitätslehre
ZEL	Grundlagen zellulärer Erregbarkeit	Elektrizitätslehre
EKG	Elektrokardiographie	Elektrizitätslehre
ROE	Röntgenstrahlung	Strahlungsphysik
SS	<i>FLU</i>	<i>Hydromechanik</i>
	<i>KAL</i>	<i>Thermodynamik</i>
	<i>GAS</i>	<i>Thermodynamik</i>
	<i>LIN</i>	<i>Optik</i>
	<i>OIN</i>	<i>Optik</i>



# ATOM – UND STRAHLUNGSPHYSIK



Häufigkeit

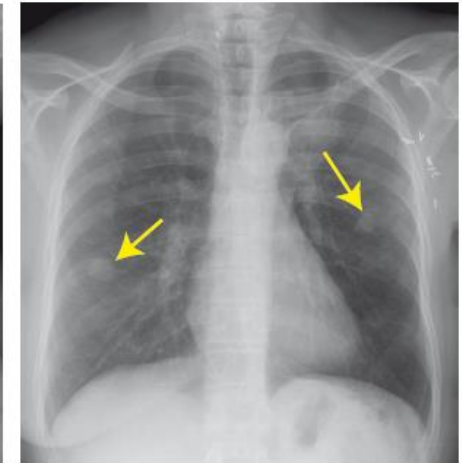


[1]

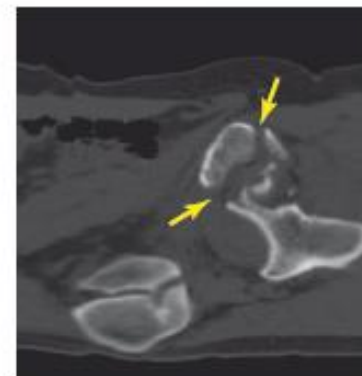
Radiographie



[2]



3D-CT



(a)

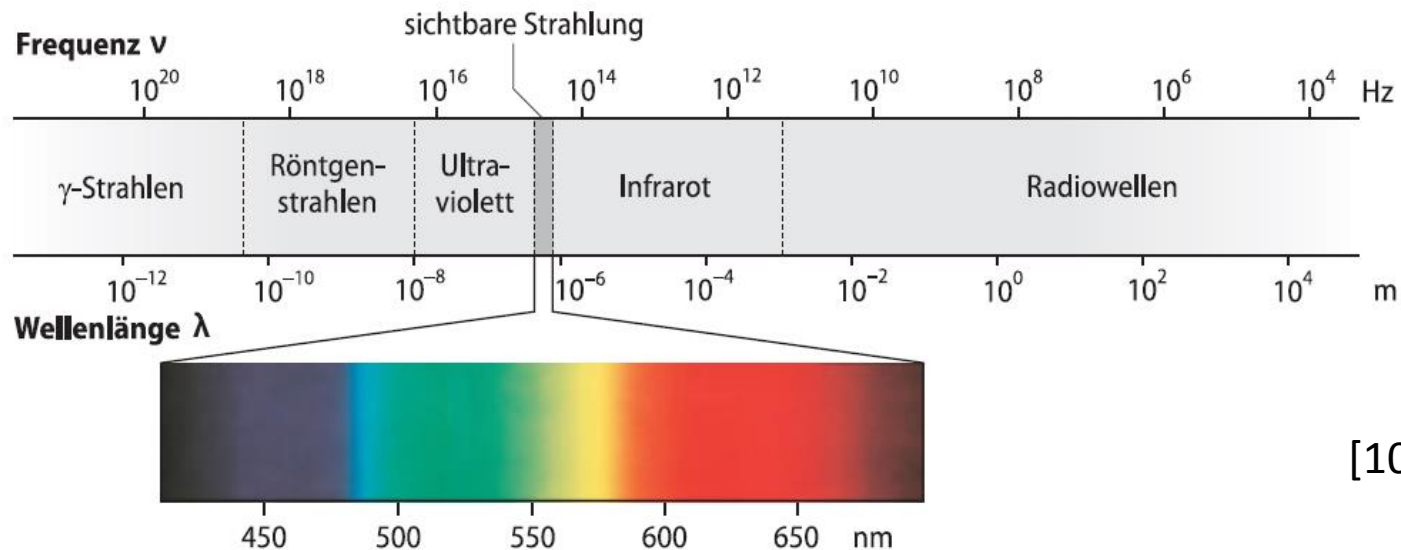


(b)

[2]

Entstehung von Röntgenstrahlung  
Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

# Elektromagnetisches Spektrum



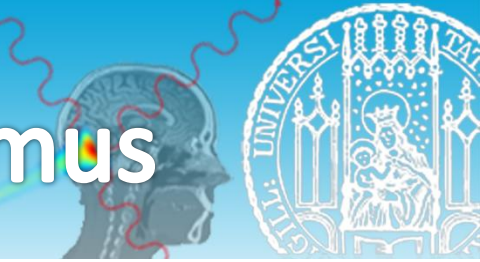
[10]

## Anwendungen in der Medizin

$\gamma$ -Strahlen:	Strahlentherapie
Röntgenstrahlen:	Diagnostik
UV-Strahlung:	Therapie Hautkrankheiten
Infrarot:	Wärmebehandlung (Rotlicht)
Radiowellen:	Veröden von Krampfadern



[13]



## Welle-Teilchen Dualismus:

Röntgenstrahlung hat gleichzeitig die

**Eigenschaften einer Welle**

und die

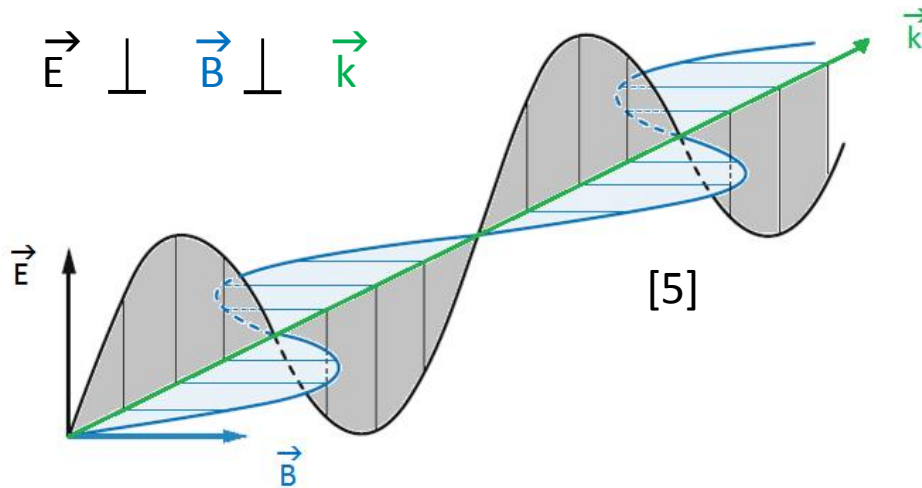
**Eigenschaften eines Teilchen**

Exp:  
Einzelphotonen



Welche Eigenschaft zum Vorschein tritt bestimmt die Art der  
Messung





**Energie:**  $E = h \cdot f$

Planck'sches Wirkungsquantum  
 $h = 6.6262 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

**Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium**  $c = \lambda \cdot f$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit hängt vom Medium ab.

Vakuumlichtgeschwindigkeit:  $c_0 = 2,9971 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

# Photonen - Teilcheneigenschaft



Eigenschaften von Photonen	
Energie	$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$
Masse	$m = 0$
Geschwindigkeit	$v (= c_0 \text{ im Vakuum})$

Planck'sches Wirkungsquantum

$$h = 6.6262 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Vakuumlichtgeschwindigkeit

$$c_0 = 2.9971 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Beschreibung der WW von Photonen mit Materie

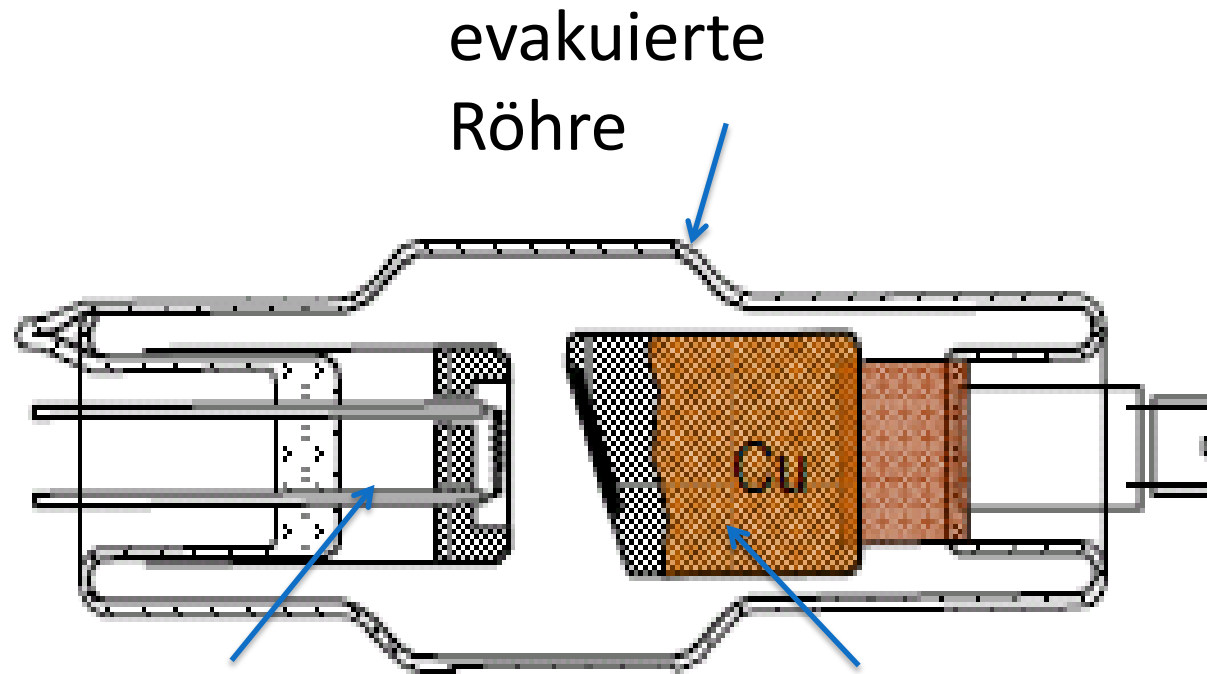
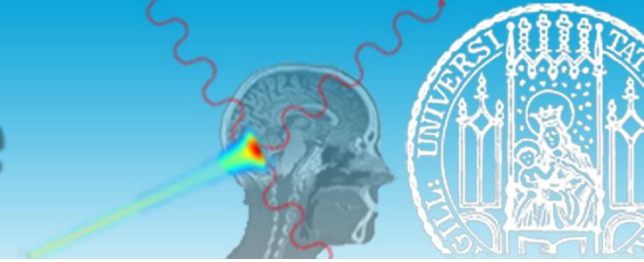
- Photoeffekt
- Compton-Effekt
- Paarbildung



Versuch zur Röntgenstrahlung (ROE)



# Röntgenröhre

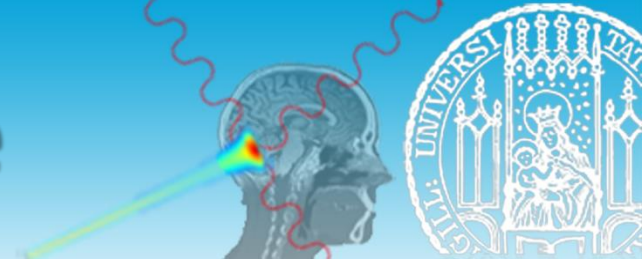


Glühkathode

Bremstarget  
(Anode)

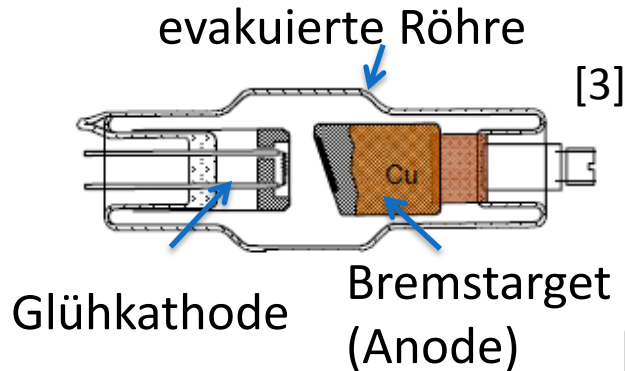
[3]

# Röntgenröhre



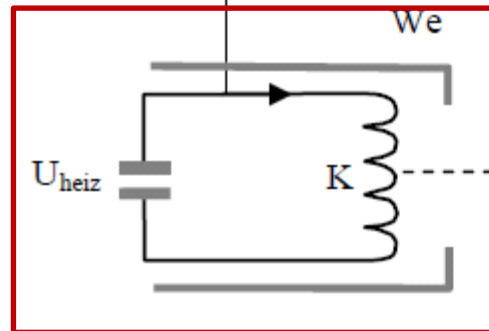
[3]

**Kathode**  
mit  
Wehnelt-  
zylinder



Glühkathode:  
**thermische  
Emission von  
Elektronen**

Der Heizstrom  $I_{Rö}$   
reguliert die Zahl der  
emittierten Elektronen.



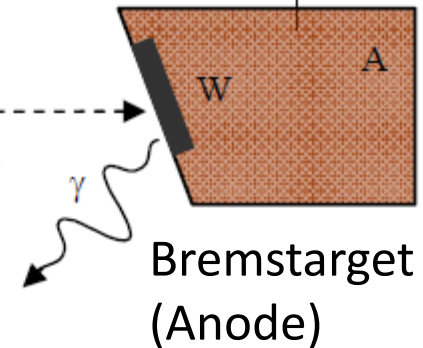
Beschleunigungsspannung  
typ. 20 - 150 kV

$U(kV)$

Beschleunigung  $e^-$

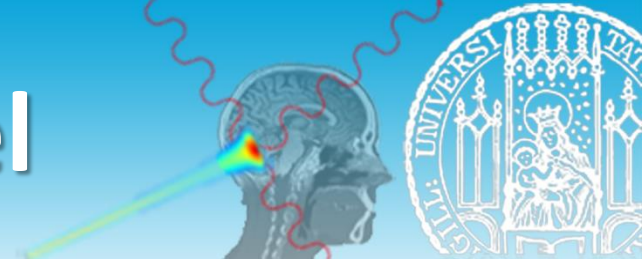
[3]

$e^-$   
 $I_{Rö}(mA)$



**Emission von Röntgenstrahlung**

# Rechenbeispiel



*Ein Elektron das in einer Röntgenröhre von der Glühkathode emittiert wird, gewinnt beim Durchlaufen der Beschleunigungsspannung Energie. Wie groß ist die Maximalenergie  $E$  des Elektrons beim Auftreffen auf die Anode nach Durchlaufen einer Beschleunigungsspannung  $U$  von 100 kV?*

Das Elektron gewinnt beim Durchlaufen der Spannung die Energie:

$$E = e \cdot U$$

Eine gebräuchliche Einheit in der Physik ist das **Elektronenvolt eV**. Es entspricht gerade der Energie, die ein Elektron beim Durchlaufen einer Spannung von 1V gewinnt.

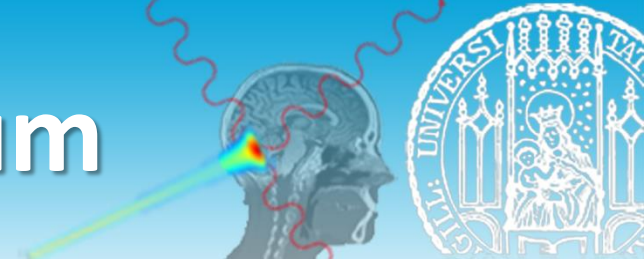
Die Energieeinheit eV kann mittels der Elementarladung  $e$  in Joule umgerechnet werden.

