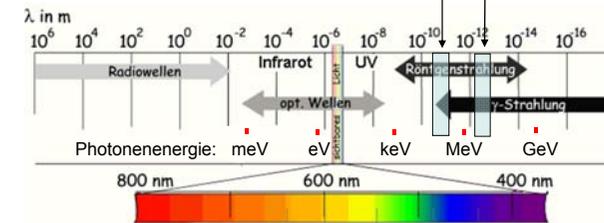


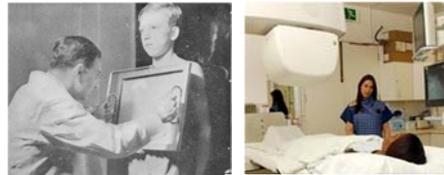


Charakterisierung der Röntgenstrahlung

- 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

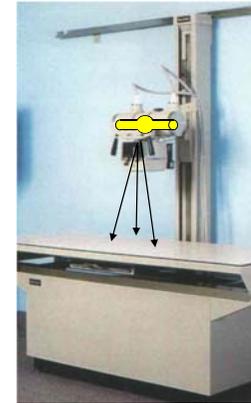
Röntgenstrahlung Entsteht wenn
hochenergetische (beschleunigte)
geladene Teilchen ihre Energie abgeben.

Elektronen E_{kin}

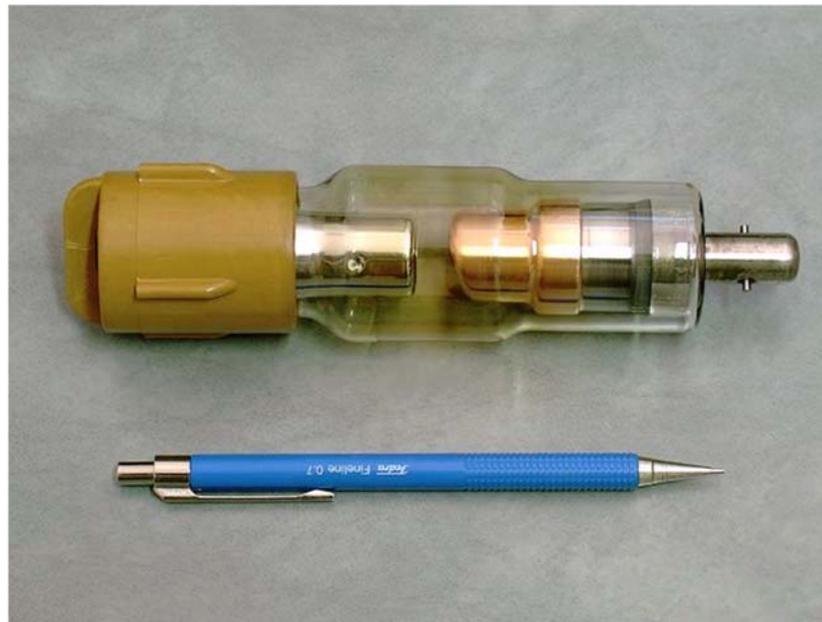
Röntgenröhre (Diagnostik)
Teilchenbeschleuniger (Therapie)

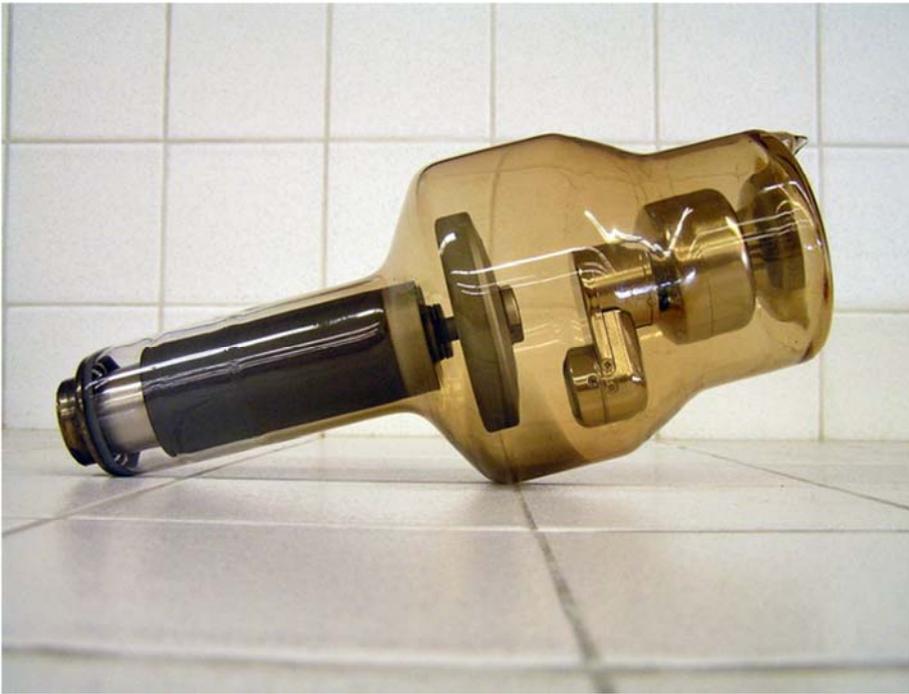
Geräte zur Erzeugung der Röntgenstrahlung

