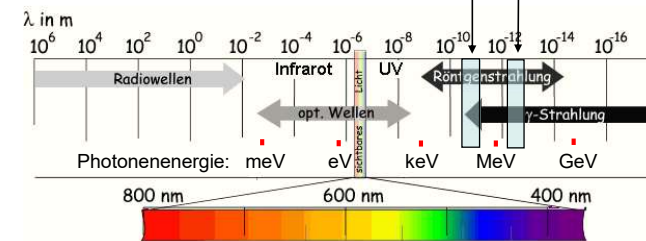




Charakterisierung der Röntgenstrahlung

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

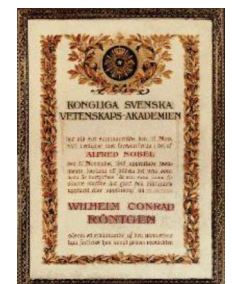
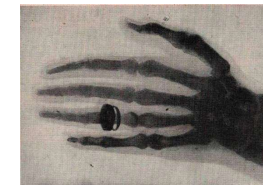


- Wirkungen:
 - Ionisation
 - Lumineszenz (Fluoroskopie, Bildverstärker)
 - chemische (z.B. Photo)
 - biologische (Strahlenschädigung)
- Entstehung: in der Elektronenhülle
- Typen
 - Bremsstrahlung
 - charakteristische Strahlung



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}

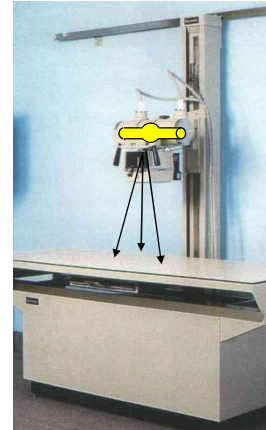
Röntgenröhre (Diagnostik)

Teilchenbeschleuniger (Therapie)

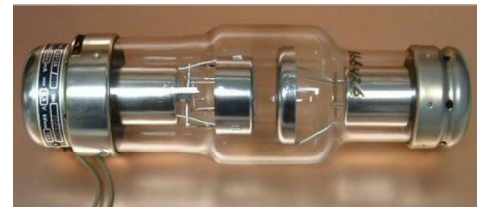


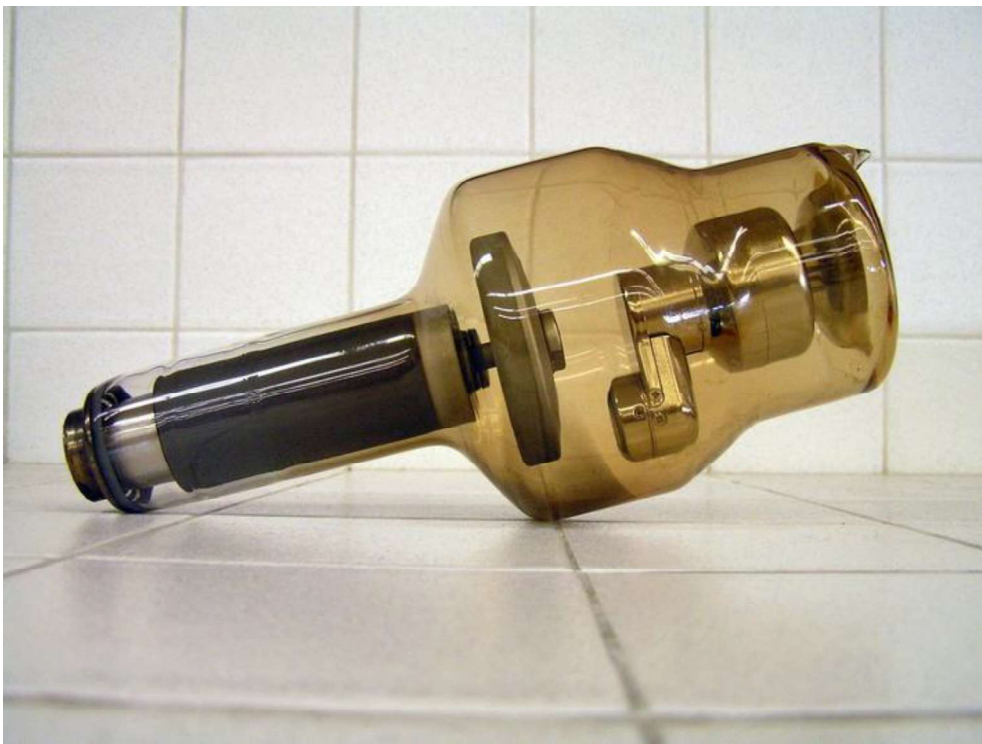
Geräte zur Erzeugung der Röntgenstrahlung

Röntgenröhre

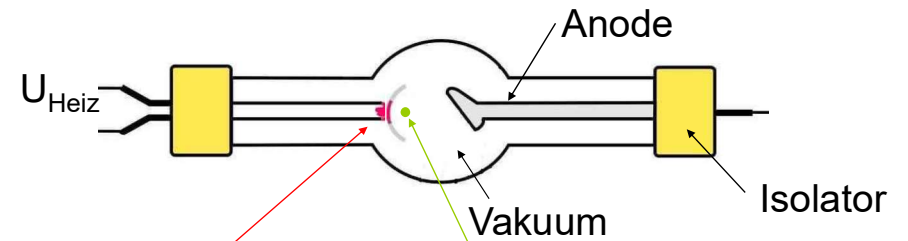


Teilchenbeschleuniger





Die Röntgenröhre (1)