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ AsV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

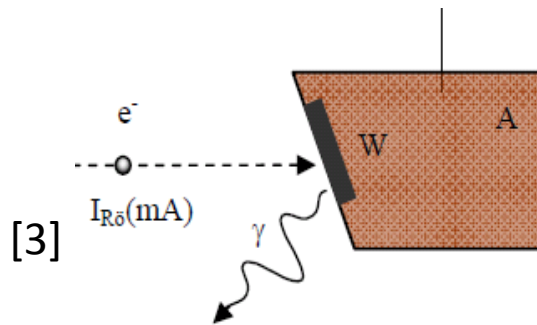
Nach dem Durchlaufen einer Spannung von 100 kV hat das Elektron damit eine Energie

$$E = 100 \text{ keV} = 1,6 \cdot 10^{-14} \text{ J}$$

# Röntgenspektrum

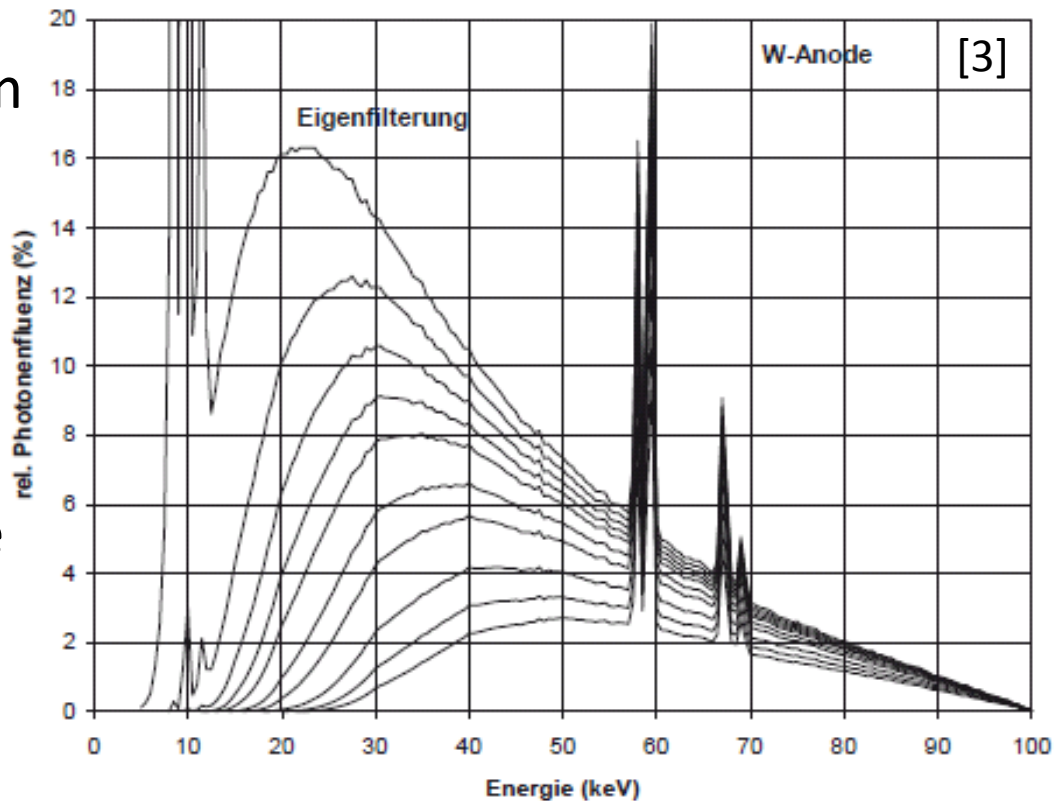


Wolframanode,  
100 keV Röntgenspektrum

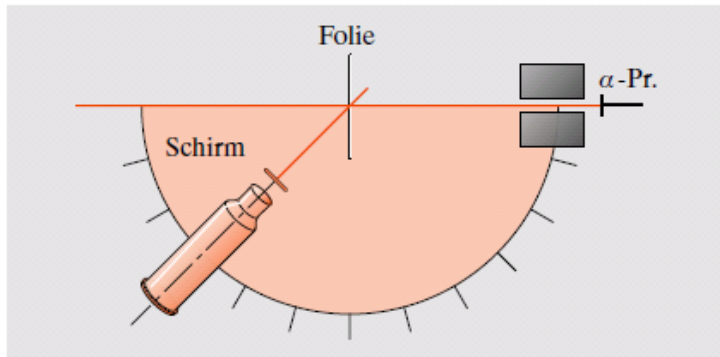
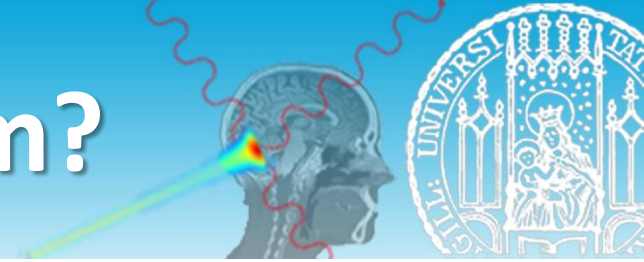


Das Elektron trifft auf die  
Wolframanode auf und  
wechselwirkt mit den  
Atomen der Anode.

Dabei wird ein kontinuierliches Röntgenspektrum (Maximalenergie  
100 keV) mit charakteristischen Linien emittiert.



# Was ist ein Atom?



■ **Abbildung 14.29** Prinzip der Versuchsanordnung zur Messung der Einzelstreuung von  $\alpha$ -Strahlung. Von der Strahlungsquelle  $\alpha$ -Pr treffen die  $\alpha$ -Teilchen auf die Streufolie; der durch ein Mikroskop betrachtete Szintillationsschirm kann zwischen  $0^\circ$  und fast  $180^\circ$  um die Streufolie herumgeschwenkt werden

**Tabelle 2.5.** Gemessene Zählraten für verschiedene Ablenk-  
winkel [2.64]

Ablenkwinkel $\vartheta$	Zählrate $dN$	$dN \cdot \sin^4 \vartheta / 2$
$15^\circ$	132 000	38,4
$30^\circ$	7 800	35,0
$45^\circ$	1 435	30,8
$60^\circ$	477	29,8
$75^\circ$	211	29,1
$105^\circ$	70	27,7
$120^\circ$	52	29,1
$135^\circ$	43	31,2
$150^\circ$	33	28,7

[4]

## Rutherford'sches Streuexperiment

Atom:

Sowohl die **positive Ladung** als auch fast die **gesamte Masse** eines Atoms muss sich in einem **kleinen Volumen im Zentrum** des Atoms befinden, dem Atomkern.

Sämtliche Elektronen befinden sich in einer Hülle um den Atomkern.

Radius Atomkern  $10^{-14}$  m

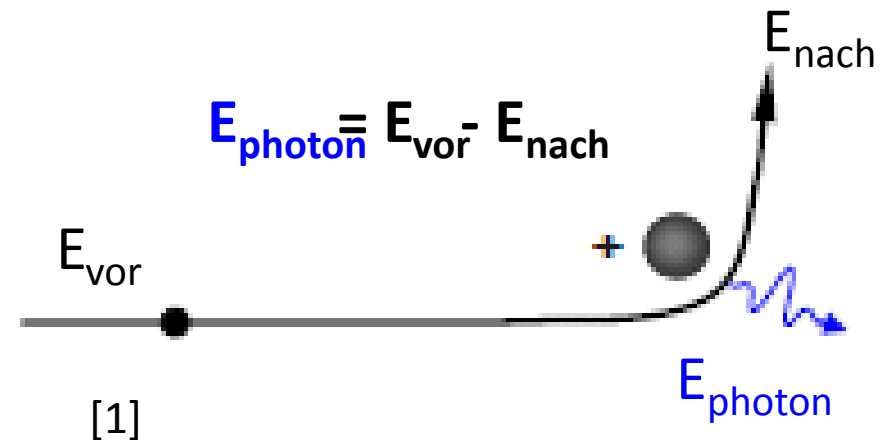
Radius Atomhülle  $10^{-10}$  m

# Bremsstrahlung



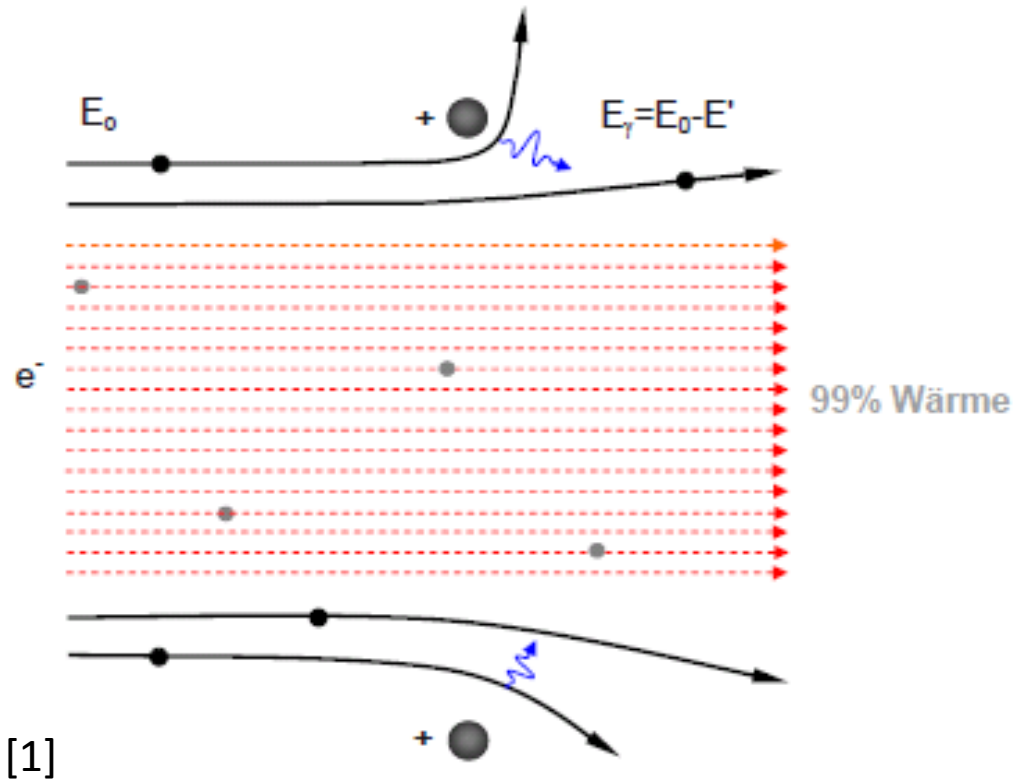
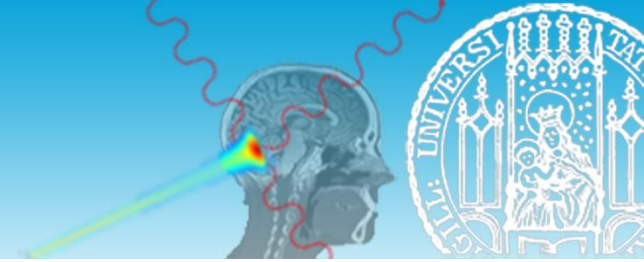
Wird ein Elektron im Coulombfeld eines Atomkerns oder geladenen Teilchens abgebremst, so verliert es einen Teil seiner Energie durch die sogenannte **Bremsstrahlung**.

Die Energie der emittierten Bremsstrahlungsphotonen entspricht der **Differenz der kinetischen Energien des Elektrons** vor und nach der Ablenkung.



Das **Bremsstrahlungsspektrum** ist **kontinuierlich**.

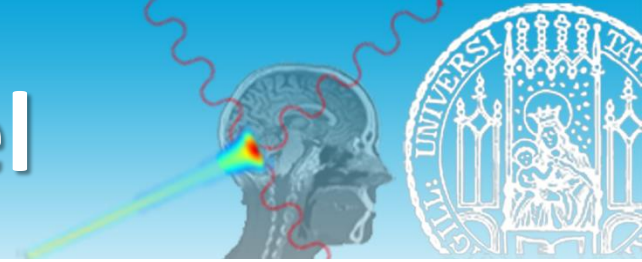




Lediglich **1%** der Elektronen verlieren ihre Energie über die **Bremsstrahlung**, der Rest wird über Stöße abgebremst.

**99% der Energie** wird letztendlich in **Wärme** umgewandelt.

# Rechenbeispiel



*Welche Energie und Wellenlänge hat ein Photon, das entsteht, wenn ein Elektron, das aus einer 100 kV Röntgenröhre kommt, vollständig abgebremst wird?*

## Erinnerung:

Zusammenhang zwischen Energie  $E$ , Frequenz  $f$  und Wellenlänge  $\lambda$  eines Photons:

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

Planck'sches Wirkungsquantum

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Vakuumlichtgeschwindigkeit

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Die Energie des Elektrons beträgt

$$E_e = e \cdot U = 100 \text{ keV}.$$

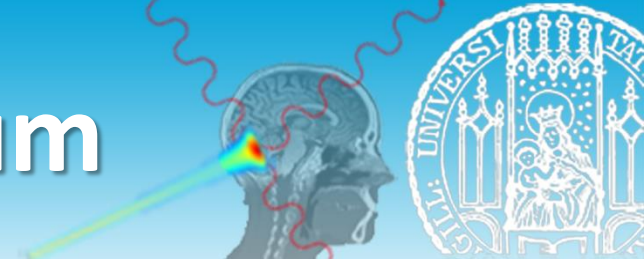
Wird das Elektron vollständig abgebremst, so geht seine gesamte Energie an das Bremsstrahlungsphoton über:

$$E_\gamma = E_e = 100 \text{ keV}$$

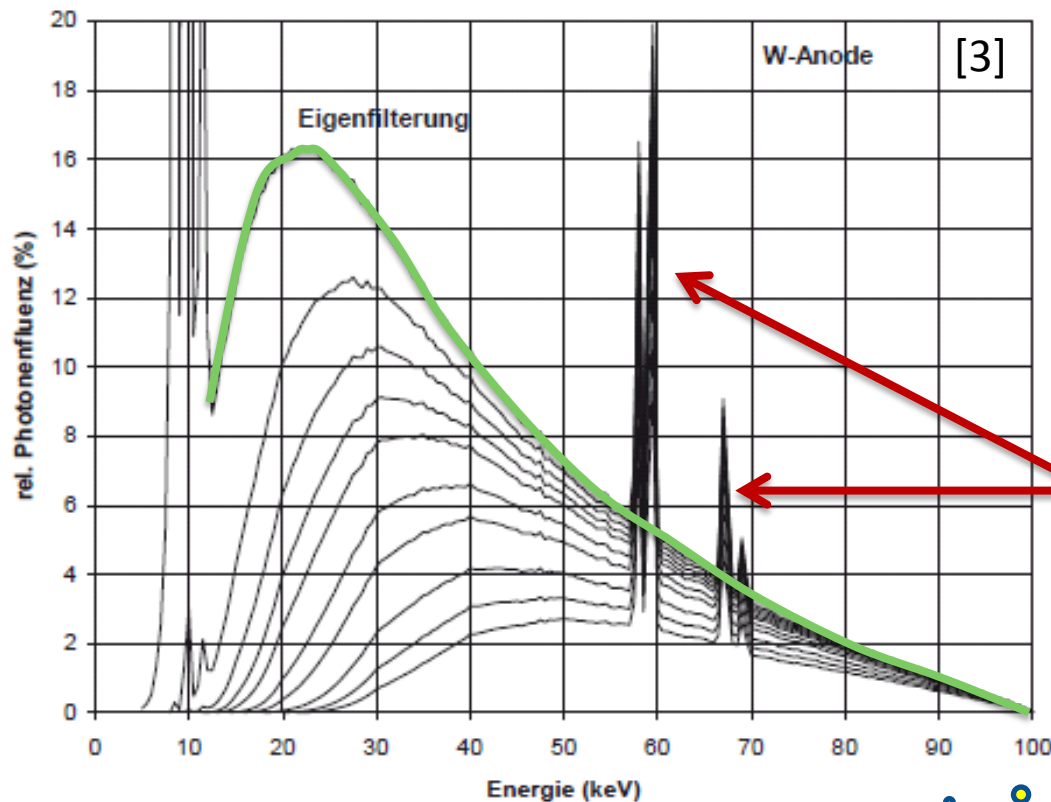
Für die Wellenlänge gilt dann:  $\lambda = \frac{hc}{E_e}$

$$\lambda = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{100 \text{ keV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = 12 \text{ nm}$$

# Röntgenspektrum



## 100 keV Röntgenspektrum, Wolframanode



Kontinuierlicher Anteil  
im Röntgenspektrum:

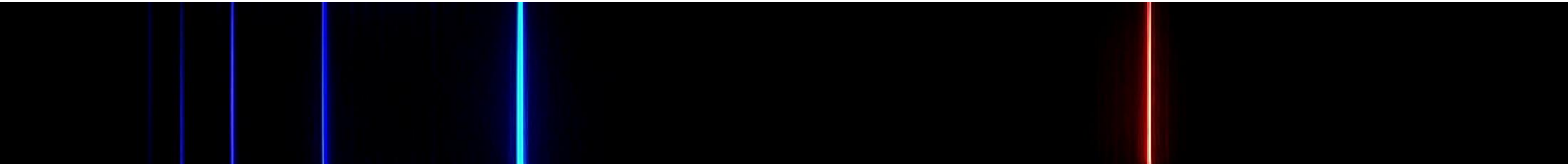
→ **Bremsstrahlung**

Woher kommen die  
**charakteristischen  
Linien?**

Exp: Röntgenspektrum  
(Mo)



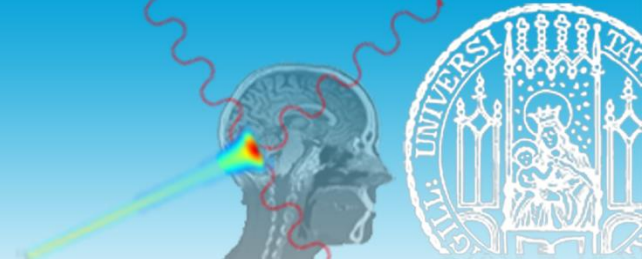
## Balmer Serie des Wasserstoff-Atoms:



Wellenlänge

„Visible spectrum of hydrogen“ von Jan Homann - Eigenes Werk. Lizenziert unter CC BY-SA 3.0 über Wikimedia Commons -  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Visible\\_spectrum\\_of\\_hydrogen.jpg#/media/File:Visible\\_spectrum\\_of\\_hydrogen.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Visible_spectrum_of_hydrogen.jpg#/media/File:Visible_spectrum_of_hydrogen.jpg)

# Bohrsches Atommodell



Das **Bohrsche Atommodell** ist ein **halbklassisches Modell**.