Röntgenröhre

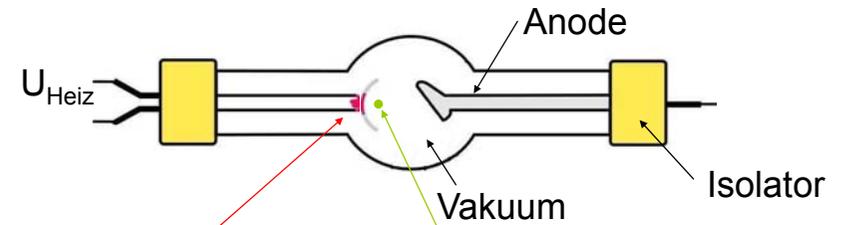


Teilchenbeschleuniger





Die Röntgenröhre (1)

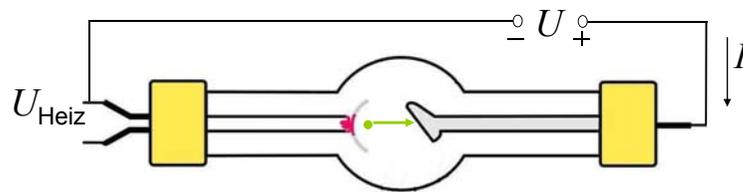


Heizkathode: Heizung (T Erhöhung) \Rightarrow Erhöhte thermische Energie \Rightarrow **Elektronen** treten aus der Kathode aus.

(Glühelektrischer Effekt)



Die Röntgenröhre (2)



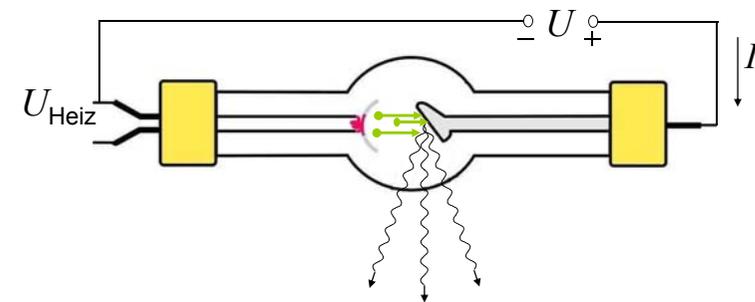
Anodenspannung(U) (typisch 30-200 kV):
beschleunigt die Elektronen

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

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

kinetische Energie
des beschleunigten Elektrons

Die Röntgenröhre (3)

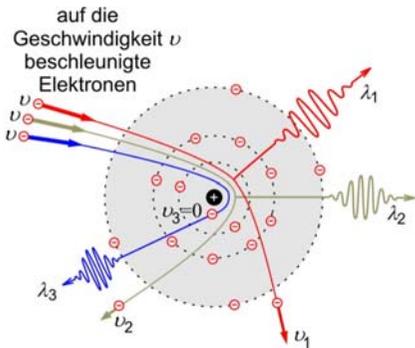


Röntgenstrahlung entsteht wenn die beschleunigten Elektronen auf die Anode prallen.