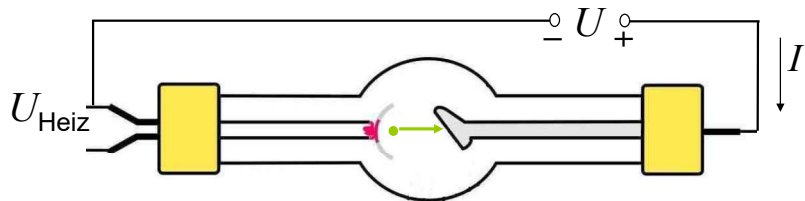


Heizkathode: Heizung (T Erhöhung) \Rightarrow Erhöhte thermische Energie \Rightarrow **Elektronen** treten aus der Kathode aus.

(Glühelektrischer Effekt)



Die Röntgenröhre (2)



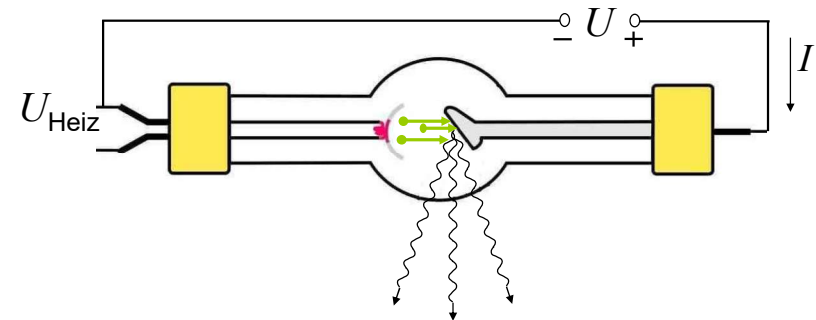
Anodenspannung(U) (typisch 30-200 kV): beschleunigt die Elektronen

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

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

kinetische Energie
des beschleunigten Elektrons

Die Röntgenröhre (3)

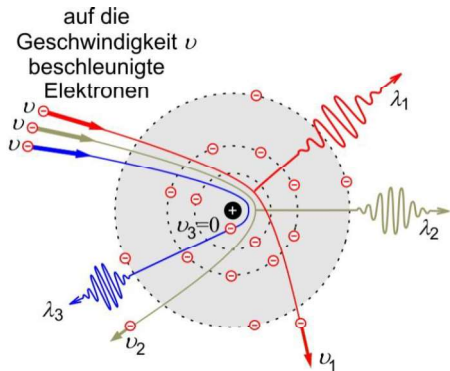


Röntgenstrahlung entsteht wenn die beschleunigten Elektronen auf die Anode prallen.

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

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

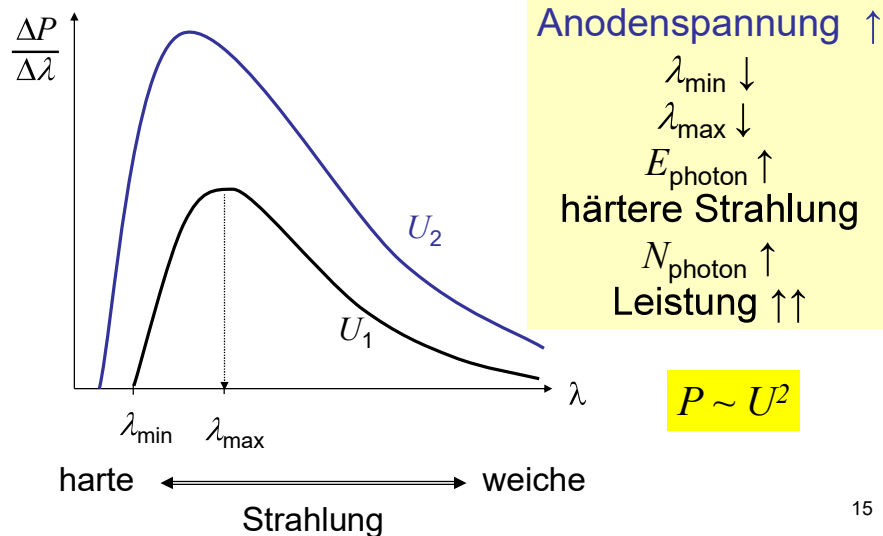
Konst.

