



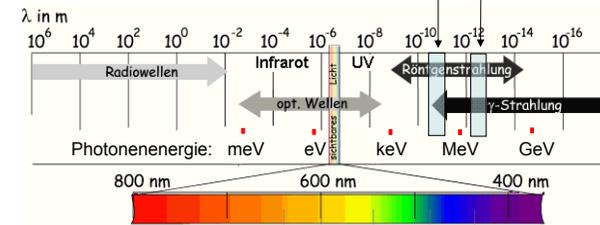
Röntgenstrahlung

Erzeugung und Eigenschaften

Physikalische Grundlagen der Röntgendiagnostik

Charakterisierung der Röntgenstrahlung

- elektromagnetische Strahlung
- Photonenergie:
 - Diagnostik: 30-200 keV
 - Therapie: 5-20 MeV
- Wellenlänge: ~ pm



- Wirkungen:
 - Ionisation
 - Lumineszenz (Fluoroskopie, Bildverstärker)
 - chemische (z.B. Photo)
 - biologische (Strahlenschädigung)
- Entstehung: in der Elektronenhülle
- Typen
 - Bremsstrahlung
 - charakteristische Strahlung



Historie

- 1895 Wilhelm Conrad Röntgen X-Strahlung (X-ray)
- 1896 erste medizinische Anwendung
- 1901 Nobel Preis (erste Nobel Preis in Physik)
- ... heute: 3D Röntgen-CT



Entstehung der Röntgenstrahlung

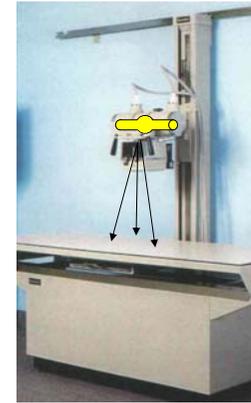
Röntgenstrahlung Entsteht wenn
hochenergetische (beschleunigte)
geladene Teilchen ihre Energie abgeben.

Elektronen E_{kin}

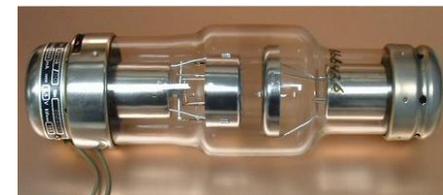
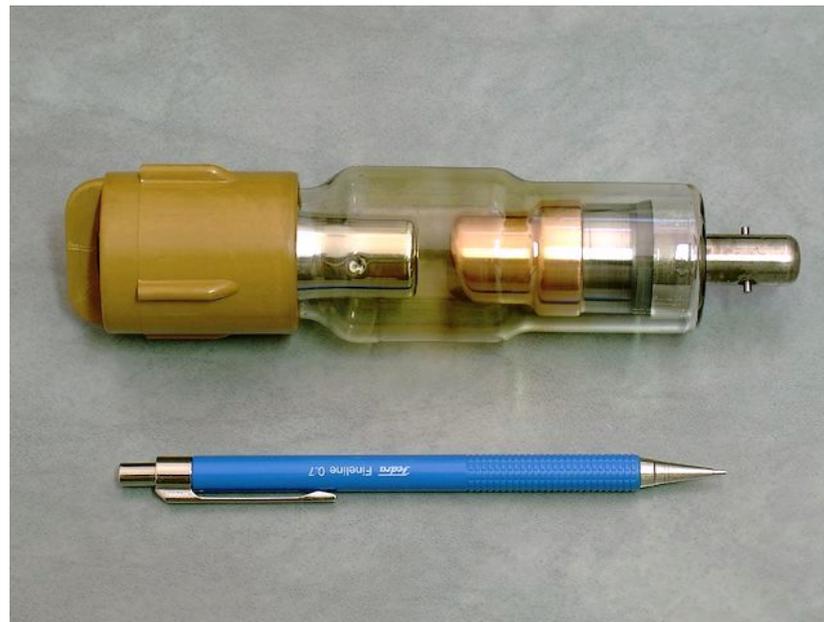
Röntgenröhre (Diagnostik)
Teilchenbeschleuniger (Therapie)

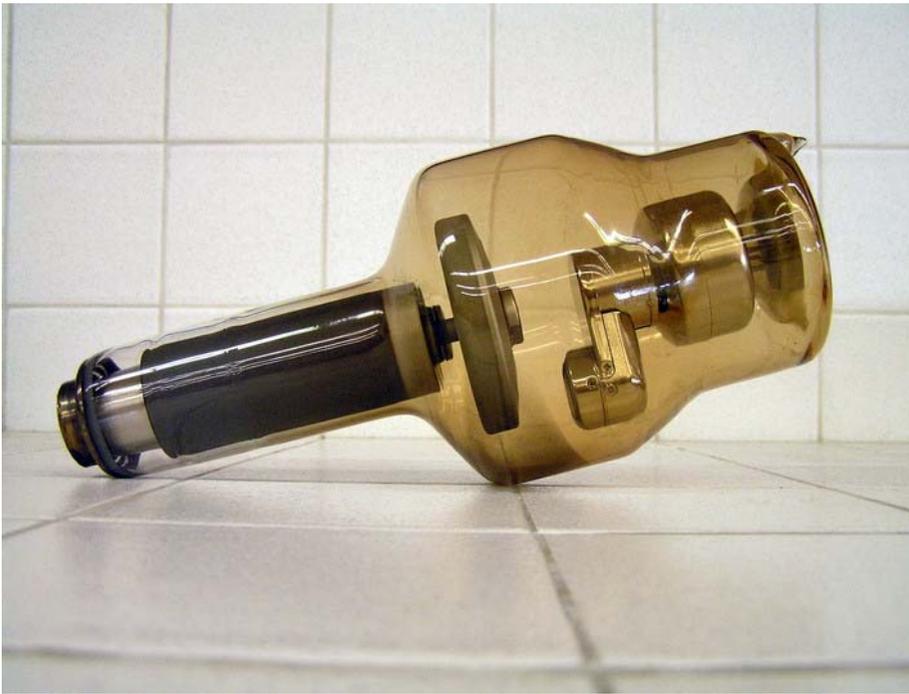
Geräte zur Erzeugung der Röntgenstrahlung