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

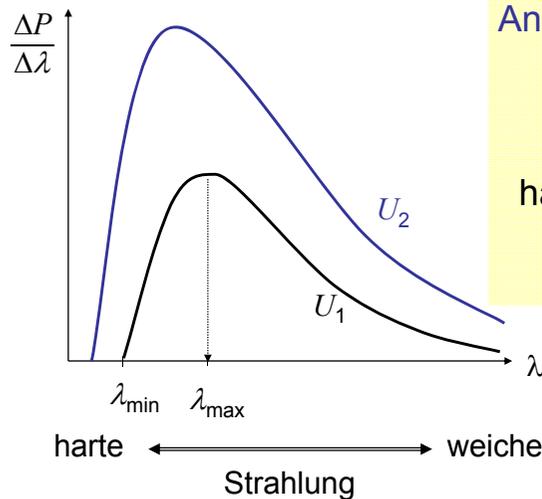
$$\lambda \geq \frac{hc}{Ue} = \lambda_{\text{min}}$$

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

nicht SI
aber praktische
Einheit

Rechenaufgaben 21 u. 22

Emissionsspektrum der Bremsstrahlung



Anodenspannung \uparrow

$\lambda_{\text{min}} \downarrow$

$\lambda_{\text{max}} \downarrow$

$E_{\text{photon}} \uparrow$

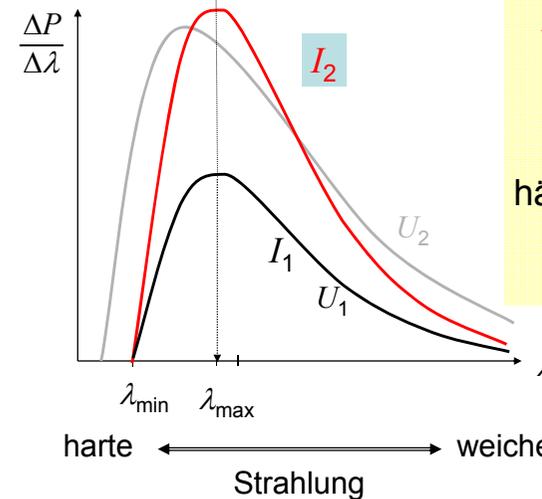
härtere Strahlung

$N_{\text{photon}} \uparrow$

Leistung $\uparrow \uparrow$

$$P \sim U^2$$

Emissionsspektrum der Bremsstrahlung



Anodenstrom \uparrow

$\lambda_{\text{min}} -$

$\lambda_{\text{max}} -$

$E_{\text{photon}} -$