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

nicht SI aber praktische Einheit

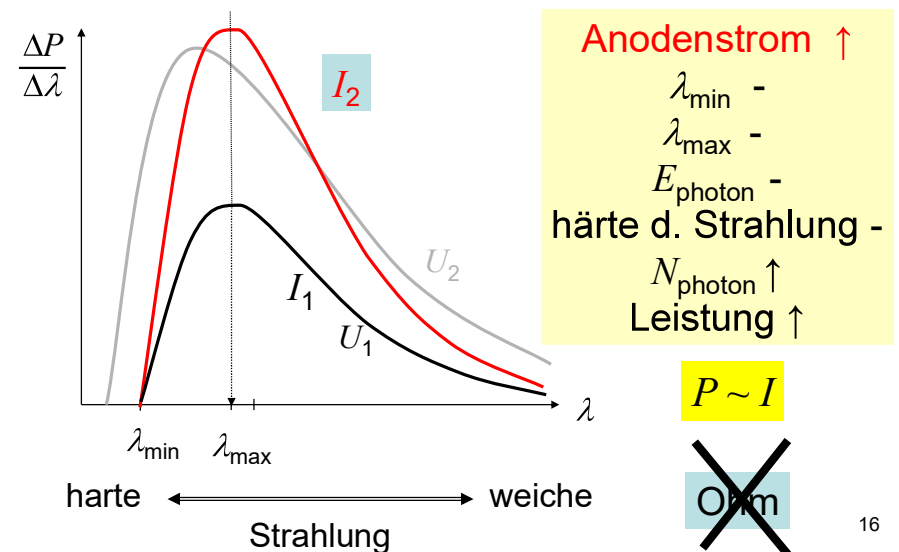
Rechenaufgaben 21 u. 22

Emissionsspektrum der Bremsstrahlung



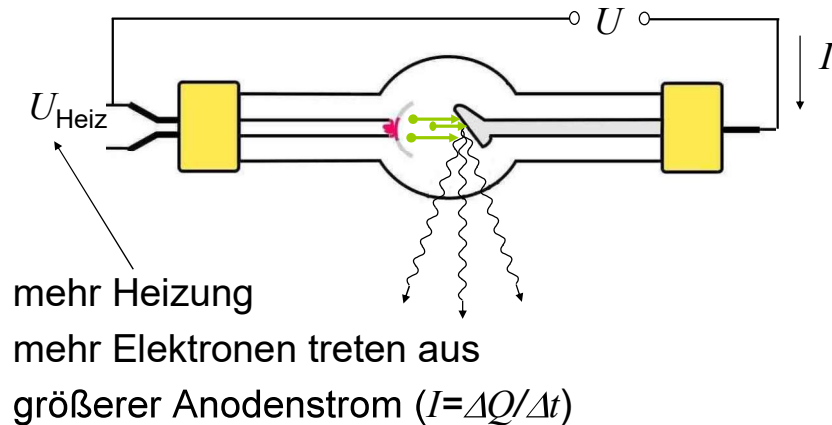
15

Emissionsspektrum der Bremsstrahlung

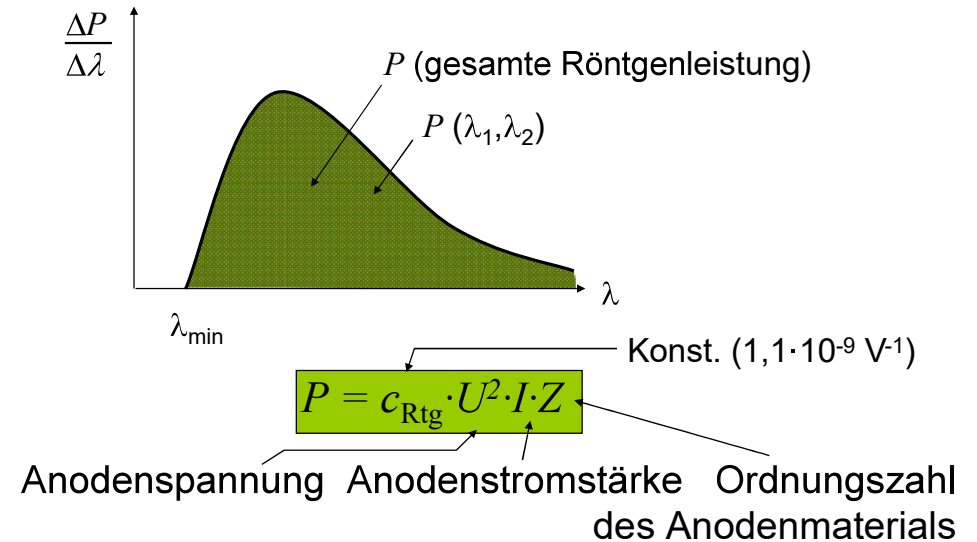


16

Regulierung der Anodenstromstärke



Leistung der Röntgenstrahlung



Wirkungsgrad der Röntgenröhre

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

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

Anodenmaterial mit hoher Ordnungszahl !

Praktisch: Wolfram ($Z=74$)