Röntgenröhre

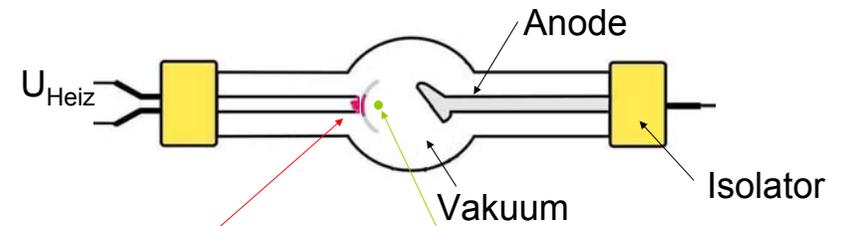


Teilchenbeschleuniger





Die Röntgenröhre (1)

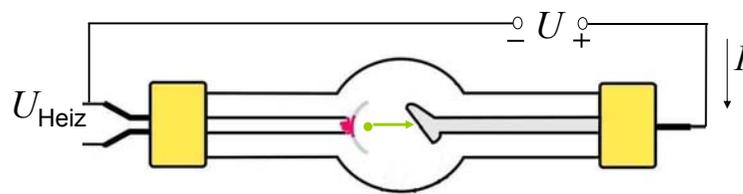


Heizkathode: Heizung (T Erhöhung) \Rightarrow Erhöhte thermische Energie \Rightarrow **Elektronen** treten aus der Kathode aus.

(Glühelektrischer Effekt)



Die Röntgenröhre (2)



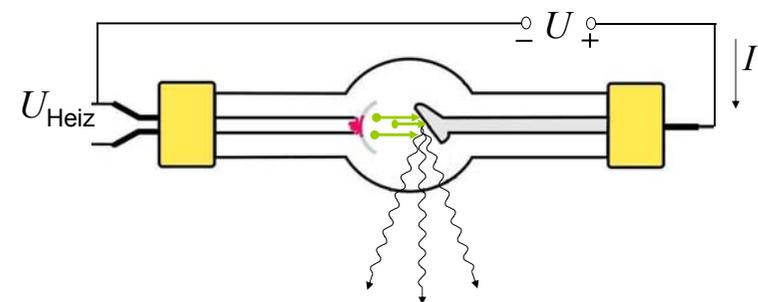
Anodenspannung(U) (typisch 30-200 kV):
beschleunigt die Elektronen

$$U \cdot e = E_{\text{kin}}$$

Elementarladung
 $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

kinetische Energie
des beschleunigten Elektrons

Die Röntgenröhre (3)

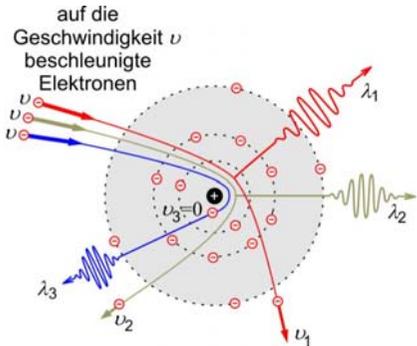


Röntgenstrahlung entsteht wenn die beschleunigten Elektronen auf die Anode prallen.

1. Abbremsung (Bremsstrahlung)
2. Elektronenausstoß+Elektronenübergang (Charakteristische Str.)

Bremsstrahlung

Kinetische Energie \Rightarrow Photonenenergie (Rtg)
 \Rightarrow Thermische Energie



$$E_{\text{kin}} \geq hf$$

$$Ue = E_{\text{kin}} \geq hf = h \frac{c}{\lambda}$$

$$Ue \geq h \frac{c}{\lambda}$$

$$\lambda \geq \frac{hc}{Ue} = \lambda_{\text{min}}$$

Grenzwellenlänge, Duane-Hunt Gesetz

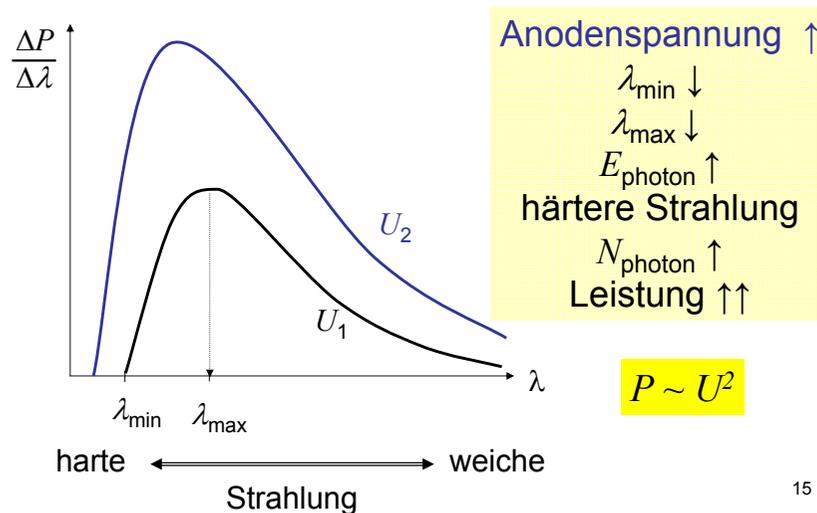
$$\lambda \geq \frac{hc}{Ue} = \lambda_{\text{min}}$$