**Elektronen** bewegen sich auch auf **geschlossenen Bahnen** im Coulombfeld des Atomkern um den Atomkern herum. Aus Stabilitätsgründen sind dabei nur bestimmte, diskrete Bahnen erlaubt (Quantenbedingung).

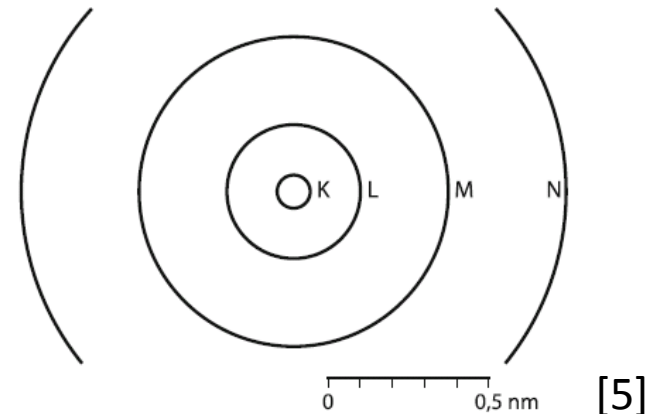
Für die Elektronenradien gilt:

$$r_n = \frac{n^2}{Z} \cdot a_0$$

n: Quantenzahl       $n = 1, 2, \dots$

Z: Kernladungszahl

$a_0$ : Bohrscher Atomradius



■ Abb. 8.1. Bohr'sches Atommodell. Maßstabsgerechte Zeichnung der Bohr-Bahnen für das H-Atom; der Kern ist in diesem Maßstab nicht zu erkennen

# Bohrsches Atommodell des H-Atoms

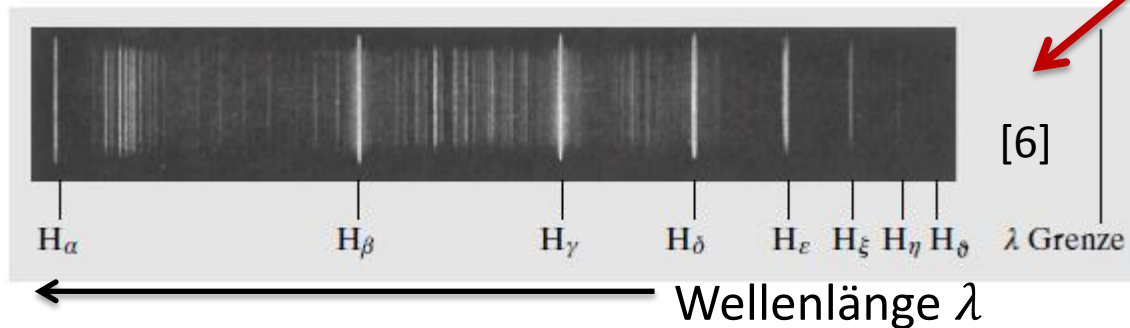
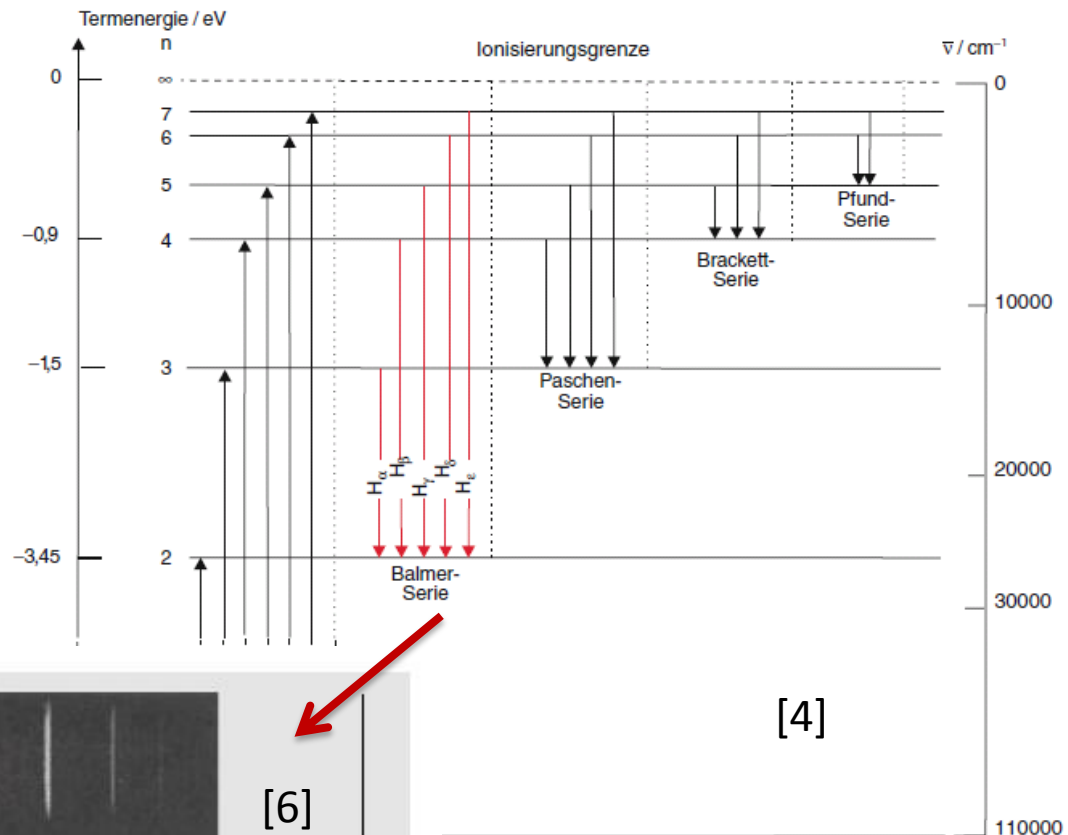


Zu jeder erlaubten Bahn gehört eine diskrete negative Gesamtenergie:

$$E_n = - \frac{13,6 \text{ eV}}{n}$$

Grundzustand:

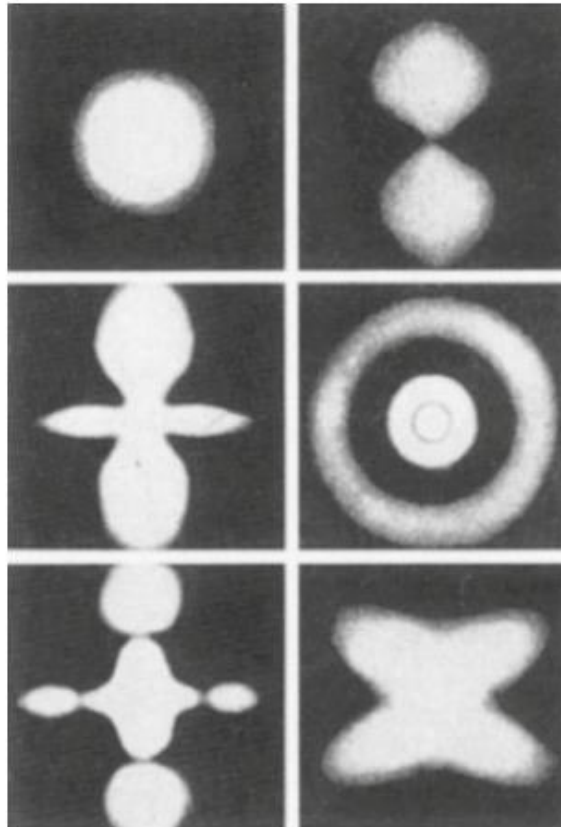
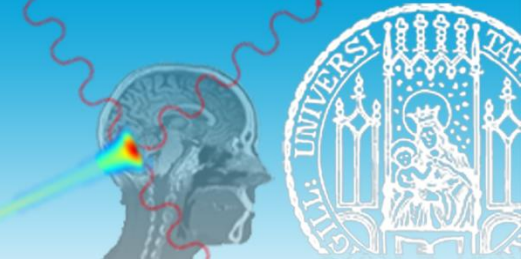
$$n=1 \quad E_n = -13,6 \text{ eV}$$



ms mit den verschiedenen Emissions- bzw. Absorptions-Serien. Da im Allge-  
setzt ist, treten die Serien, die auf  $n \geq 2$  münden, nur in Emission auf, während  
n Emission beobachtet wird



# Genauer: Quantenmechanik

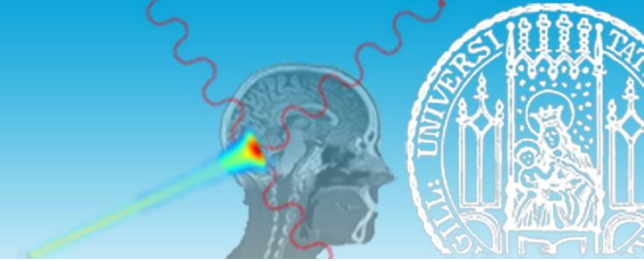


Elektronenzustände in der Atomhülle sind durch **5 Quantenzahlen** beschrieben:

- die **Hauptquantenzahl  $n$**  ( $\rightarrow$  Bohr)
- die **Bahndrehimpulsquantenzahl  $l$**
- deren  **$z$ -Komponente  $m_l$**
- der **Spin  $s$**
- dessen **Komponenten  $m_s$** .

■ Abb. 8.3. Elektronenwolken. Sie kennzeichnen die Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Hüllenelektrons in verschiedenen angeregten Zuständen [5]

# Pauli Prinzip



**Pauli-Prinzip:** In einem atomaren Zustand ( $n, l, m_l, s, m_s$ ) kann sich jeweils nur ein Elektron befinden.

Das Pauli-Prinzip  
hat wichtige  
Konsequenzen für  
den Aufbau des  
Periodensystems  
der Elemente.

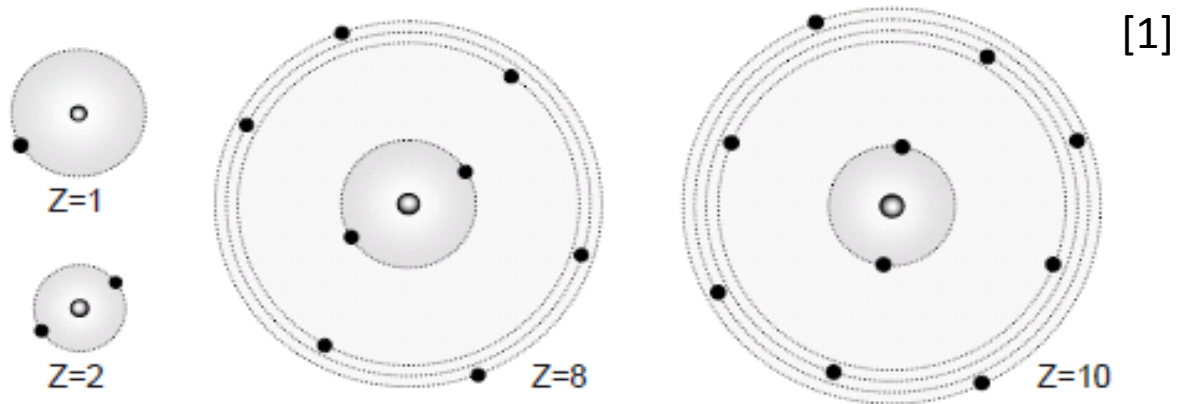
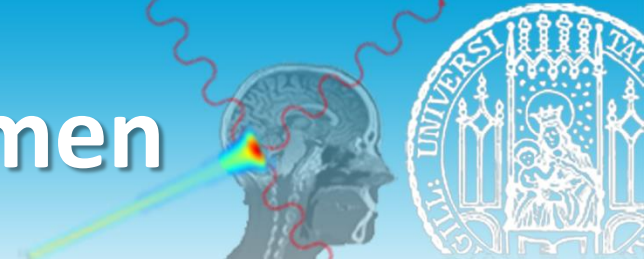


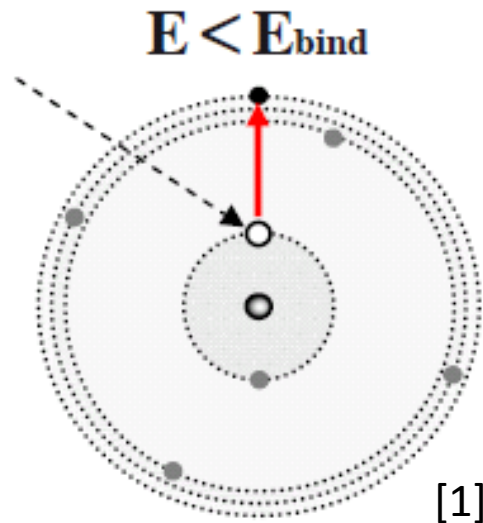
Fig. 2.3: Vereinfachte Darstellung der Elektronenkonfiguration einiger leichter Elemente nach dem Bohrschen Atommodell ( $Z = 1$ : Wasserstoff,  $Z = 2$ : Helium,  $Z = 8$ : Sauerstoff,  $Z = 10$ : Neon, Elemente mit einer maximal gefüllten äußeren Elektronenschale werden Edelgase genannt).

→ Schalenaufbau der Elektronenhülle

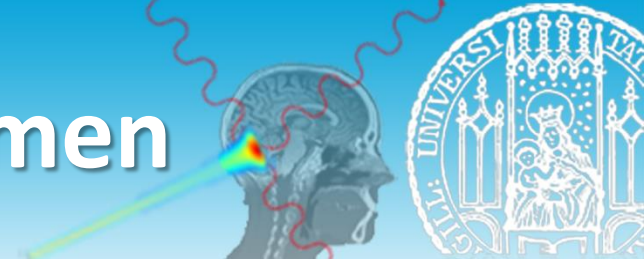


## Anregung

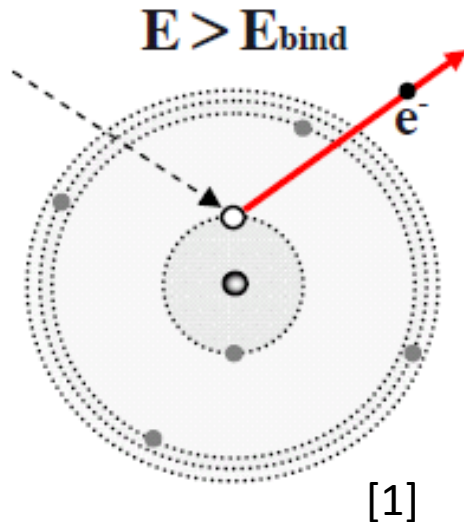
Der **energetisch günstigste Zustand** eines Atoms wird als **Grundzustand** bezeichnet.



Durch **Zuführung von Energie** können Elektronen von einer energetisch niedrig liegenden Schale auf eine energetisch höher liegende Schale angehoben werden. Das Atom ist dann in einem **angeregten Zustand**.



## Ionisation



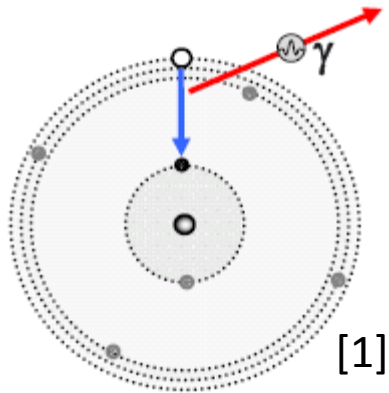
Übertrifft die zugeführte Energie  $E$  die Bindungsenergie  $E_{\text{bind}}$  des Elektrons, so kann das Elektron die Atomhülle verlassen.