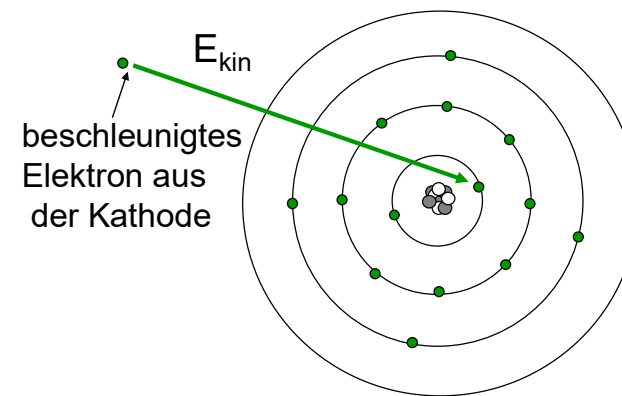
typisches η : 1% **99% Wärme!**



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

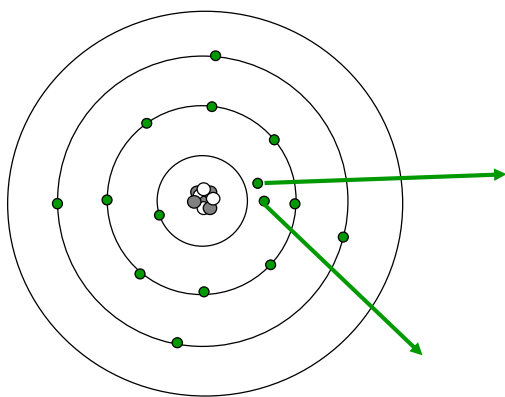
Aber: $T_{\text{Schm,W}} \approx 3400^\circ\text{C}$ $T_{\text{Schm,Pb}} \approx 330^\circ\text{C}$

Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung



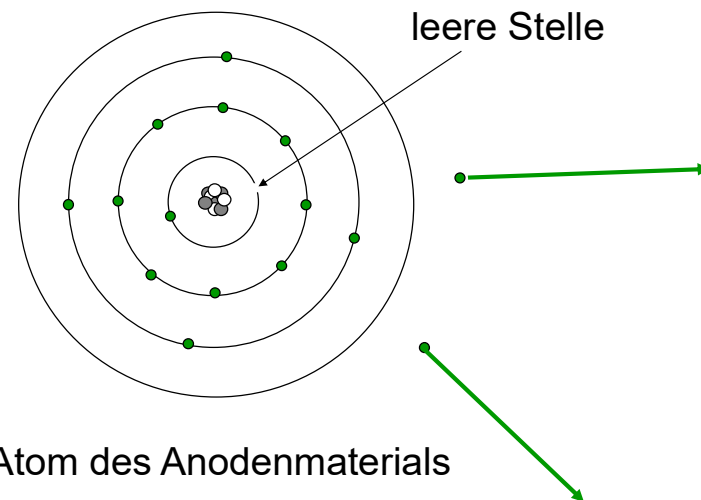
Atom des Anodenmaterials

Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung



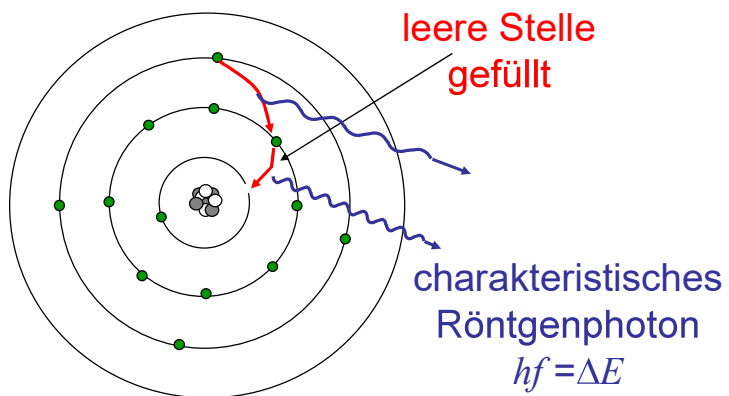
Atom des Anodenmaterials

Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung



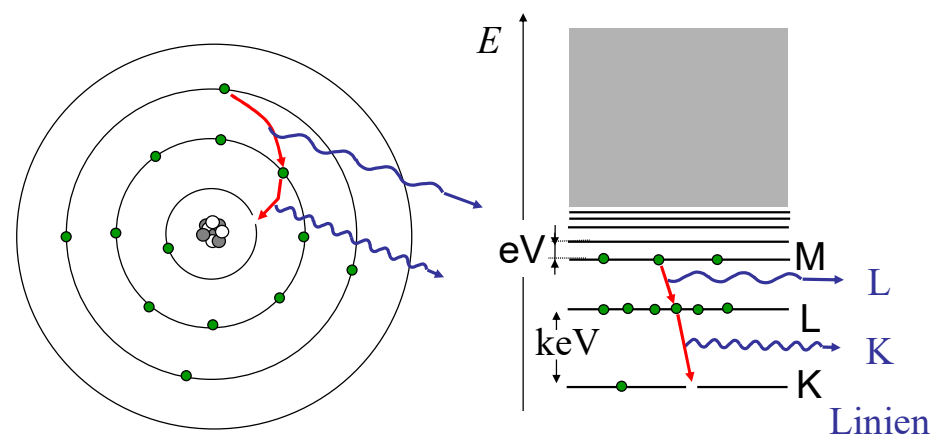
Atom des Anodenmaterials

Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung



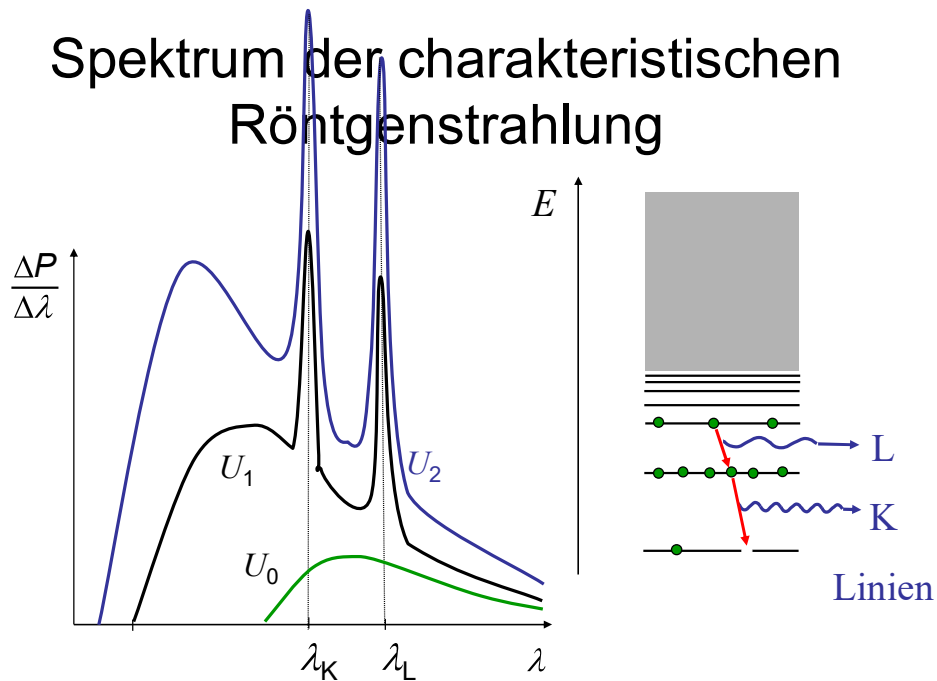
Atom des Anodenmaterials

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)

Schwächung der Röntgenstrahlung

Grund der Röntgendiagnostik
Ähnlich zur Schwächung
der γ -Strahlung

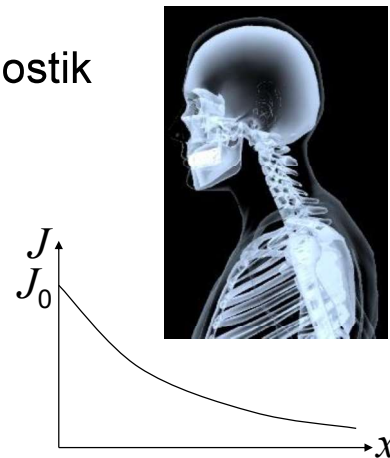
Schwächungsgesetz:

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

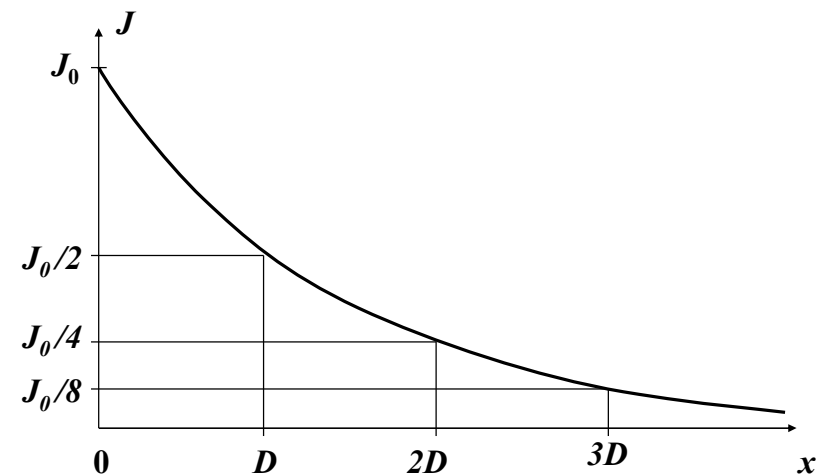
$$\mu(\text{Stoff}, \varrho, \lambda) = \mu_m(\text{Stoff}, \lambda) \cdot \varrho$$

Z

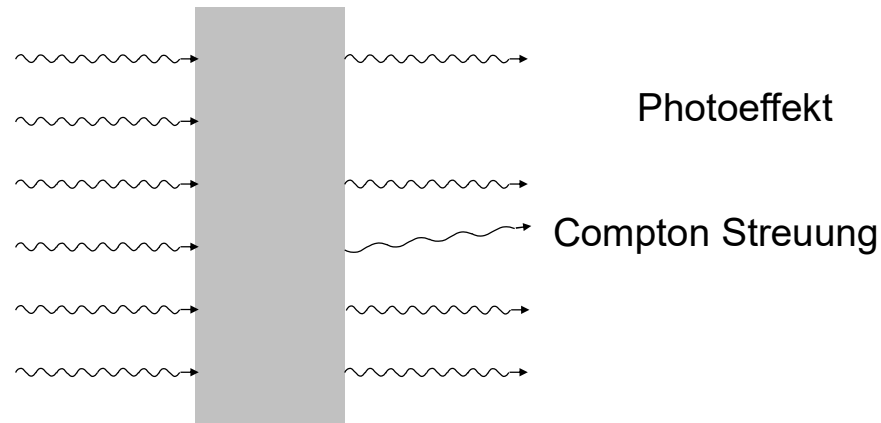
Massen-
schwächungs-
koeffizient



Schwächung der Röntgenstrahlung



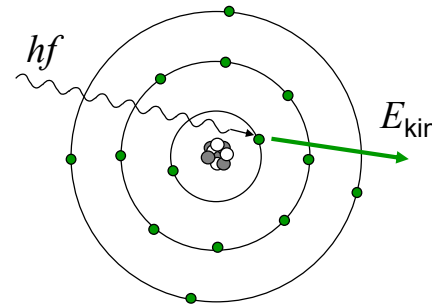
Teilprozesse der Schwächung der Röntgenstrahlung