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

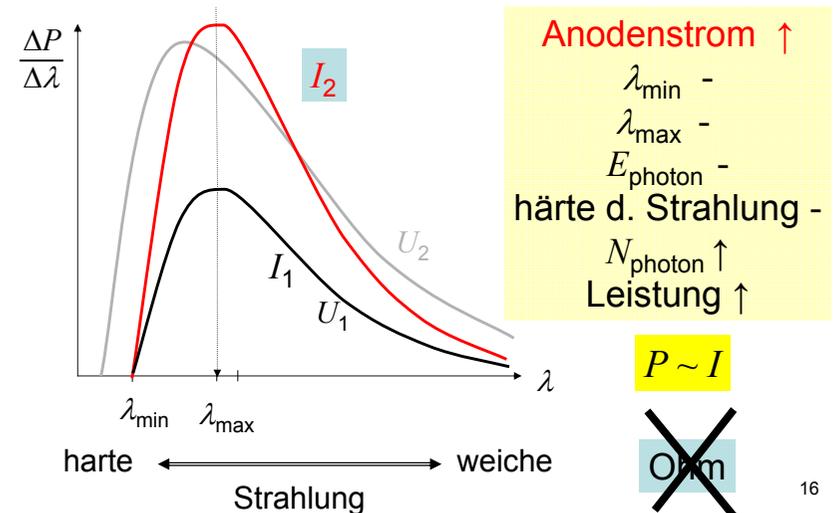
nicht SI
 aber praktische
 Einheit

Rechenaufgaben 21 u. 22

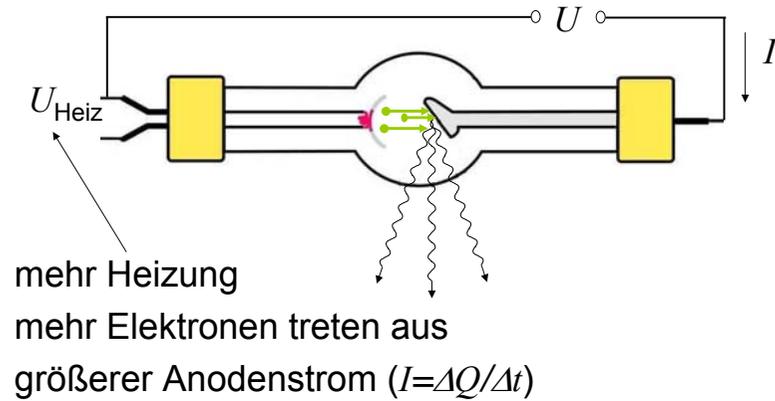
Emissionsspektrum der Bremsstrahlung



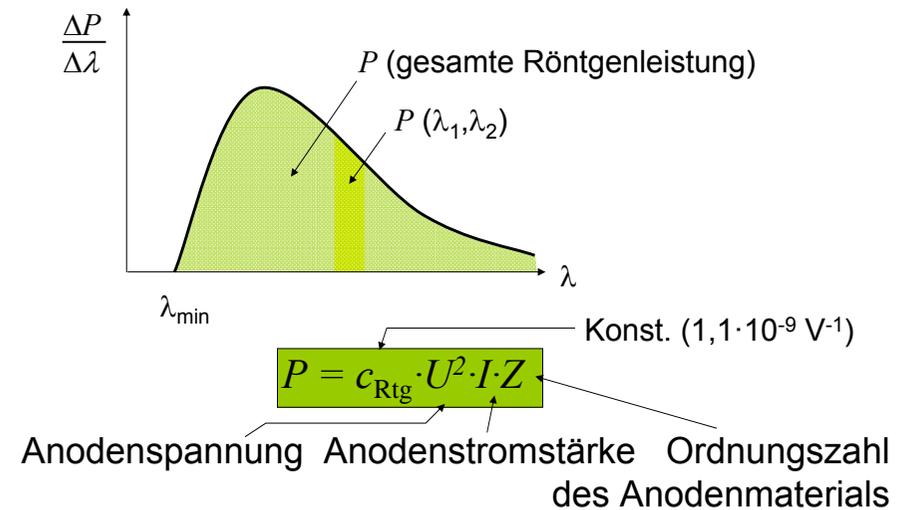
Emissionsspektrum der Bremsstrahlung



Regulierung der Anodenstromstärke



Leistung der Röntgenstrahlung



Wirkungsgrad der Röntgenröhre

$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{\text{nützliche Leistung}}{\text{investierte Leistung}}$$

$$\eta = \frac{c_{\text{Rtg}} U^2 I Z}{UI} = c_{\text{Rtg}} U Z$$

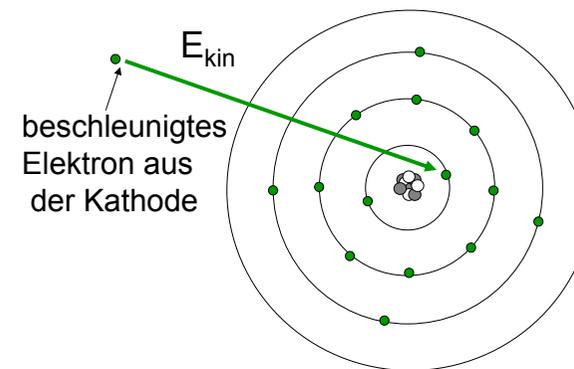
Anodenmaterial mit hoher Ordnungszahl!
Praktisch: Wolfram ($Z=74$)
typisches η : 1% **99% Wärme!**