Das Atom ist dann ionisiert.

# Anregung und Ionisation von Atomen



## Photo-Emission

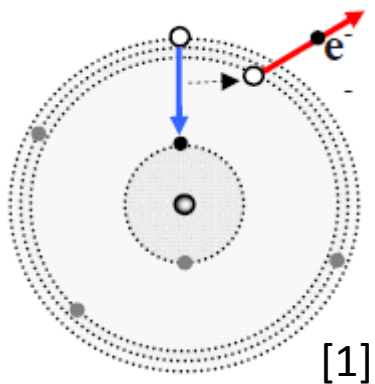


Durch Anregung bzw. Ionisation existiert in einer der inneren Schalen ein Elektronenloch.

Diese wird durch **Emission eines Photons oder Augerelektrons** wieder aufgefüllt.

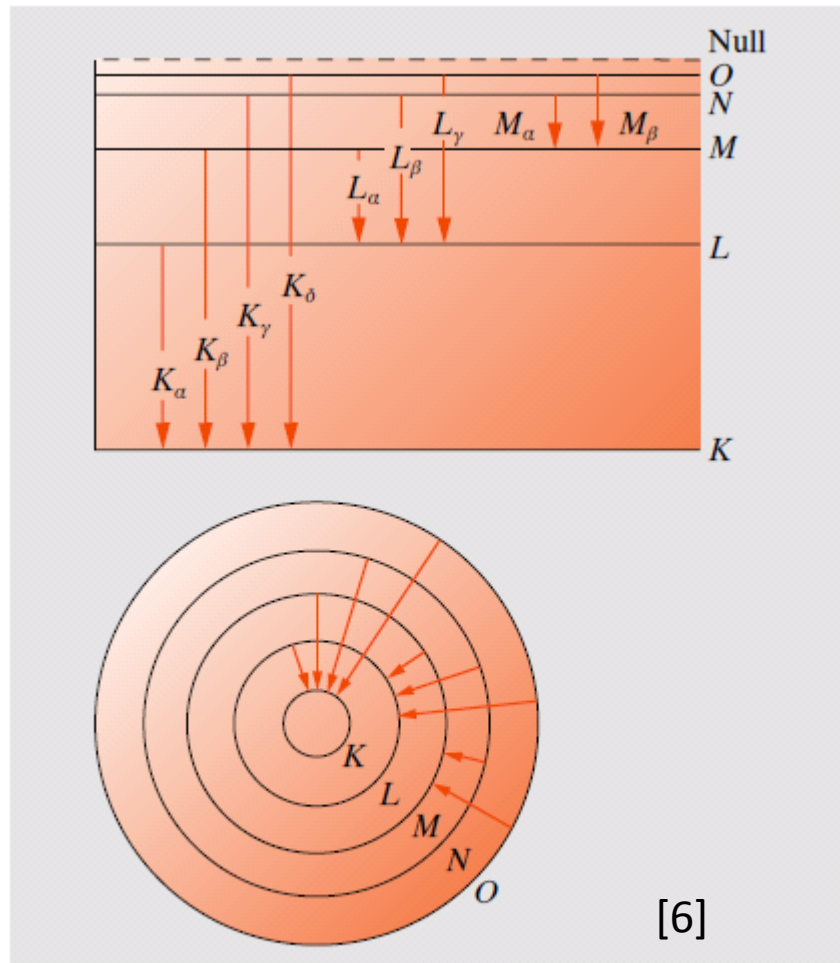
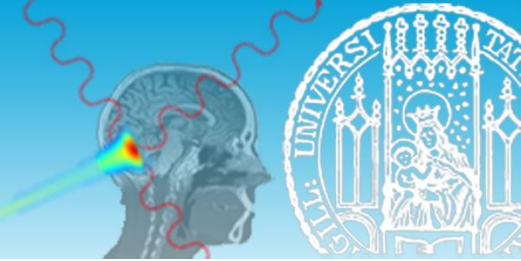
Die dabei **emittierte Strahlungsenergie** ist ein für ein Atom charakteristischer Wert (Spektroskopie). Sie entspricht der **Differenz der Bindungsenergien** der beiden am Übergang beteiligten Elektronenschalen. und kann im Bereich des **sichtbaren Lichts**, der **UV- oder Röntgenstrahlung** liegen.

## Auger-Elektron



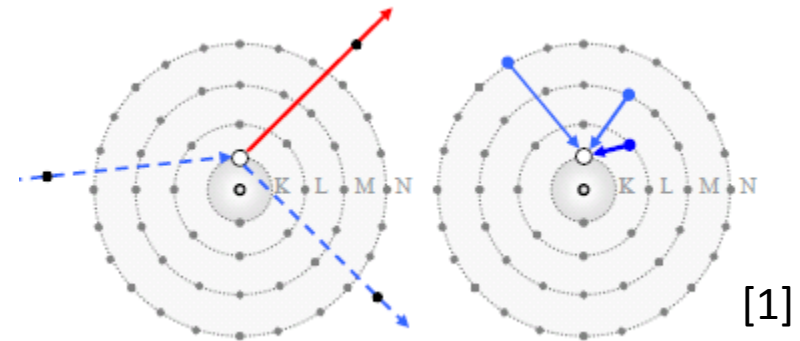


# Charakteristische Röntgen-Strahlung



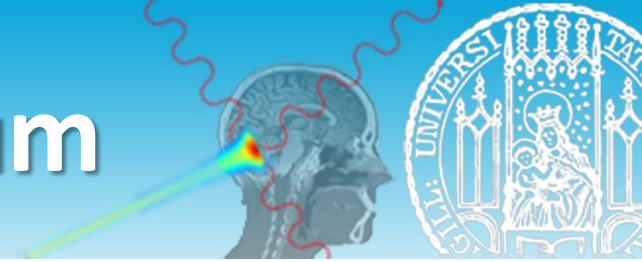
**Abbildung 17.28** Die Deutung der K-, L-, M-... Serien der charakteristischen Röntgenspektren aus dem Energie-Termschema (oben) und dem Schalenmodell des Atoms (unten)

Ionisierung der K-Schale und anschließende Wiederauffüllung der K-Schale durch ein Elektron aus der L, M, oder N Schale.

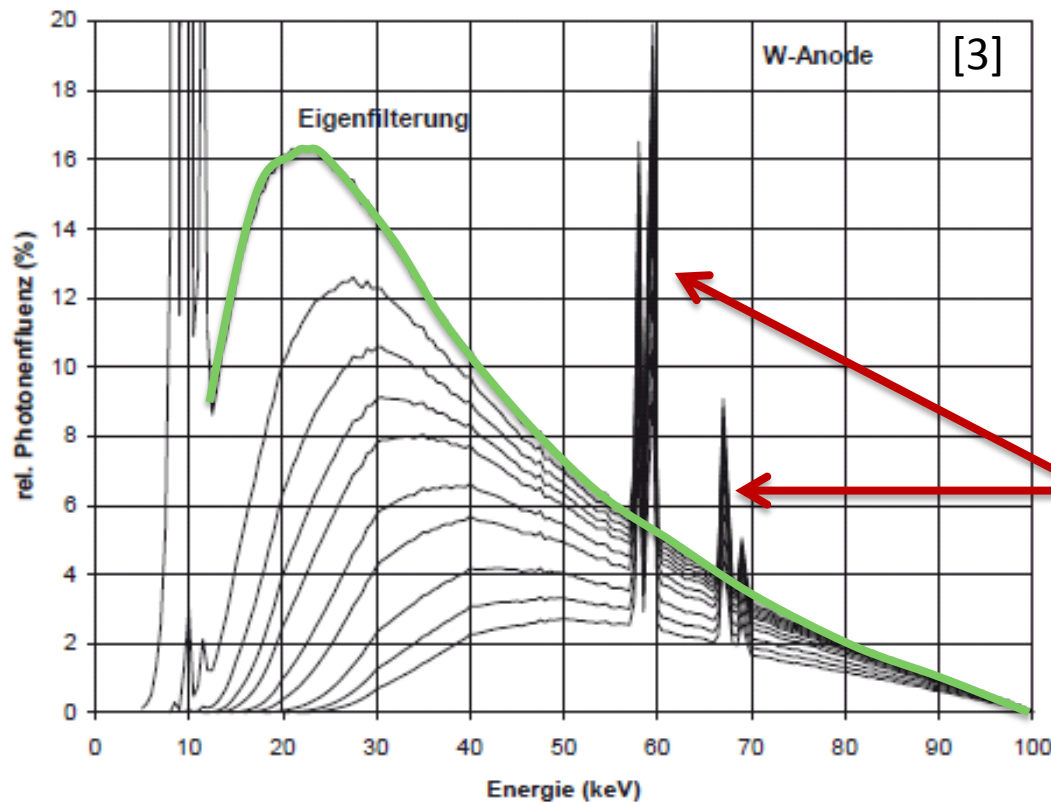


Die zugehörigen charakteristischen Röntgenstrahlen werden als K-Serie bezeichnet





## 100 keV Röntgenspektrum, Wolframanode

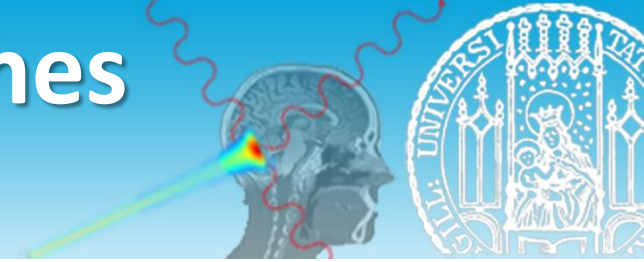


Kontinuierlicher Anteil  
im Röntgenspektrum:  
**Bremsstrahlung**

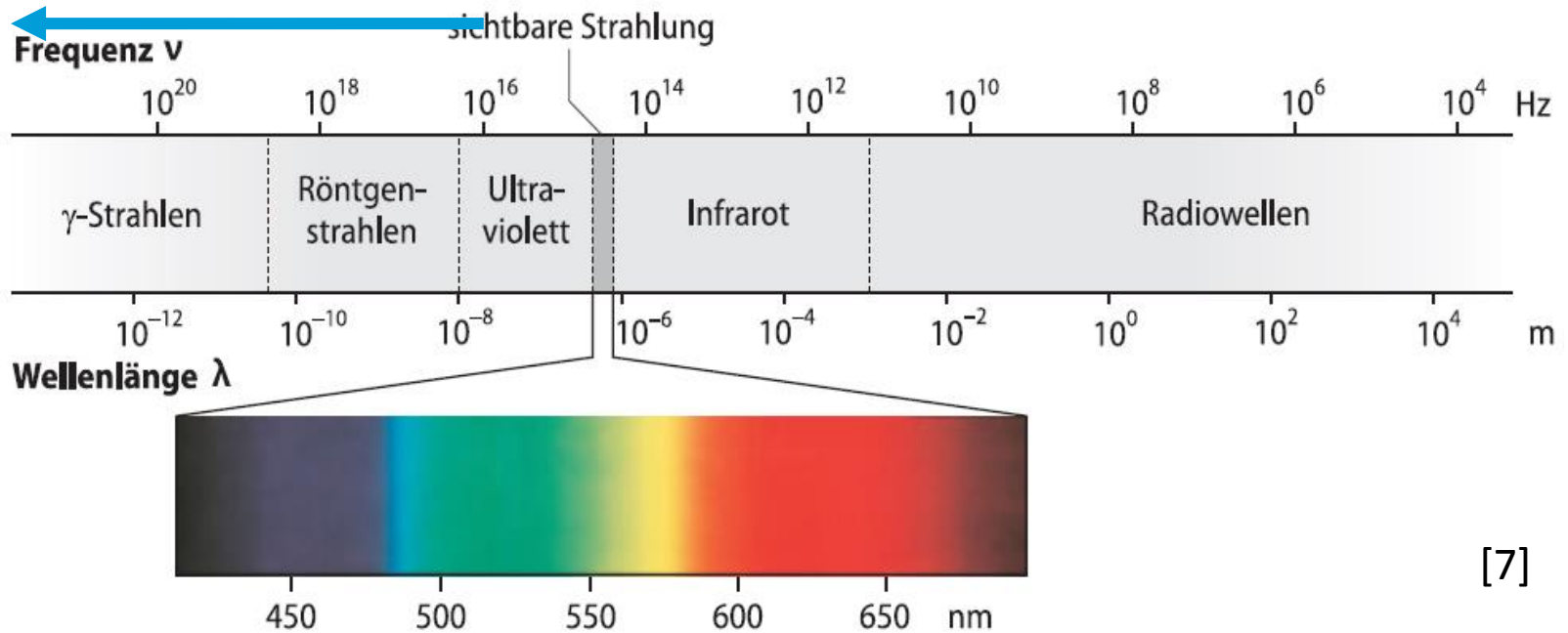
Übergänge zwischen  
atomaren Energie-  
niveaus

→ **Charakteristische  
Linien**

# Elektromagnetisches Spektrum



## Ionisierende Strahlung



[7]



©Wikipedia

### Anwendungen in der Medizin

- $\gamma$ -Strahlen: Strahlentherapie
- Röntgenstrahlen: Diagnostik
- UV-Strahlung: Therapie Hautkrankheiten
- Infrarot: Wärmebehandlung (Rotlicht)
- Radiowellen: Veröden von Krampfadern

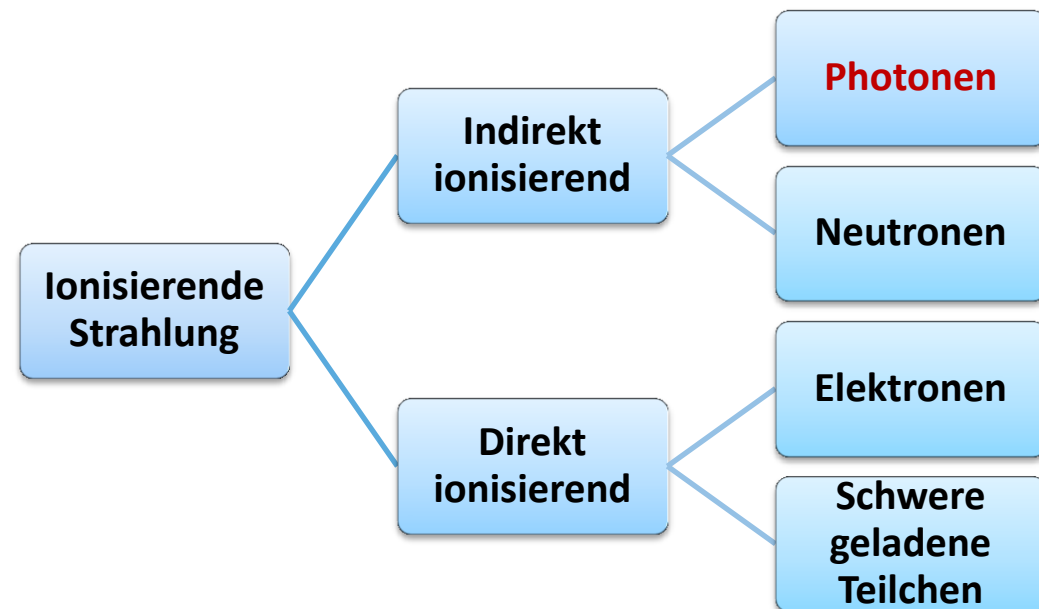
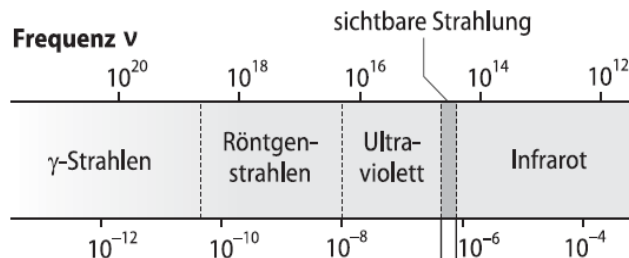
# Ionisierende Strahlung



**Röntgenstrahlung** gehört zur **ionisierenden Strahlung**.  
Ionisierende Strahlung verfügt über eine ausreichend hohe Energie um Atome bzw. Moleküle eines Absorbers zu ionisieren.