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

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

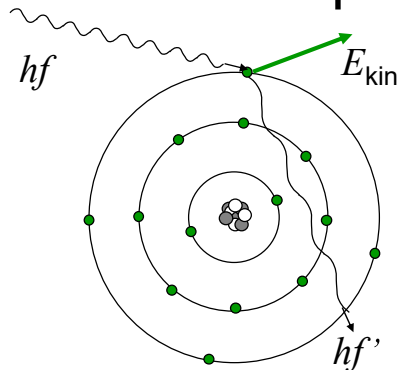
1,1³=1,331

33% τ_m Erhöhung!

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

bei weicher Strahlung

Compton Streuung



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

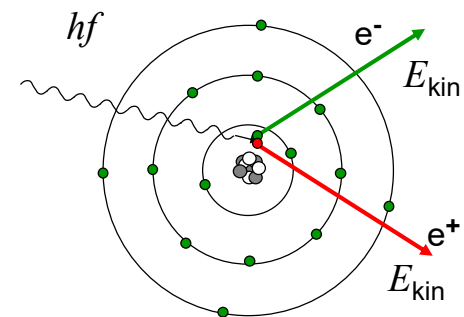
praktisch unabhängig von Z !

zB:

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

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

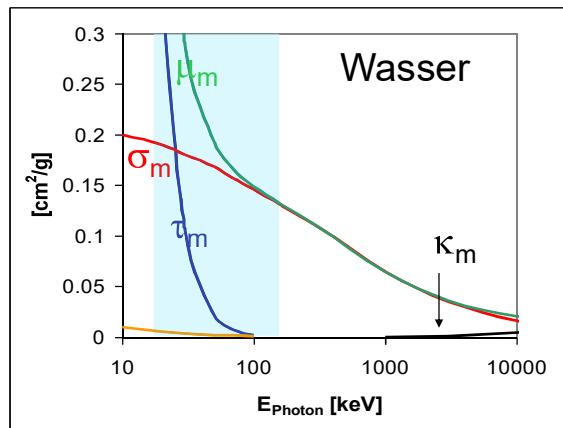
Paarbildung



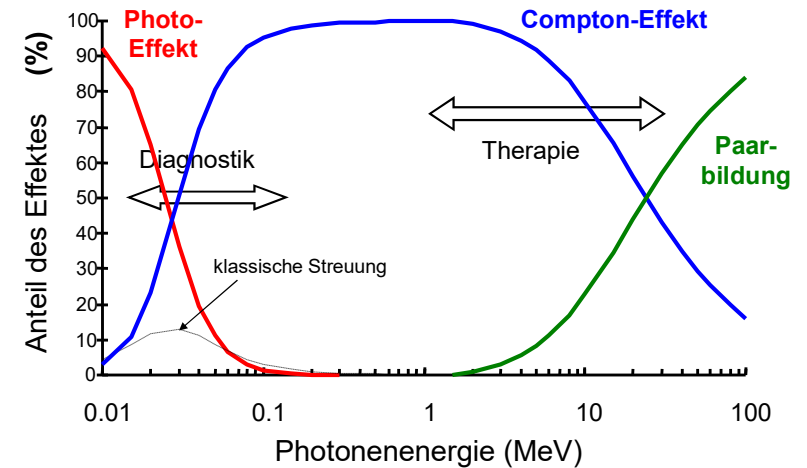
$$hf \geq 2 m_e c^2 \approx 1 \text{ MeV}$$