$Z_{\text{blei}} = 82!$

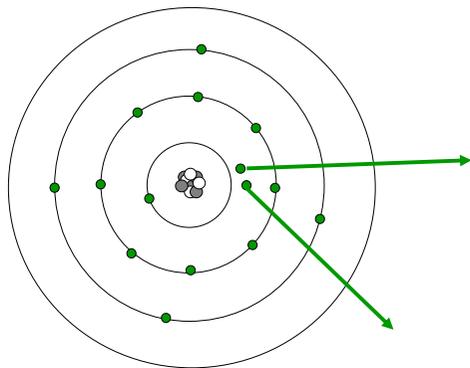
Aber: $T_{\text{Schm,W}} \approx 3400^\circ\text{C}$ $T_{\text{Schm,Pb}} \approx 330^\circ\text{C}$

Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung



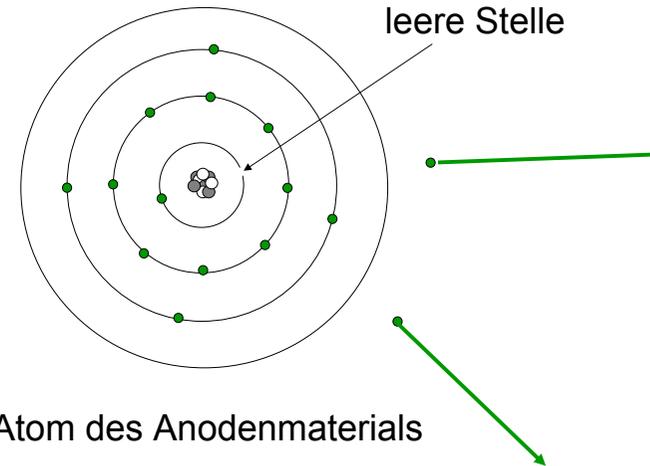
Atom des Anodenmaterials

Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung



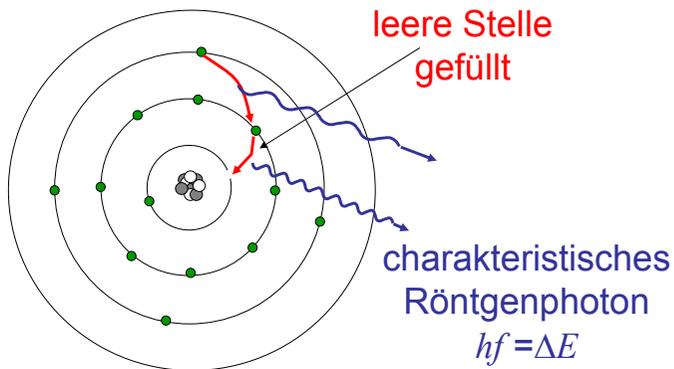
Atom des Anodenmaterials

Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung



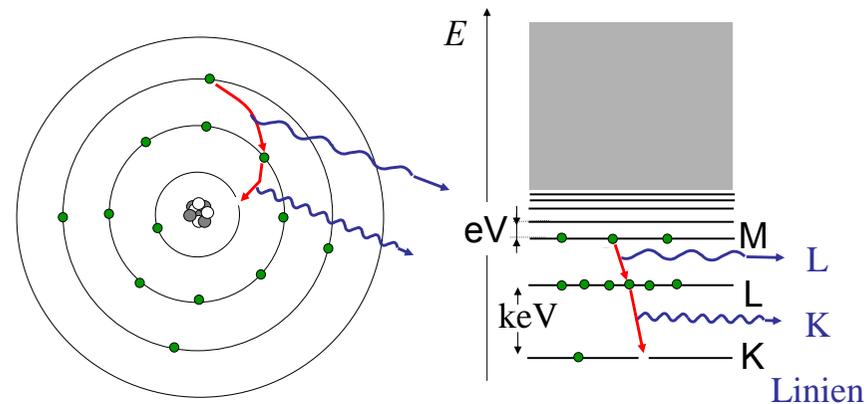
Atom des Anodenmaterials

Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung



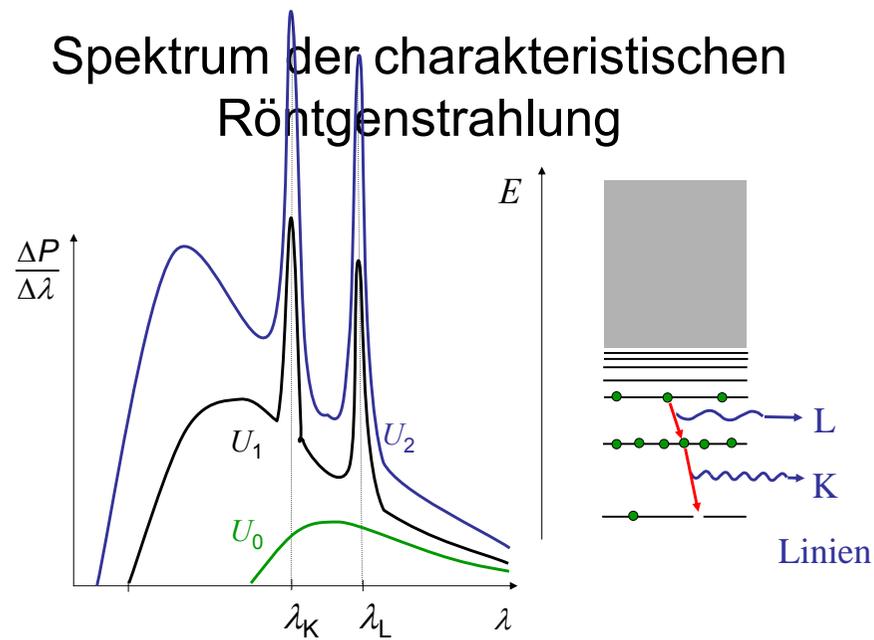
Atom des Anodenmaterials

Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung



Atom des Anodenmaterials

Spektrum der charakteristischen Röntgenstrahlung



Anwendung der charakteristischen Röntgenstrahlung

fast monochromatische Röntgenstrahlung

-Diagnostik (zB.: Mammographie)