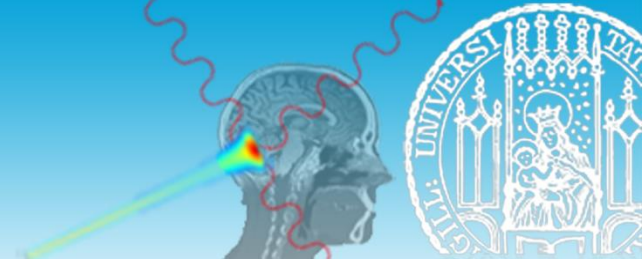
*Erinnerung:*  
*Welle-Teilchen-*  
*Dualismus*  
*Röntgenstrahlung*  
*↔ Röntgenphoton*



**Ionisierende Strahlung**

[7]

# Photonen



Beschreibung der Wechselwirkung von Röntgenstrahlung mit Materie im Teilchenbild:

Eigenschaften von Photonen	
Energie	$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$
Masse	$m = 0$
Geschwindigkeit	$v (= c_0 \text{ im Vakuum})$

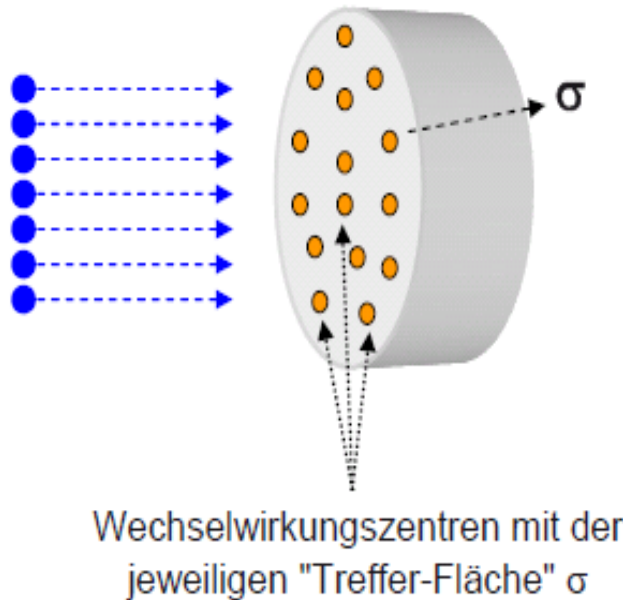
Planck'sches Wirkungsquantum  
Vakuumlichtgeschwindigkeit

$$h = 6.6262 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

$$c_0 = 2.9971 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$



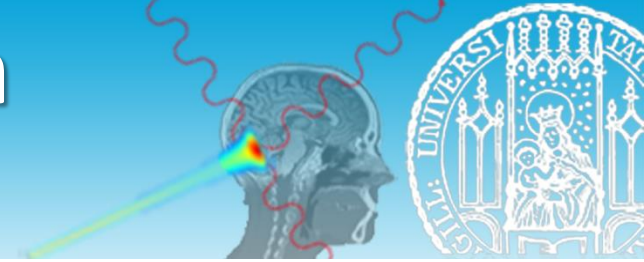
Teilchenstrahl



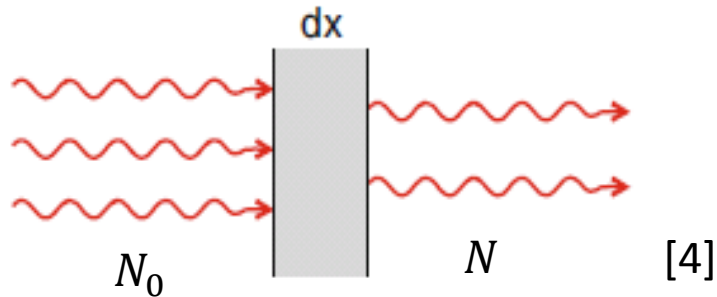
Je mehr „Treffer-Fläche“,  
desto höher ist die  
Wahrscheinlichkeit einer  
Wechselwirkung (WW)  
zwischen einfallendem  
Teilchenstrahl und Absorber.

Die „Treffer-Fläche“ wird als **Wechselwirkungsquerschnitt  $\sigma$**   
bezeichnet und ist ein Maß für die **Wahrscheinlichkeit einer WW**.

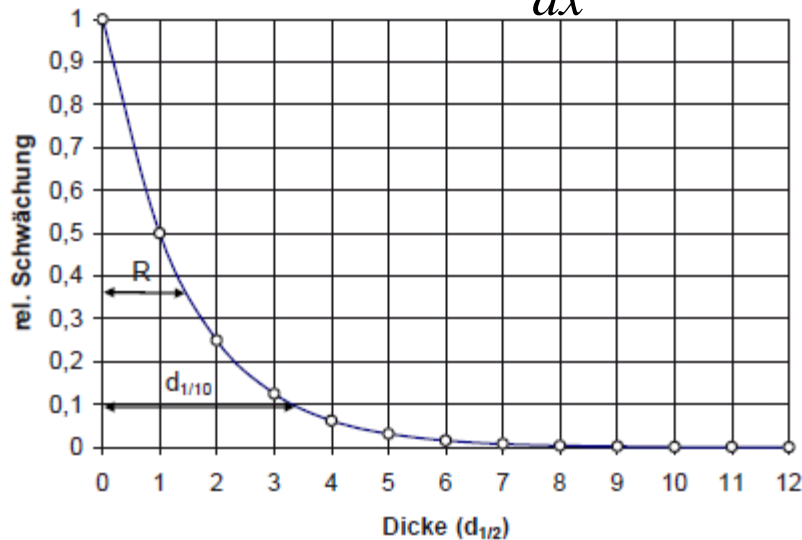
# Absorption von Photonen



$N_0$  Photonenanzahl vor dem Absorber der Dicke  $dx$   
 $N$  Photonenanzahl nach dem Absorber der Dicke  $dx$



$$dN = -\mu \cdot N \cdot dx \longrightarrow \frac{dN}{dx} = -\mu \cdot N$$



Ein Photonenstrahl wird beim Durchgang durch einen Absorber exponentiell geschwächt.

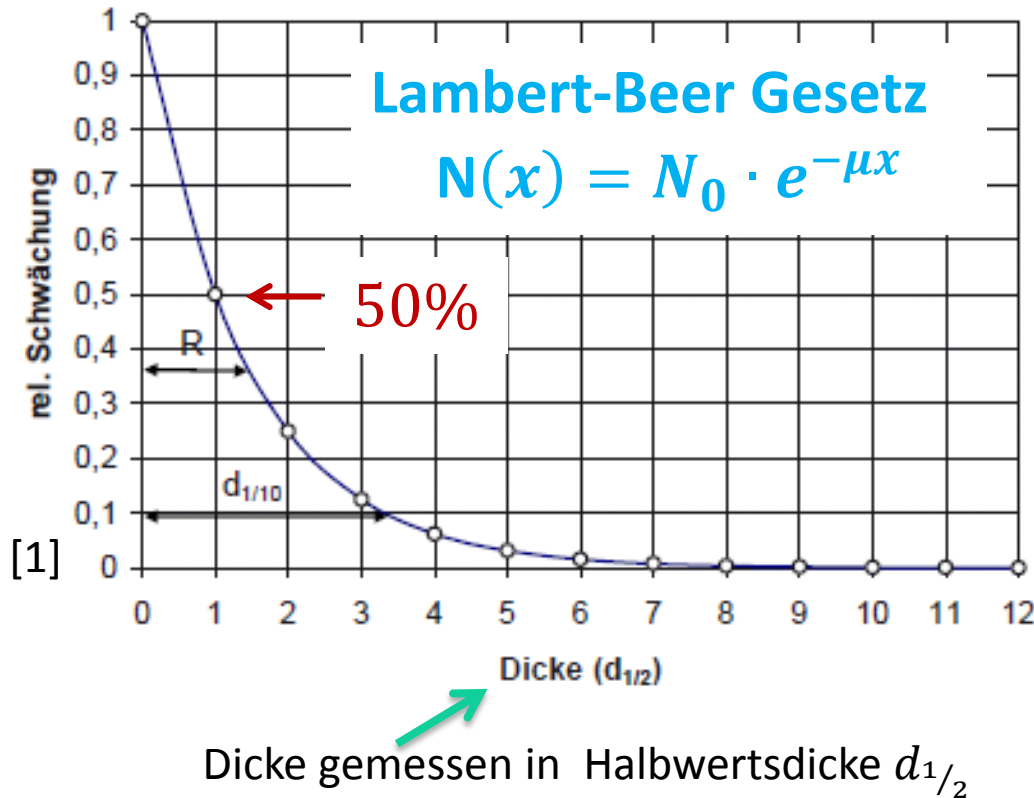
## Lambert-Beer Gesetz

$$N(x) = N_0 \cdot e^{-\mu x}$$

Der **lineare** **Abschwächungskoeffizient  $\mu$**  hängt sowohl vom Material als auch der Energie der Photonen ab.



# Halbwertsdicke $d_{1/2}$



Die **Halbwertsdicke**  $d_{1/2}$  ist die Dicke des Absorbers, bei der die ursprüngliche Photonenzahl um 50% abgenommen hat.

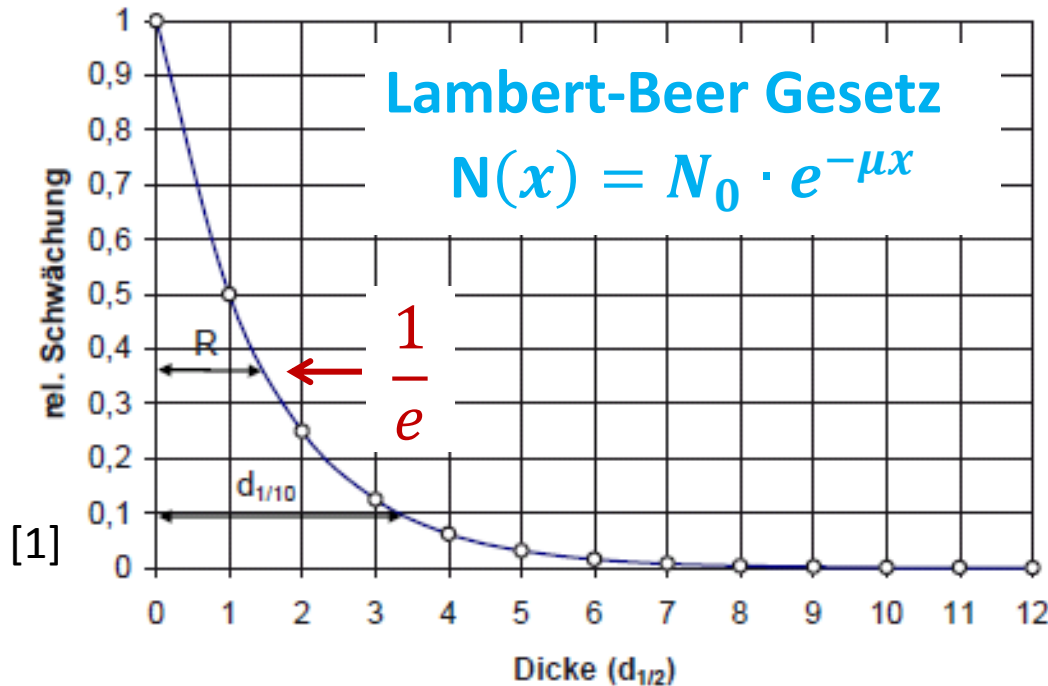
$$N(R) = 0,5 \cdot N_0 = N_0 \cdot e^{-\mu d_{1/2}}$$

$$0,5 = e^{-\mu d_{1/2}}$$

$$\ln 0,5 = -\mu d_{1/2}$$

$$d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

# Mittlere Eindringtiefe R



Bei der **mittleren Eindringtiefe R** beträgt die Anzahl der Photonen nur noch den  $\frac{1}{e}$ -**ten Anteil** der ursprünglichen Photonenanzahl.

$$N(R) = \frac{1}{e} \cdot N_0 = N_0 \cdot e^{-\mu R}$$

$$\frac{1}{e} = e^{-1} = e^{-\mu R}$$

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

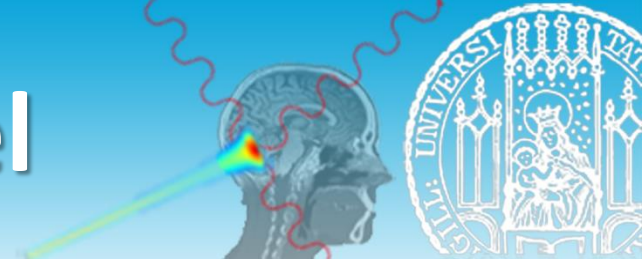
Die mittlere Eindringtiefe ist von der Energie der Photonen und dem Absorbermaterial abhängig.

# Rechenbeispiel



*Ein Röntgenstrahl werde durch eine Absorber der Dicke von 6 mm um die Hälfte abgeschwächt. Wieviel Prozent der ursprünglichen Photonenzahl sind nach einem Absorber gleichen Materials der Dicke 24 mm noch vorhanden?*

# Rechenbeispiel

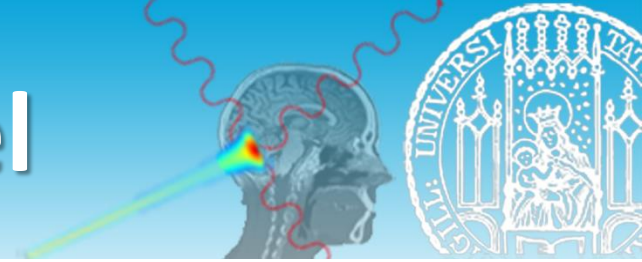


*Ein Röntgenstrahl werde durch eine Absorber der Dicke von 6 mm um die Hälfte abgeschwächt. Wieviel Prozent der ursprünglichen Photonenzahl sind nach einem Absorber gleichen Materials der Dicke 24 mm noch vorhanden?*

Man kann das ganze mit dem exponentiellen Abschwächungsgesetz lösen, wobei  $N_0$  die ursprüngliche Anzahl Photonen sei.

$$N(x) = N_0 \cdot e^{-\mu x}$$

# Rechenbeispiel



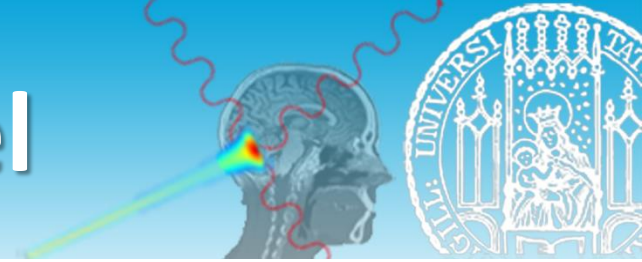
*Ein Röntgenstrahl werde durch eine Absorber der Dicke von 6 mm um die Hälfte abgeschwächt. Wieviel Prozent der ursprünglichen Photonenzahl sind nach einem Absorber gleichen Materials der Dicke 24 mm noch vorhanden?*

Man kann das ganze mit dem exponentiellen Abschwächungsgesetz lösen, wobei  $N_0$  die ursprüngliche Anzahl Photonen sei.

$$N(x) = N_0 \cdot e^{-\mu x}$$

Nach 6 mm Absorbermaterial sind jeweils noch 50% der vor dem Absorber einfallenden Photonen vorhanden. Die Dicke von 6 mm ist also die Halbwertsdicke  $d_{1/2}$

# Rechenbeispiel



*Ein Röntgenstrahl werde durch eine Absorber der Dicke von 6 mm um die Hälfte abgeschwächt. Wieviel Prozent der ursprünglichen Photonenzahl sind nach einem Absorber gleichen Materials der Dicke 24 mm noch vorhanden?*

Man kann das ganze mit dem exponentiellen Abschwächungsgesetz lösen, wobei  $N_0$  die ursprüngliche Anzahl Photonen sei.

$$N(x) = N_0 \cdot e^{-\mu x}$$

Nach 6 mm Absorbermaterial sind jeweils noch 50% der vor dem Absorber einfallenden Photonen vorhanden. Die Dicke von 6 mm ist also die Halbwertsdicke  $d_{1/2}$

Der Absorber hat eine Dicke  $d$  von 4 Halbwertsdicken:  $d = 4 \cdot d_{1/2} = 4 \cdot \frac{\ln 2}{\mu}$

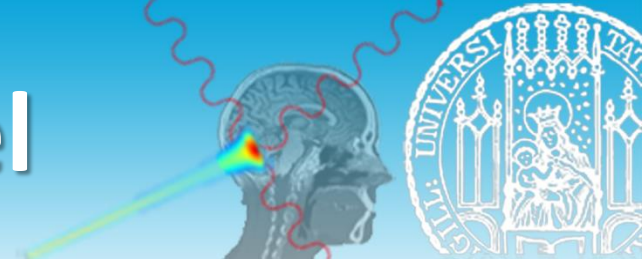
$$N(d) = N_0 \cdot e^{-\mu d} = N_0 \cdot e^{-\mu 4 d_{1/2}} = N_0 \cdot e^{-\mu 4 \frac{\ln 2}{\mu}}$$

$$N(d) = 0,0625 N_0$$

**6,25 %**



# Rechenbeispiel

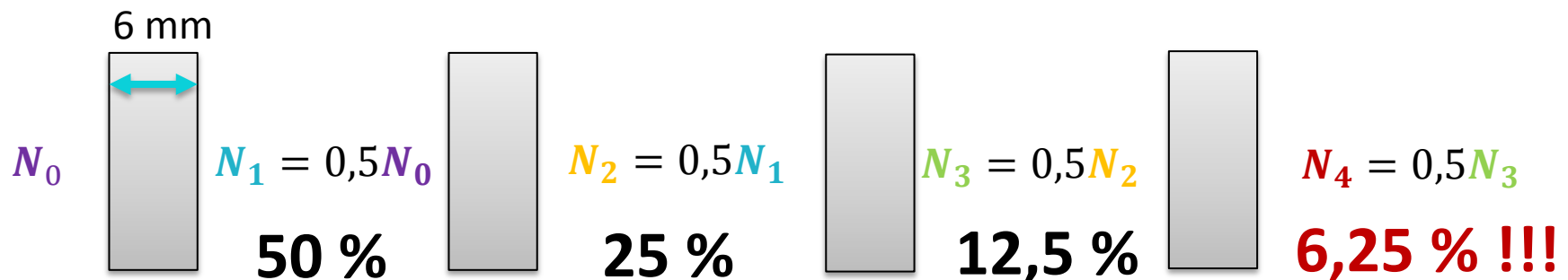


*Ein Röntgenstrahl werde durch eine Absorber der Dicke von 6 mm um die Hälfte abgeschwächt. Wieviel Prozent der ursprünglichen Photonenzahl sind nach einem Absorber gleichen Materials der Dicke 24 mm noch vorhanden?*

Sei  $N_0$  die ursprüngliche Anzahl an Photonen.