nur bei therap. Rtg.
und γ -Strahlung

Photonenenergieabhängigkeit des Schwächungskoeffizienten

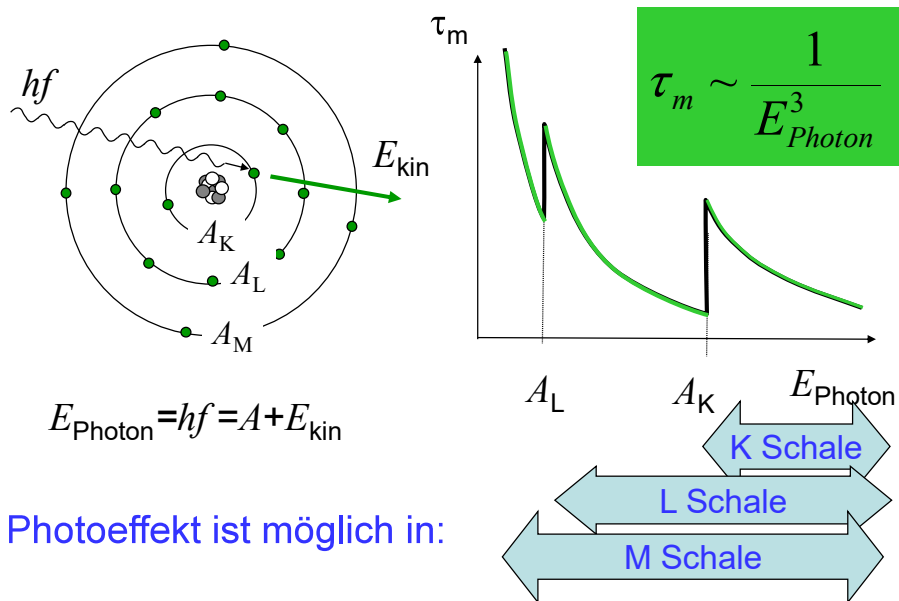


Verteilung der Effekte der Strahlenschwächung für Wasser

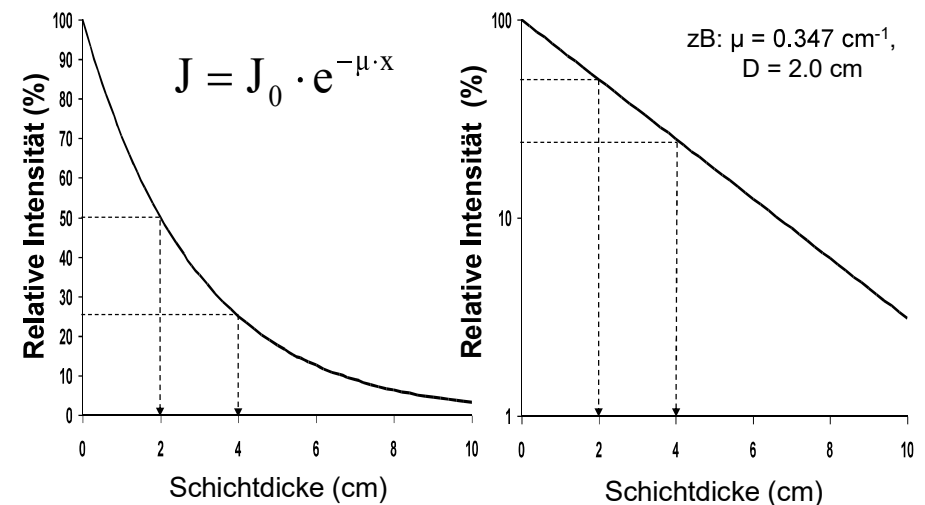


Johns, Cunningham: The physics of radiology, Charles C Thomas, 1983

Absorptionskanten



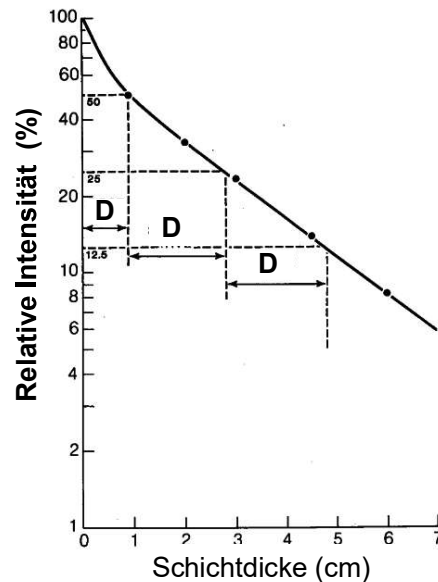
Schwächung der monoenergetischen Röntgenstrahlung



Schwächung einer reellen Röntgenstrahlung

1. $D = 0.99 \text{ mm}$
2. $D = 1.90 \text{ mm}$
3. $D = 2.00 \text{ mm}$

Die durchschnittliche Photonenenergie erhöht sich mit der Eindringtiefe: die Strahlung wird härter!



Khan: The physics of radiation therapy, Williams&Wilkins, 1994



Röntgendiagnostische Verfahren

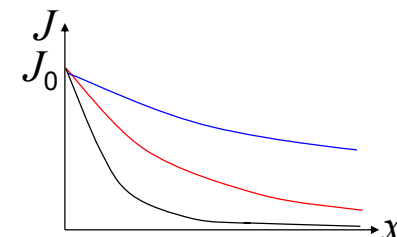
Summationsbild $\begin{cases} \text{- Statische Aufnahme (Filmaufnahme)} \\ \text{- Gleichzeitiges Bild (Fluoroskopie)} \end{cases}$