-Strukturanalyse der Materie (Röntgenbeugung)



Röntgendiagnostische Verfahren

Summationsbild $\begin{cases} \rightarrow \text{- Statische Aufnahme (Filmaufnahme)} \\ \rightarrow \text{- Gleichzeitiges Bild (Fluoroskopie)} \end{cases}$

Tomographisches Bild CT

Spezialitäten: Anwendung von Kontrastmitteln, Digitalisierung, Substraktion

Schwächung der Röntgenstrahlung

Grund der Röntgendiagnostik
Ähnlich zur Schwächung
der γ -Strahlung



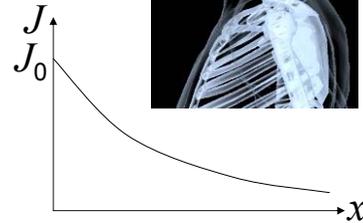
Schwächungsgesetz:

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

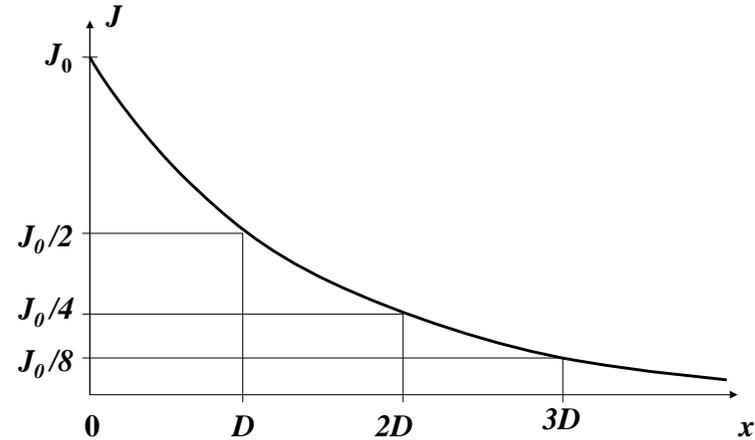
$$\mu(\text{Stoff}, \rho, \lambda) = \mu_m(\text{Stoff}, \lambda) \cdot \rho$$

Z

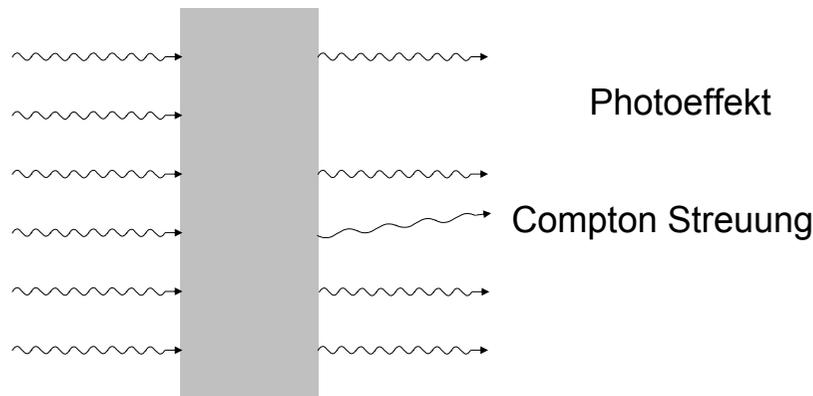
Massen-
schwächungs-
koeffizient



Schwächung der Röntgenstrahlung



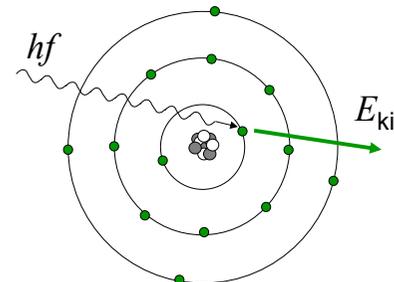
Teilprozesse der Schwächung der Röntgenstrahlung



$$\mu_m = \tau_m + \sigma_m (+ \kappa_m)$$

unterschiedliche Stoff(Z)-
und λ (oder E_{ph}) Abhängigkeit

Photoeffekt



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

starke Z Abhängigkeit!
diagn. Bedeutung!

Beispiel:

10% Z Erhöhung

110% = 1,1

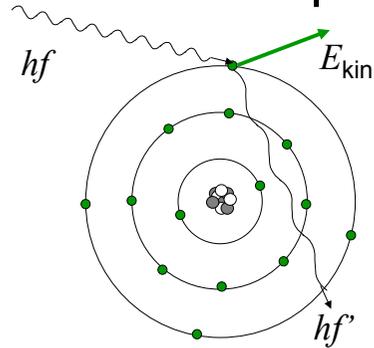
$1,1^3 = 1,331$

33% τ_m Erhöhung!

bei weicher Strahlung

$$\tau_m = \text{const} \frac{Z^3}{E_{\text{Photon}}^3}$$

Compton Streuung



$$\sigma_m = \text{const} \cdot Z / A$$

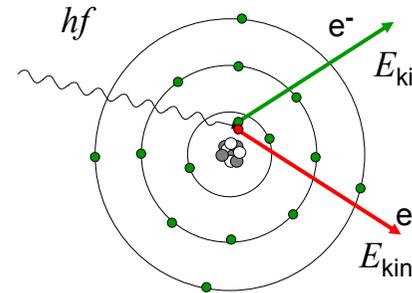
praktisch unabhängig von Z !