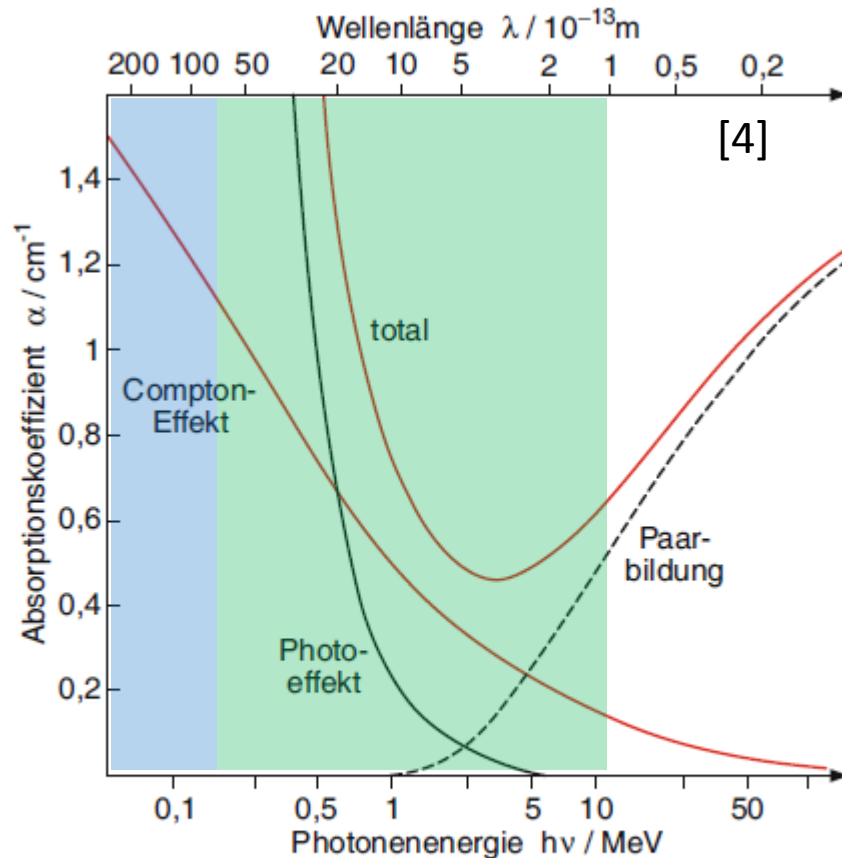
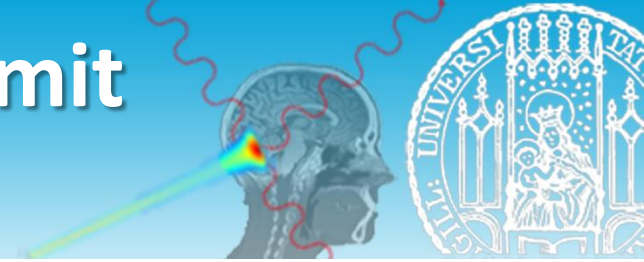
Die Gesamtabsorberdicke von 24 mm kann man sich in einzelne Blöcke von je 6 mm Länge unterteilt vorstellen.

Nach 6 mm Absorbermaterial sind jeweils noch 50% der vor dem Absorber einfallenden Photonen vorhanden:



$$N_4 = 0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,5 \cdot N_0 = 0,5^4 \cdot N_0$$

# WW von Photonen mit Materie



**Abb. 7.33.** Beiträge von Photoeffekt, Compton-Effekt und Paarbildung zum Absorptionskoeffizienten von Blei in Abhängigkeit von der Photonenenergie

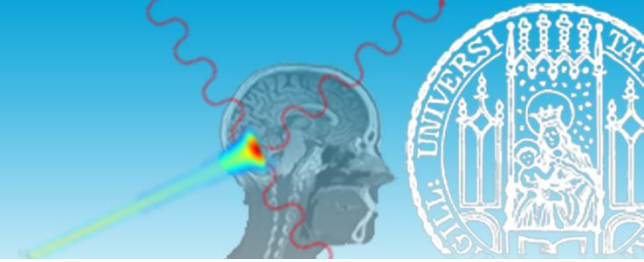
Photonen haben unterschiedliche Wechselwirkungsmechanismen mit Materie.  
Für den Bereich medizinisch relevanter Energien sind dies

- **Photoeffekt**
- **Compton Streuung**
- **Paarbildung**

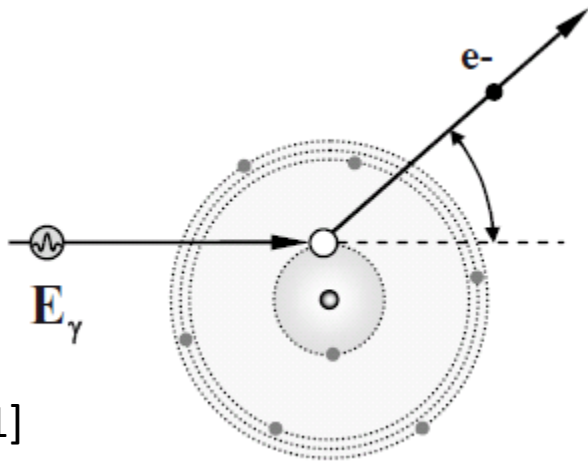
Diagnostik

Therapie

# Photoeffekt



Ein einfallendes Photon ( $E_\gamma$ ) überträgt seine gesamte Energie auf ein Hüllenelektron, das dadurch die Atomhülle verlassen kann. Die kinetische Energie  $E_{e,kin}$  des Elektrons ist die Differenz der Energie des einfallenden Photons und der Bindungsenergie  $E_B$ .

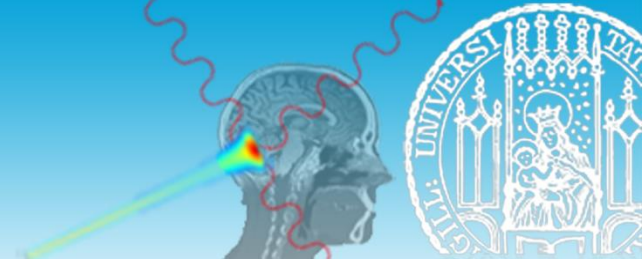


[1]

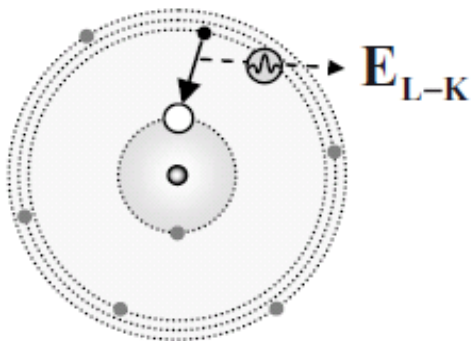
$$E_{e,kin} = E_\gamma - E_B$$

Das frei gesetzte Elektron deponiert seine Energie im Anschluss ebenfalls im Absorber.

# Photoeffekt

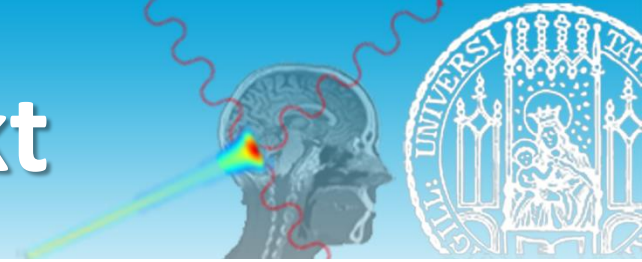


Das Atom wird durch die WW mit dem Photon ionisiert. Das Elektronenloch, dass in der Hülle entstanden ist, wird durch eine Elektron einer äußeren Schale wieder aufgefüllt. Dabei kommt es zur Emission eines weiteren Photons oder Augerelektrons.

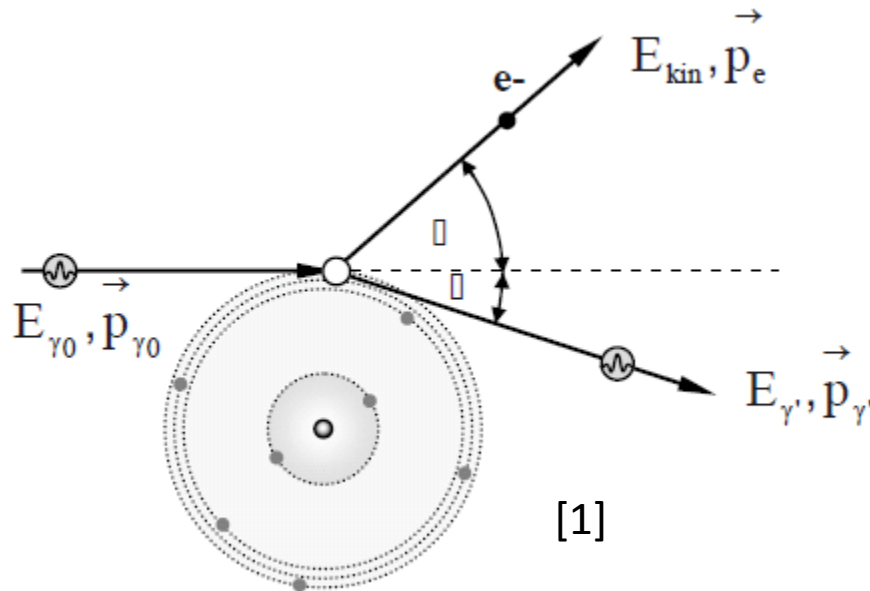


Die emittierte charakteristische Strahlung hat eine geringere Energie als das zuvor eingefallene Photon.

# Compton-Effekt



Beim Compton-Effekt wird das einfallende Photon an einem schwach gebundenen äußeren Hüllenelektron gestreut. Dabei überträgt das einfallende Photon einen Teil seiner Energie und seines Impulses auf das Elektron, das die Atomhülle verlässt.



Es gilt sowohl Energie- als auch Impulserhaltung:

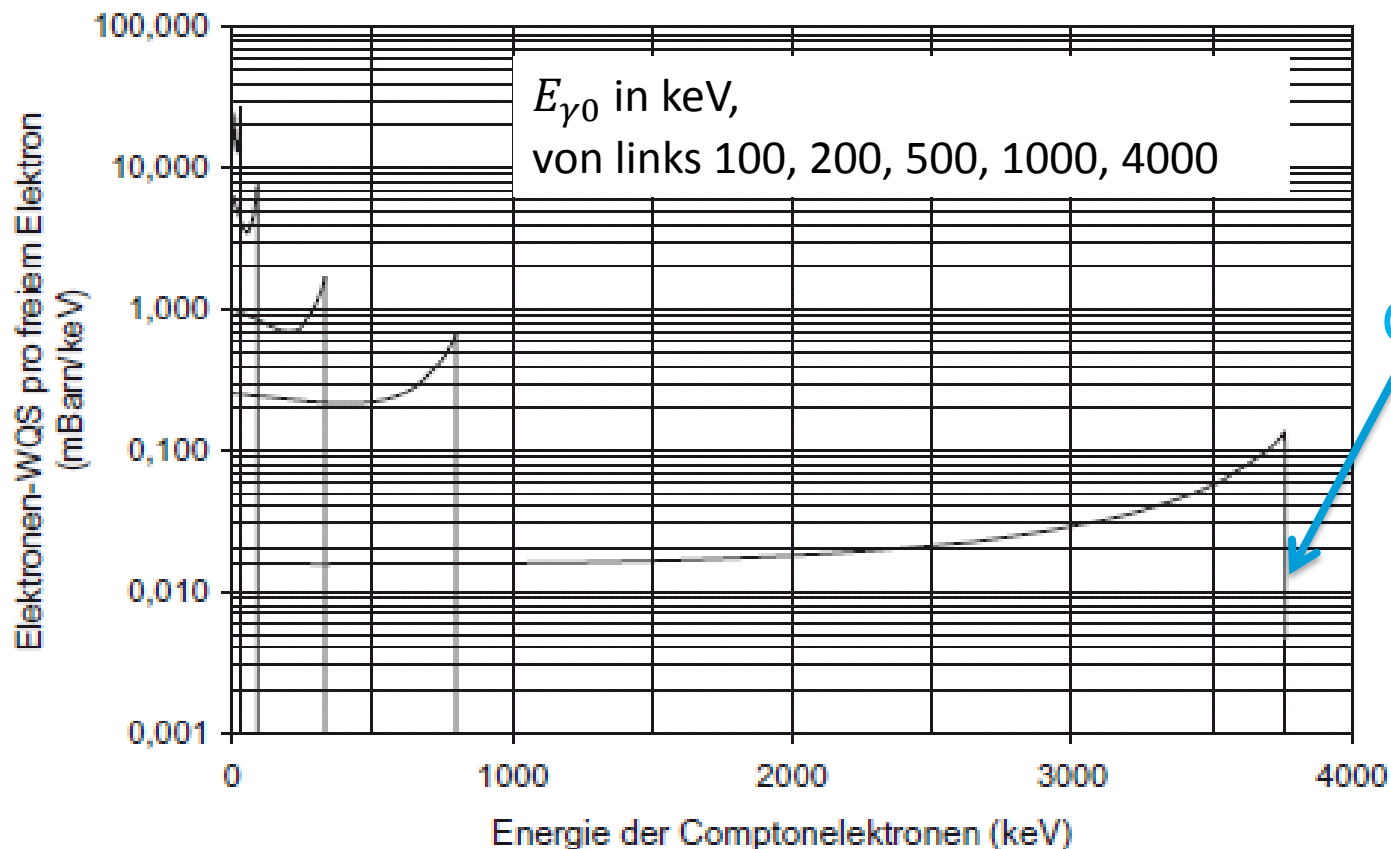
$$E_{\gamma 0} = E_{\gamma'} + E_{e,kin}$$

$$\vec{p}_{\gamma 0} = \vec{p}_{\gamma'} + \vec{p}_{e,kin}$$

# Compton-Effekt



*Relative Energieverteilung von Comptonelektronen für einfallende monoenergetische Photonen unterschiedlicher Energien*

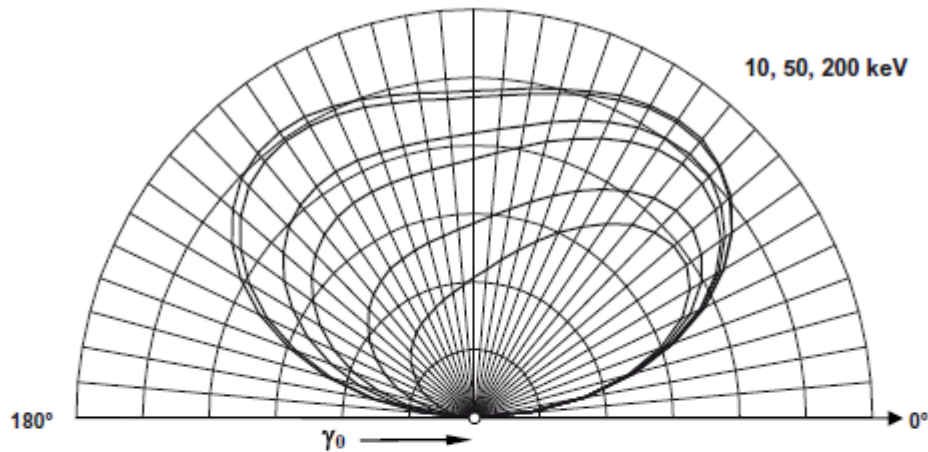


Comptonkante

[1]