Tomographisches Bild CT

Spezialitäten: Anwendung von Kontrastmitteln, Digitalisierung, Subtraktion

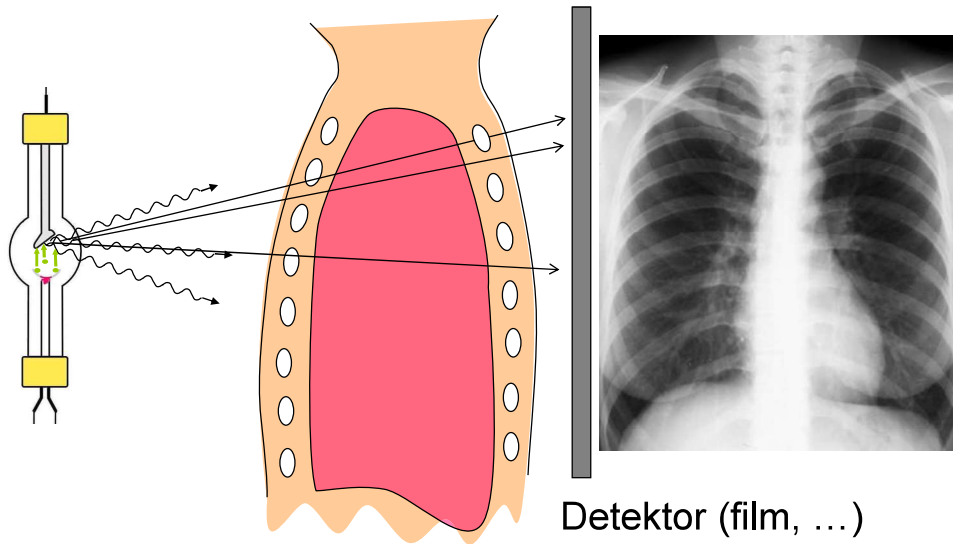
Röntgenbildentstehung

Grundprinzip der Röntgenbildentstehung: Unterschiedliche Strahlungsabsorption der verschiedenen Gewebe.



Luft
Weichteilgewebe
Knochen

Grundprinzip der Summationsaufnahmen



Absorption von inhomogenen Körper

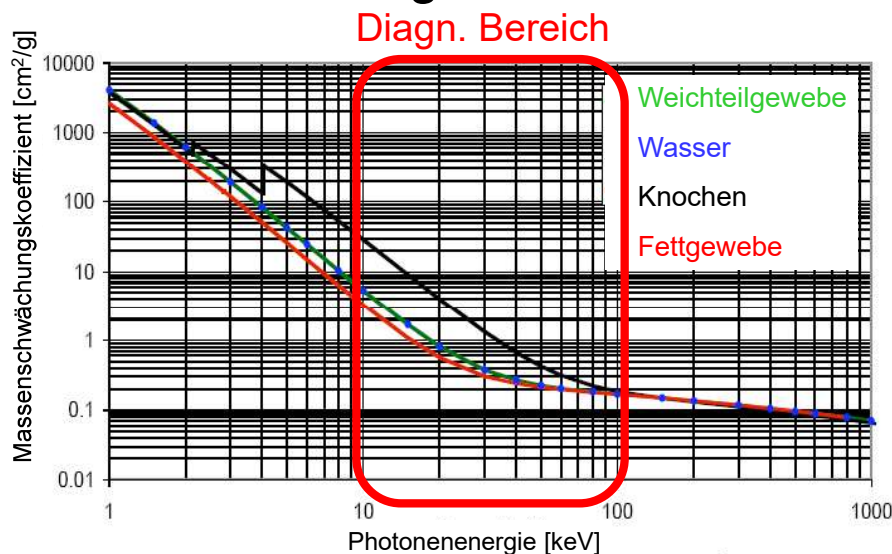
Diagram showing the absorption of X-rays through two media with coefficients μ_1 and μ_2 and thicknesses x_1 and x_2 . The initial intensity is J_0 , the intensity after the first medium is J_1 , and the final intensity after the second medium is J_2 .

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

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

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

Photonenenergieabhängigkeit des Schwächungskoeffizienten



Zusammenfassung der Schwächungsmechanismen

Mechanismus	Abhängigkeit von E	Abhängigkeit von Z	Wichtiger Bereich im Gewebe
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:

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

$$\mu_m = \tau_m + \sigma_m \quad \mu = \mu_m \rho \quad \rho_{wG} = 1.05 \quad \rho_{Knochen} = 1,7..1,8$$



Kontrastmittel

Positives Kontrastmittel:

mehr Absorption

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

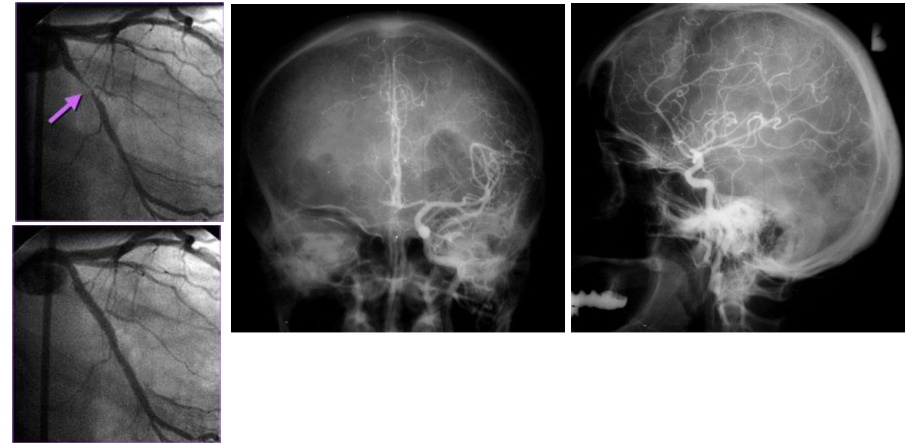
Jod (Z= 53) Blutgefäß
(Angiographie)

Barium (Z=56) Magen, Darm
in Form von BaSO_4

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



Angiographie



Kontrastmittel

Negatives Kontrastmittel:

wenige Absorption $\mu \downarrow$ $\rho \downarrow$ $\mu_m - Z_{\text{eff}} -$
Luft, CO_2 (Gase) in Darm

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

BaSO_4 + Luft in Darm.

Doppelkontrastaufnahmen