zB:

	C	P	Ca	Pb
Z	6	15	20	
A	12	≈31	40	
Z/A	0,5	0,48	0,5	

Schwache Wellenlängenabhängigkeit: $\sigma_m \sim \sqrt{\lambda}$

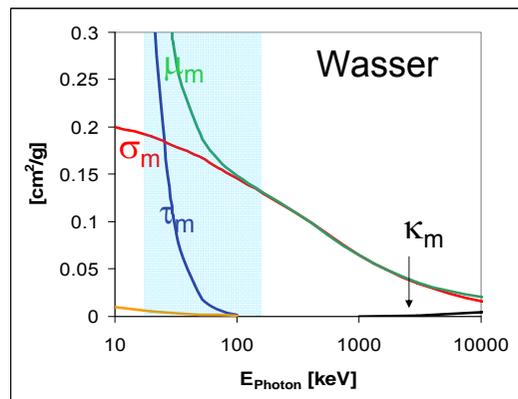
Paarbildung



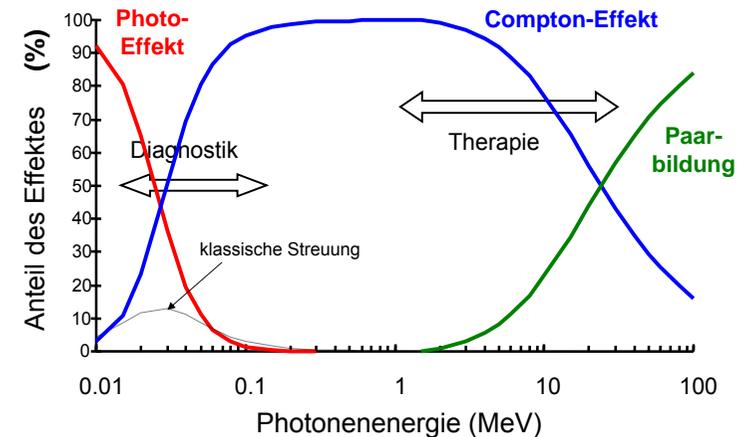
$$hf \geq 2 m_e c^2 \approx 1 \text{ MeV}$$

nur bei therap. Rtg. und γ -Strahlung

Photonenenergieabhängigkeit des Schwächungskoeffizienten

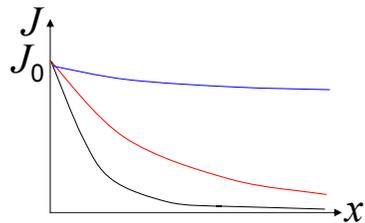


Verteilung der Effekte der Strahlenschwächung für Wasser



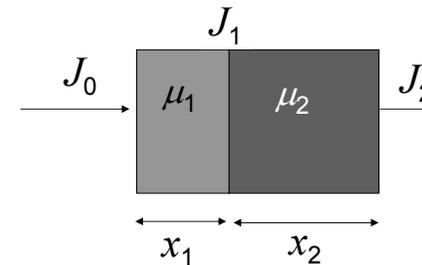
Röntgenbildentstehung

Grundprinzip der Röntgenbildentstehung: Unterschiedliche Strahlungsabsorption der verschiedenen Gewebe.



Luft
Weichteilgewebe
Knochen

Absorption von inhomogenen Körper

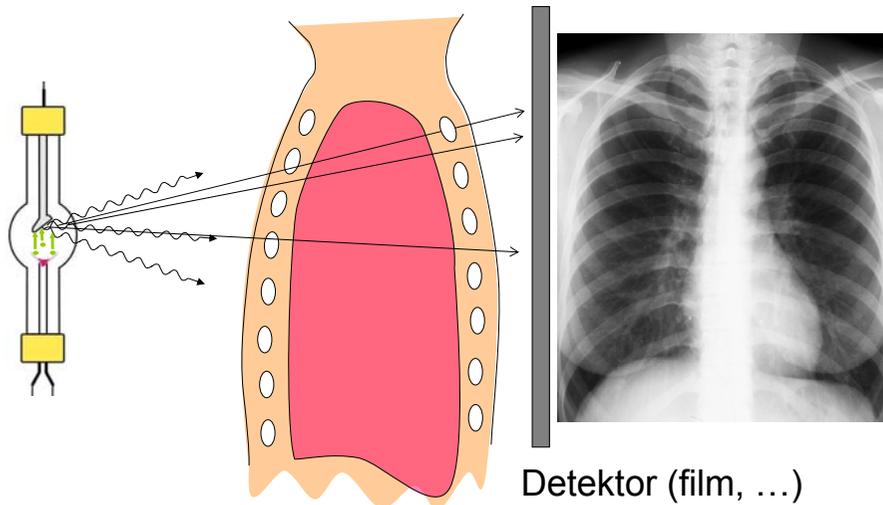


$\mu \cdot x$ Werte sind addiert (summiert)
Summationsbild

$$J_1 = J_0 e^{-\mu_1 x_1}$$

$$J_2 = J_1 e^{-\mu_2 x_2} = J_0 e^{-\mu_1 x_1} e^{-\mu_2 x_2} = J_0 e^{-(\mu_1 x_1 + \mu_2 x_2)}$$

Grundprinzip der Summationsaufnahmen



Detektor (film, ...)