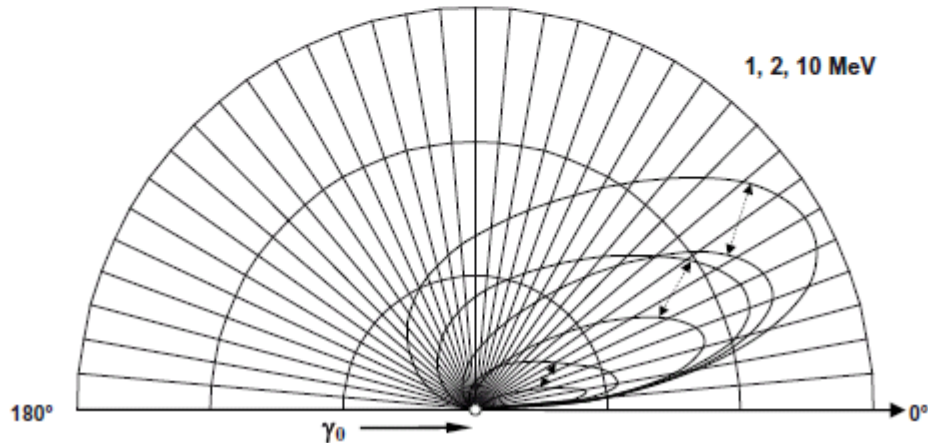
# Comptoneffekt



**Bildgebung: keV Energien**

***Streustrahlung !!!!***

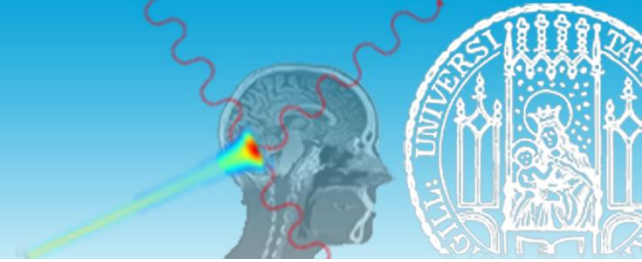
- Strahlenschutz bei Arbeit mit C-Bogen
- Verschlechterung Kontrast



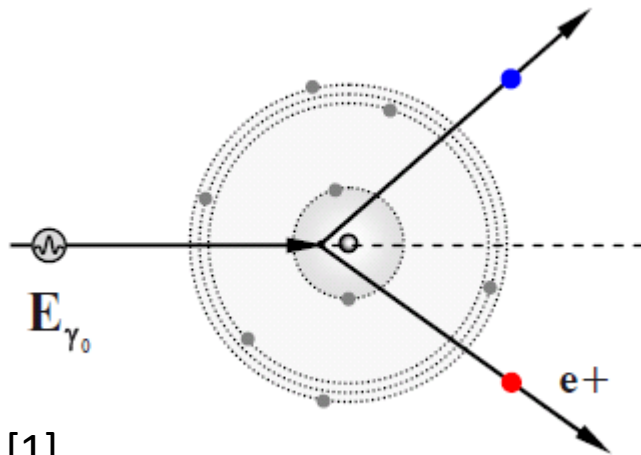
**Strahlentherapie: MeV Energien**

- Gestreute Photonen mehr vorwärts gerichtet

# Paarbildung



Besitzt ein **einfallendes Photon** mindestens die **doppelte Ruhemasse eines Elektrons** ( $2 \times 511 \text{ keV}$ ), so kann es **im Feld eines Atomkerns spontan in ein Elektron-Positron-Paar zerfallen**. Der Anteil der Photonenenergie, der die doppelte Ruhemasse übersteigt, geht in Bewegungsenergie des Elektron-Positron-Paares über.



Das **Positron** ist das **Antiteilchen** des Elektrons. Es zerstrahlt nach relativ kurzer Zeit mit einem Hüllenelektron des Absorbers. Dabei werden 2 Photonen von jeweils  $511 \text{ keV}$  unter einem Winkel von  $\sim 180^\circ$  emittiert, die sogenannte **Vernichtungsstrahlung**.

[1]

Siehe auch: Positronen-Emissions-Tomographie (PET)

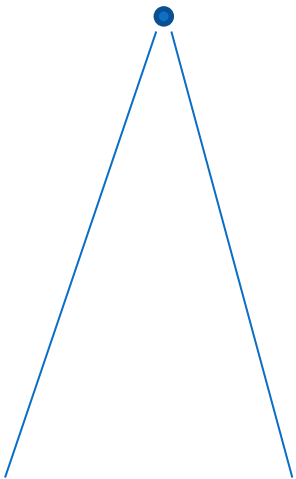
# Abstandsgesetz



Die Anzahl der Teilchen, die eine Fläche durchdringen ist ein Maß für die Intensität der Quelle (z.B. Röntgenröhre) und wird als Fluenz  $\Phi$  bezeichnet.

Mit zunehmendem Abstand zur Quelle **nimmt die Fluenz** allein aus geometrischen Gründen proportional **mit dem Quadrat des Abstands  $r$  zur Quelle ab**.

$$\phi \propto \frac{1}{r^2}$$



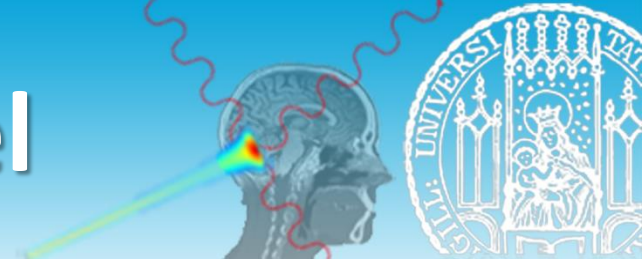
Begründung:

Betrachte eine Punktquelle, die ihre Strahlung isotrop (d.h. in alle Raumrichtungen gleichmäßig) emittiert. Die Fläche, die von der Strahlung durchdrungen wird, entspricht der Oberfläche  $O$  einer Kugel und nimmt mit zunehmender Entfernung  $r$  zur Quelle zu.

$$O = 4 \cdot \pi \cdot r^2$$

Kugeloberfläche

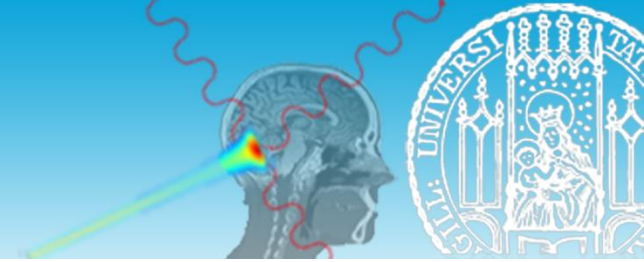
# Rechenbeispiel



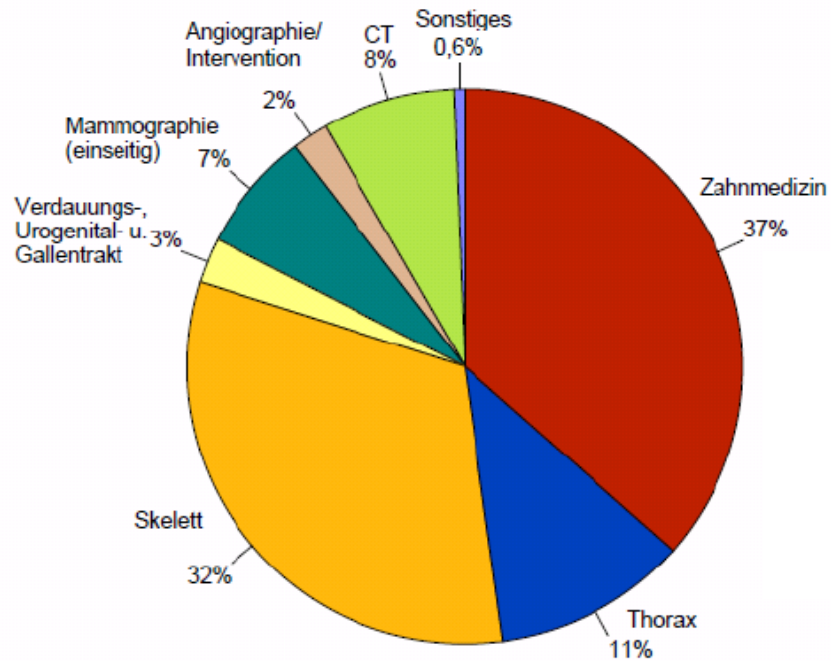
*Wie ändert sich die Fluenz der einfallenden Strahlung, wenn ich den Abstand zur Quelle vervierfache?*

Die Fluenz nimmt mit dem Quadrat des Abstandes ab.

Wird der Abstand vervierfacht, so verringert sich die Fluenz um den Faktor  $4^2=16$ .



Häufigkeit

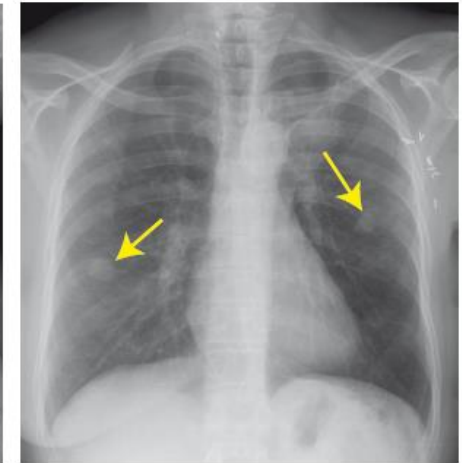


[1]

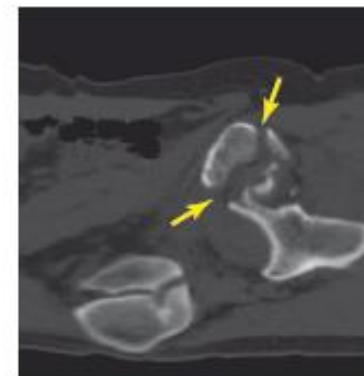
Radiographie



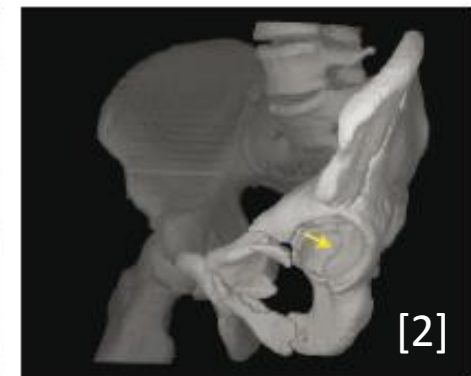
[2]



3D-CT



(a)



(b)

[2]





[2]



(a)

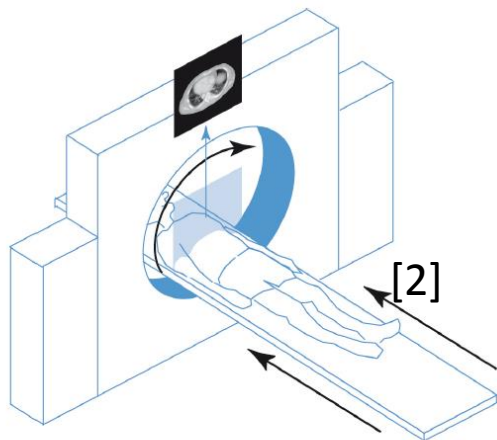


(b)

[1]

CT: Querschnittsbilder, die die Röntgenabschwächung repräsentieren

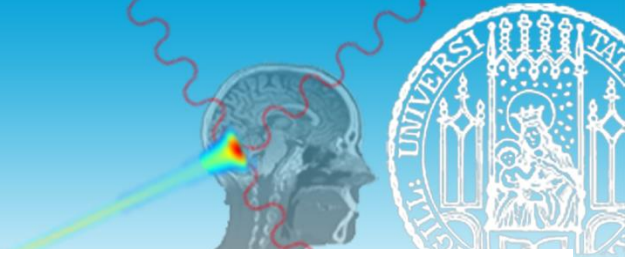
3D Tomographie:  
Messung mehrerer CT Einzelschichten



(a)



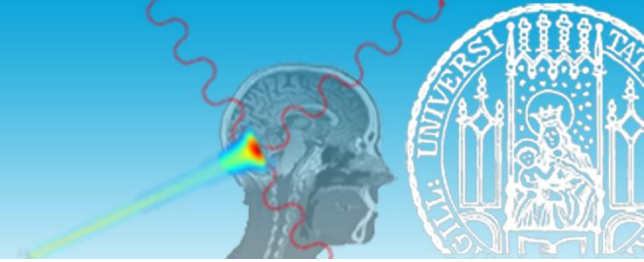
# CT: Kontrast



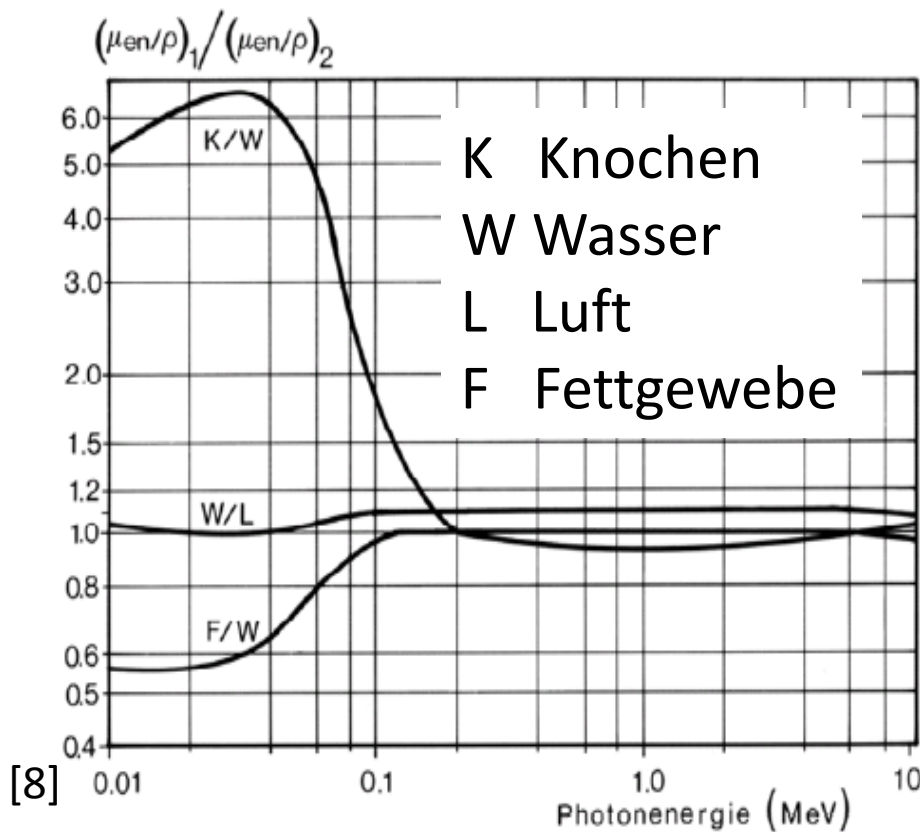
Demonstrationsbeispiel für  
Gewebekontrast in der CT



# Kontrast



Der Massenabsorptionskoeffizient  $\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$  ist gleich dem linearen Abschwächungskoeffizienten  $\mu$  bezogen auf die Dichte  $\rho$  des Materials.