Zusammenfassung der Schwächungsmechanismen

Mechanismus	Abhängigkeit des Massenschwächungskoeffizienten		Wichtiger Bereich im Gewebe
	von E	von Z	
Photoeffekt	$\sim 1 / E^3$	$\sim Z^3$	10 - 100 keV
Compton-Effekt	Nimmt ab mit E	unabhängig $\sim Z/A$	0.1 - 5 MeV
Paarbildung	Nimmt zu mit E	$\sim Z^2$	> 5 MeV

Kontrast des Röntgenbildes:
Photoeffekt ($\sim Z^3$)



Effektive Ordnungszahl

Bei Verbindungen oder Mischungen:

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

Z_i Ordnungszahl von i -ten Atomtyp

w_i Elektronenzahlverhältnis

zB: Wasser H_2O 10 Elektronen: 2 von H, 8 von O

$Z_H=1, Z_O=8, w_H=0,2 w_O=0,8$

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

Effektive Ordnungszahl der Gewebe

Zusammensetzung der verschiedenen Gewebe:

Element	Z	% Masse		
		in Fett- gewebe	in weichem Gewebe	in Knochen
H	1	11,2	10,2	8,4
C	6	57,3	12,3	27,6
N	7	1,1	3,5	2,7
O	8	30,3	72,9	41
P	15		0.2	7
Ca	20		0.007	14,7

Effektive Ordnungszahl: ≈ 6

7,4

13,8

Kontrast bei der Röntgenaufnahme

Schwächung durch Photoeffekt:

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

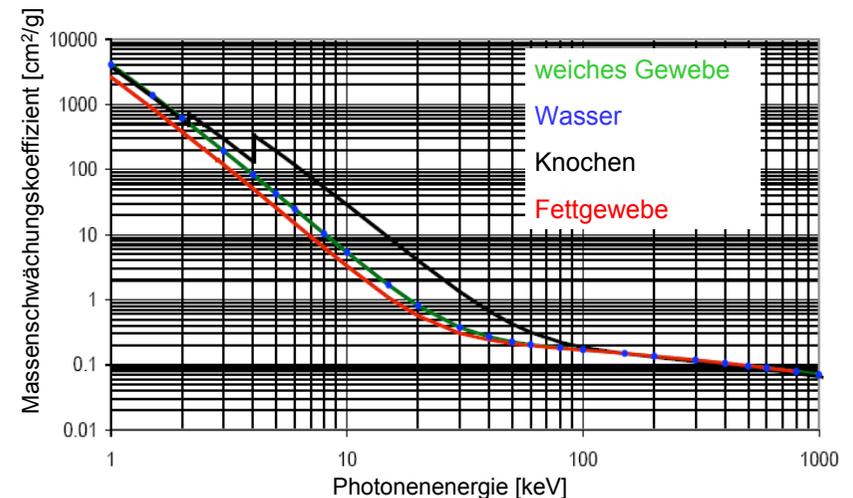
Schwächung durch Compton Streuung:

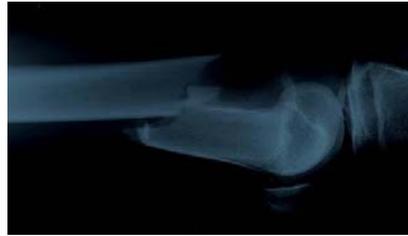
$$\frac{\sigma_{m,weiches Gewebe}}{\sigma_{m,Knochen}} = 1 \quad \sigma_m \text{ ist } Z \text{ unabhängig!}$$

$$\sigma_{m,Knochen}$$

$$\mu_m = \tau_m + \sigma_m \quad \mu = \mu_m \rho \quad \rho_{wG} = 1,05 \quad \rho_{Knochen} = 1,7..1,8$$

Photonenenergieabhängigkeit des Massenschwächungskoeffizienten





Kontrastmittel

Positives Kontrastmittel:

mehr Absorption

$$\mu \uparrow \quad \mu_m \uparrow \quad Z_{\text{eff}} \uparrow$$

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

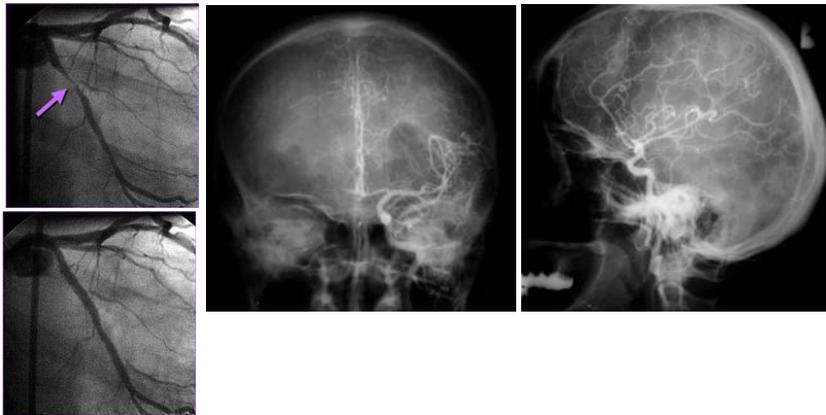
Jod (Z= 53)

Blutgefäß
(Angiographie)

Barium (Z=56)

Magen, Darm
in Form von BaSO_4

Angiographie



Kontrastmittel

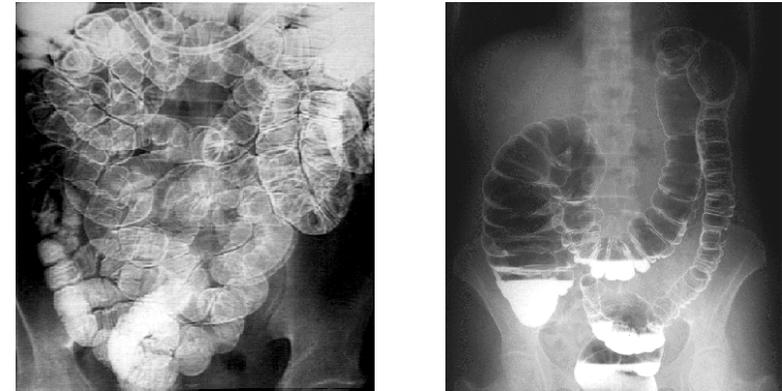
Negatives Kontrastmittel:

wenige Absorption $\mu \downarrow$ $\rho \downarrow$ $\mu_m - Z_{\text{eff}}$ -
Luft, CO₂ (Gase) in Darm

Doppelkontrast: gleichzeitige Anwendung von einem positiven und einem negativen Kontrastmittel.

BaSO₄ + Luft in Darm.

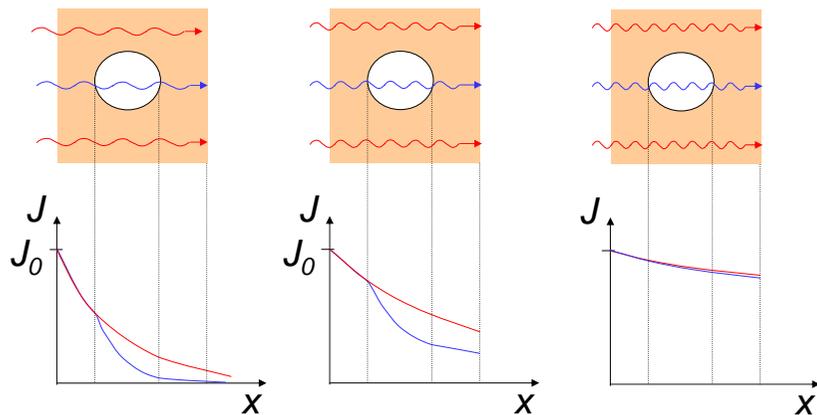
Doppelkontrastaufnahmen



Einfluss der Photonenenergie auf die Bildqualität

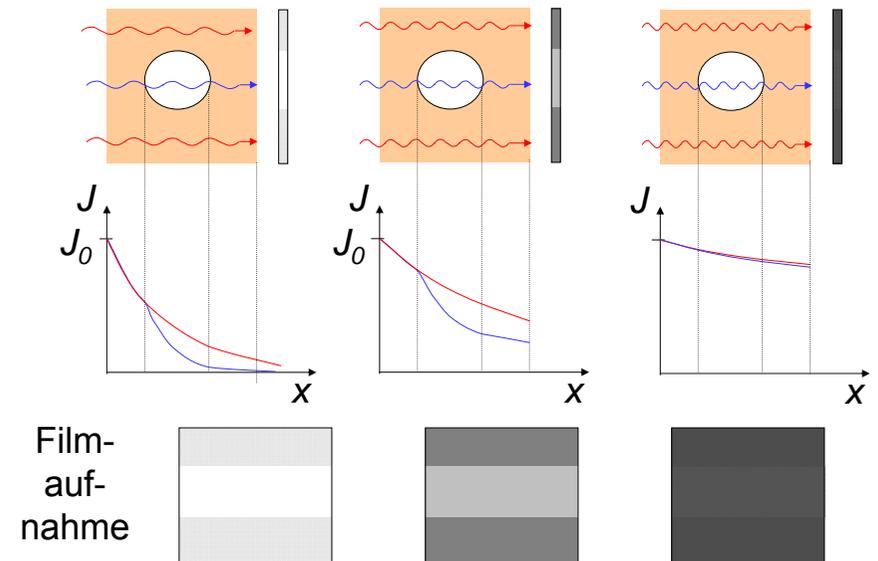
weiche Str.

harte Str.



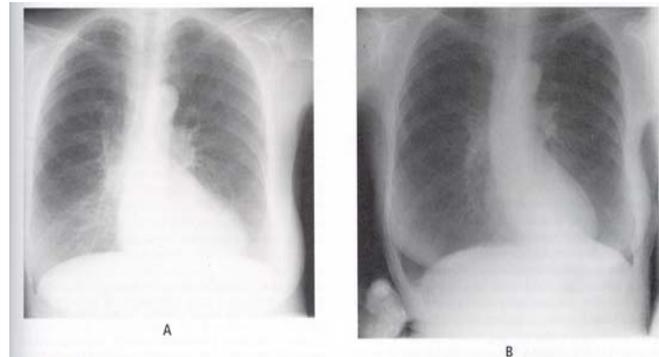
weiche Str.

harte Str.



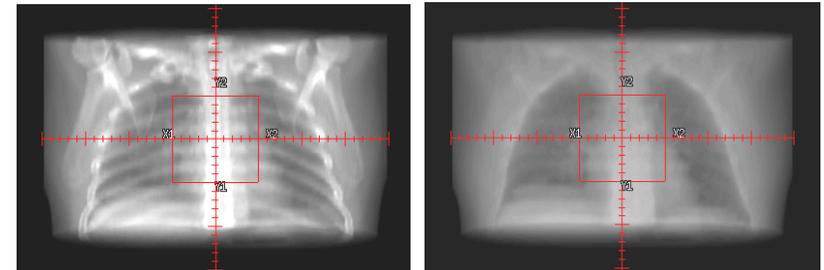
Film-
aufnahme

Einfluss der Photonenenergie auf die Bildqualität: Beispiele



$$U_1 < U_2$$

Einfluss der Photonenenergie auf die Bildqualität: Beispiele



30 keV

Photoeffekt: 36 %
Compton: 51 %
Paarbildung: 0 %

2 MeV

Photoeffekt: 0 %
Compton: 99 %
Paarbildung: 1 %