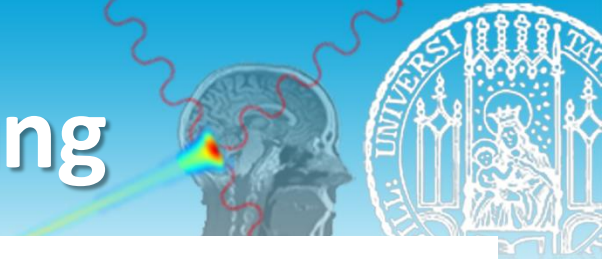


Der **Kontrast** verschiedener Gewebetypen hängt vom **Massenabsorptionskoeffizienten** und der **Photonenenergie** ab

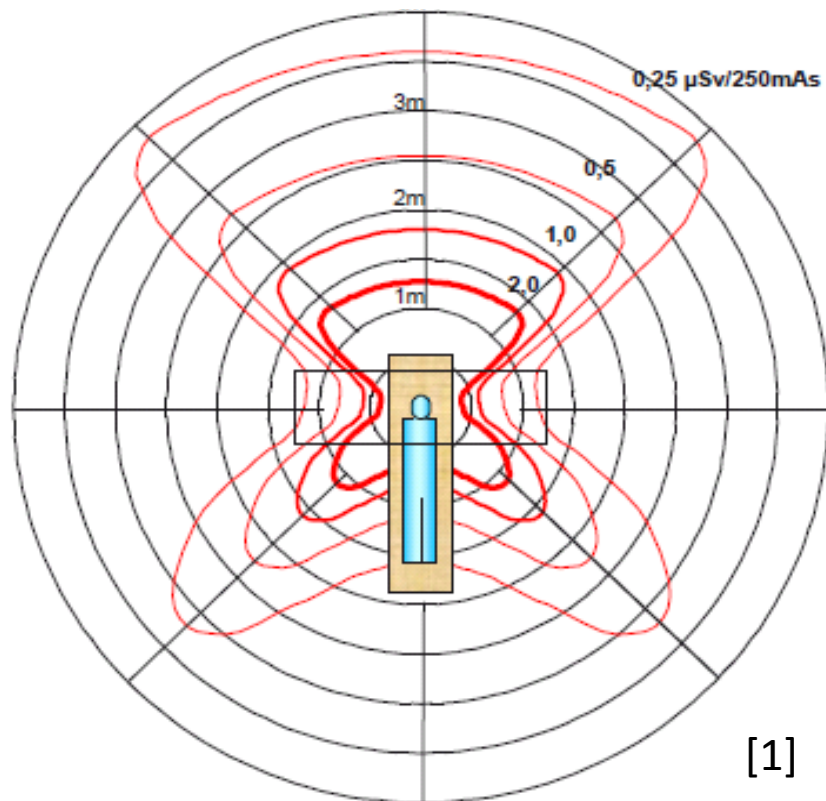
Bildgebung : 40-80 keV  
→ hoher Gewebekontrast

*Verhältnisse von Massenabsorptionskoeffizienten für verschiedene Substanzen in Abhängigkeit der Photonenergie*

# CT: Strahlenbelastung

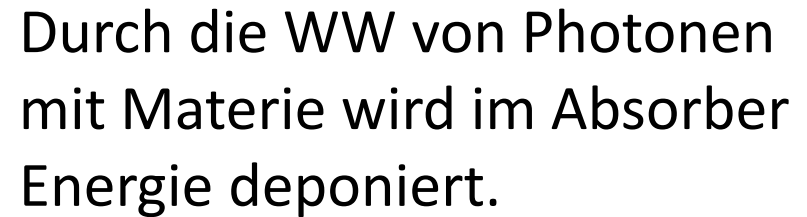


**Fig. 19.10:** Typische Dosisleistungsverteilung im Streustrahlungsfeld einer modernen CT-Anlage mit Patient. Die Isodosenlinien sind von innen nach außen 2, 1, 0,5 und 0,25  $\mu\text{Sv}/250\text{mAs}$  mit Patient für einen einzelnen Schnitt mit der Schichtdicke 1 cm. Die starken Dosisseinbrüche nach kaudal (fußwärts) sind durch die Selbstabsorption durch den Patienten, die lateralen Dosisseinbrüche durch die CT-Gantry verursacht (numerische Ortsdosiswerte s. Anhang Tab. 20.14.1).



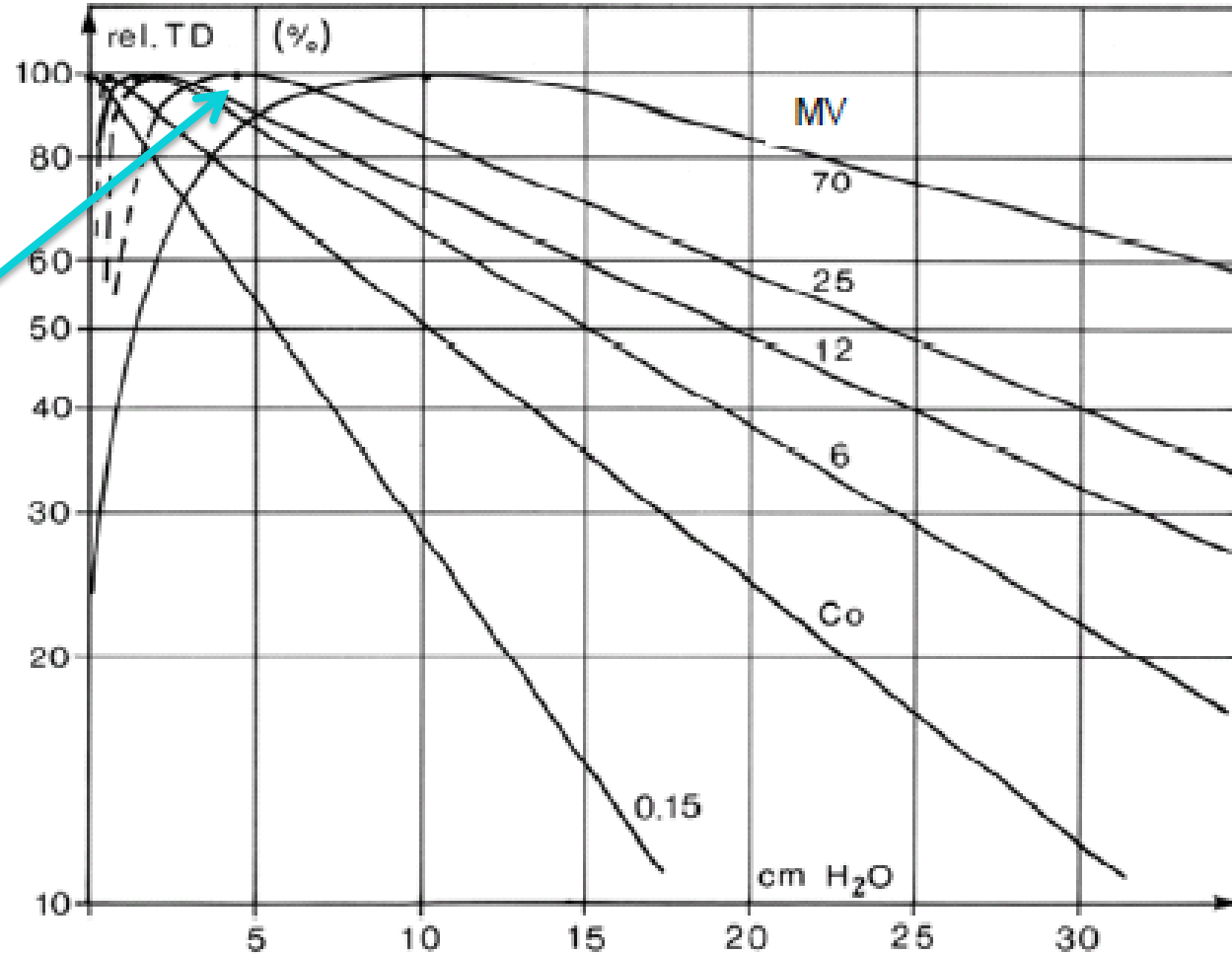
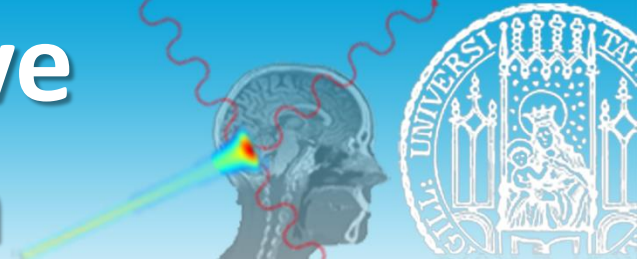
$$Dosis = \frac{\text{absorbierte Energy}}{\text{Masse}}, [D]=\text{J/kg}$$

Äquivalentdosis in Sv entspricht Dosis multipliziert mit Gewebespezifischen Wichtungsfaktoren und wird als Masszahl im Strahlenschutz verwendet.



Dies wird in der Strahlentherapie ausgenutzt, indem im Tumor gezielt soviel Energie deponiert wird, dass die Tumorzellen derart stark geschädigt werden, dass sie sich nicht mehr selbst reparieren können und absterben.

# Tiefendosiskurve von Photonen



Dosis-  
Aufbaueffekt

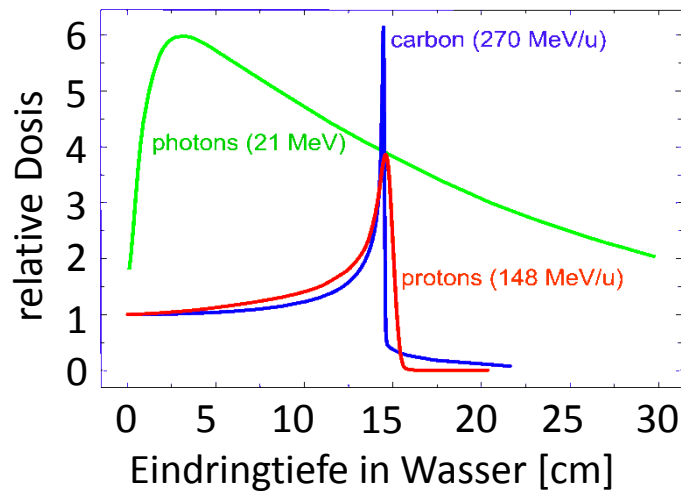
[8]



# Ionentherapie



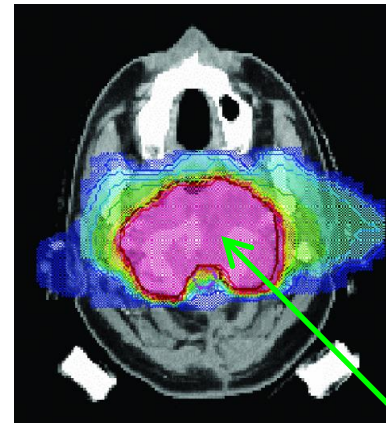
In Teilchenbeschleunigern (z.B. Synchrotrons) werden heutzutage rund  $10^8$  Kohlenstoff-Ionen pro Sekunde auf 70% der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt, um bestimmte Tumoren zu behandeln.



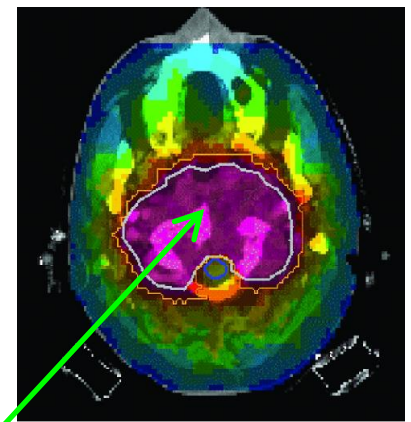
% of  
max  
Dosis



Kohlenstoff  
2 Richtungen



Gamma-Strahlung  
9 Richtungen

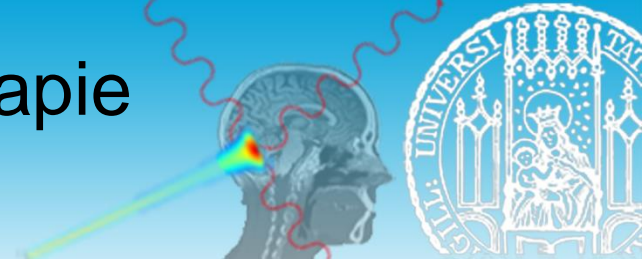


Tumor

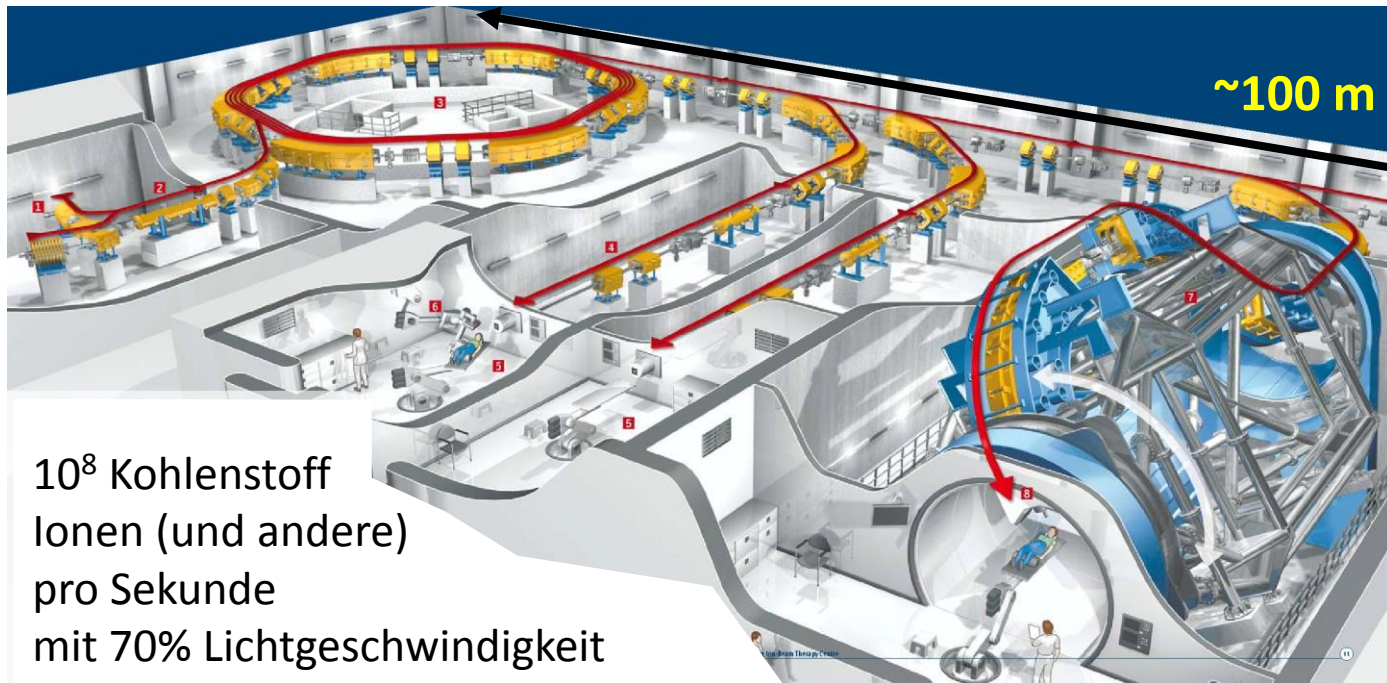
- Exzellente Erfolgsraten bei resistenten Tumoren (GSI-Darmstadt seit 1993)
- Reduzierte Beeinträchtigung der Haut
- Noch recht junge Technik, die sich derzeit in der Medizin etabliert



# Heidelberg Ionen Therapie (HIT) Zentrum



**1903:** W.H. Bragg (1915 Nobel-price), **1929:** 1. Cyclotron, **1946:** Idee zur Ionentherapie (R.R.Wilson), **1952:** Synchrotron (Protonen), **1990:** ESR @ GSI, Darmstadt, **1997:** 1. Patientenbehandlung, **2009:** Klinik-Betrieb HIT

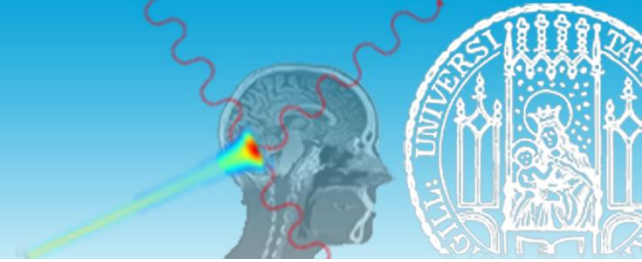


$10^8$  Kohlenstoff  
Ionen (und andere)  
pro Sekunde  
mit 70% Lichtgeschwindigkeit



K. Parodi  
Lehrstuhl für  
Medizin-Physik  
LMU

***Unsere Vision: Kompakte Beschleuniger für Ionen und Elektronen, basierend auf einem Lasersystem, mit neuartigen Anwendungsmöglichkeiten in Medizin und Forschung.***



- 1) Krieger, H. Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes, Springer, 2012
- 2) Suetens, P. Fundamentals of Medical Imaging, Cambridge University Press
- 3) Krieger, H. , Strahlungsquellen für Technik und Medizin, Springer, 2013
- 4) Demtröder, W., Experimentalphysik 3, Springer, 2014
- 5) Harten, U. Physik für Mediziner, Springer, 2011
- 6) Meschede, D., Gerthsen Physik, Springer, 2010
- 7) Schätz, J. (Hrsg.), Erste Hilfe - Physik und Chemie für Mediziner, Springer, 2012
- 8) Krieger, H., Strahlungsmessung und Dosimetrie, Springer, 2013