härte d. Strahlung -

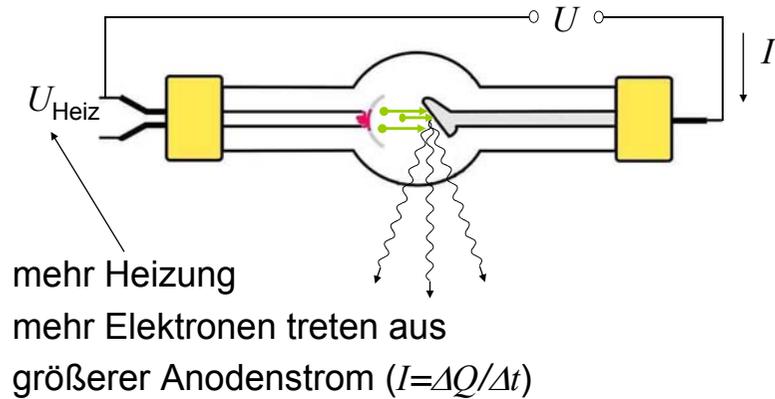
$N_{\text{photon}} \uparrow$

Leistung \uparrow

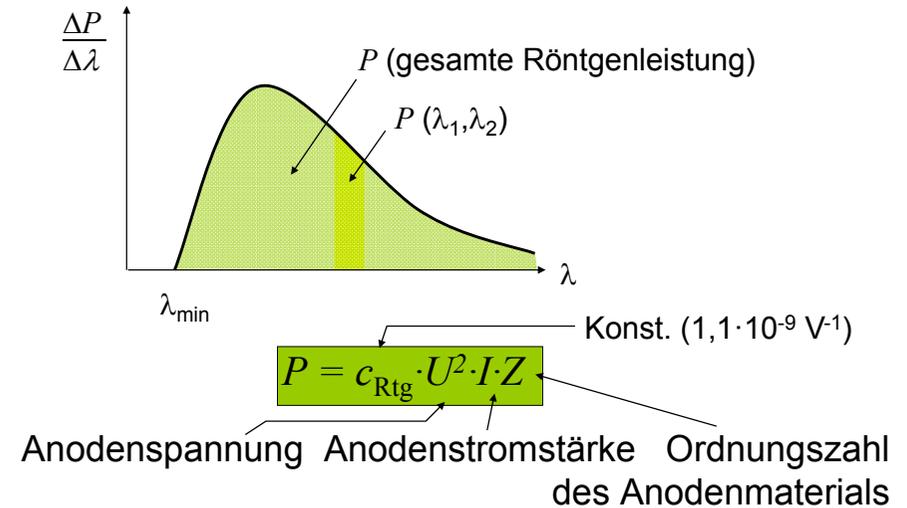
$$P \sim I$$

~~Ohm~~

Regulierung der Anodenstromstärke



Leistung der Röntgenstrahlung



Wirkungsgrad der Röntgenröhre

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

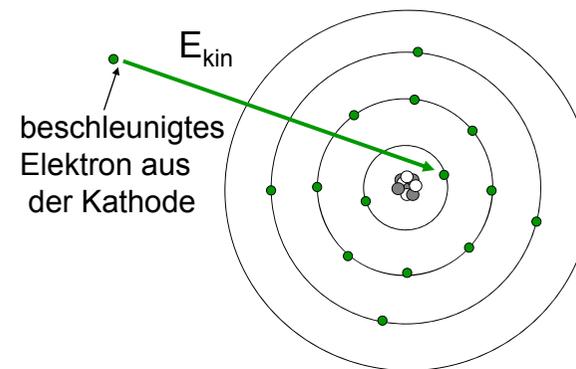
$$\eta = \frac{c_{\text{Rtg}} U^2 I Z}{U I} = c_{\text{Rtg}} U Z$$

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

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

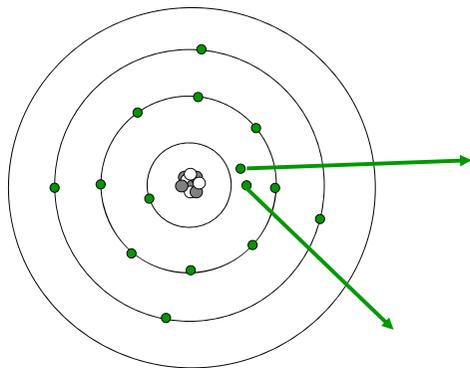
$$\text{Aber: } T_{\text{Schm,W}} \approx 3400^\circ\text{C} \quad T_{\text{Schm,Pb}} \approx 330^\circ\text{C}$$

Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung



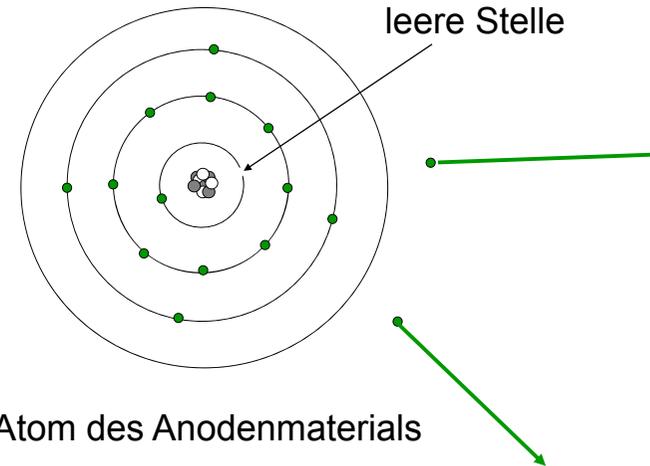
Atom des Anodenmaterials

Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung



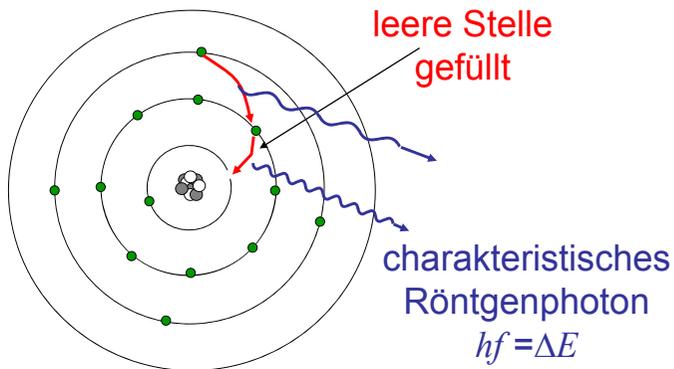
Atom des Anodenmaterials

Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung



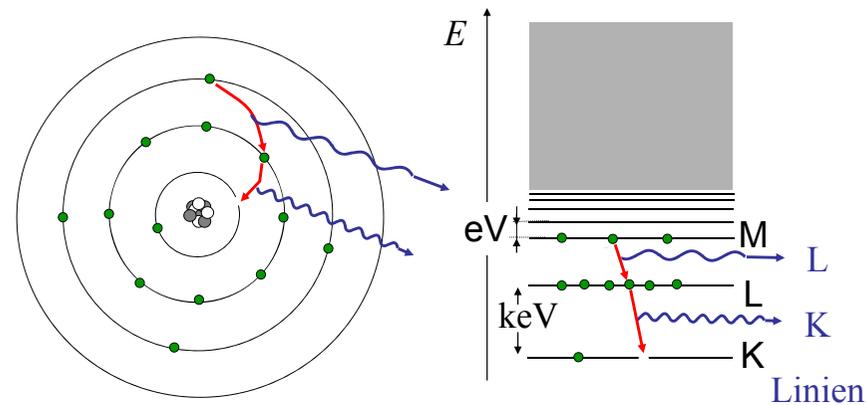
Atom des Anodenmaterials

Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung



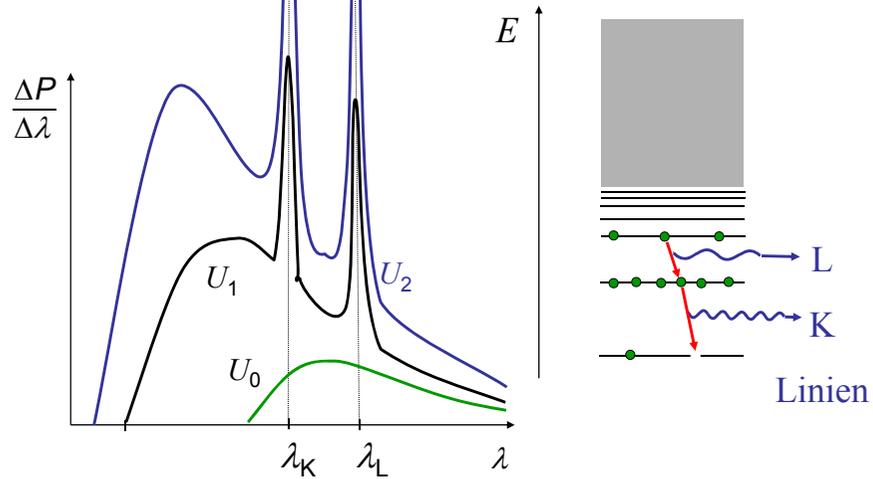
Atom des Anodenmaterials

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

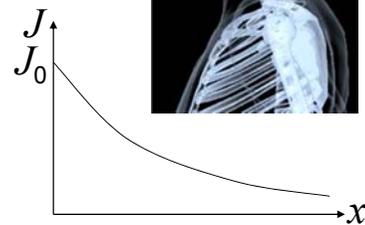
Schwächungsgesetz:

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

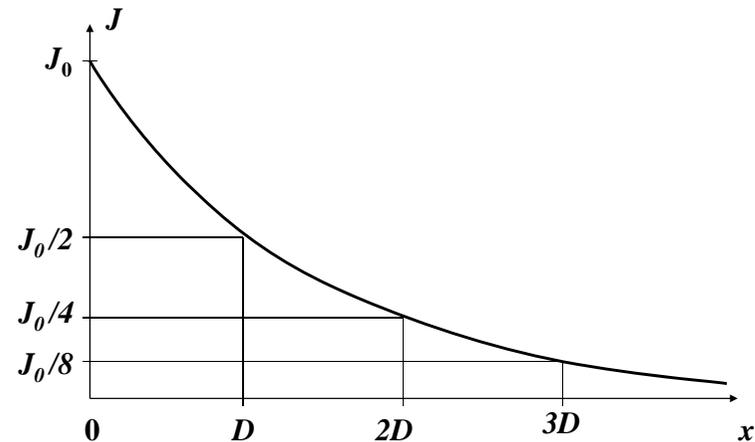
$$\mu(\text{Stoff}, \rho, \lambda) = \mu_m(\text{Stoff}, \lambda) \cdot \rho$$

Z

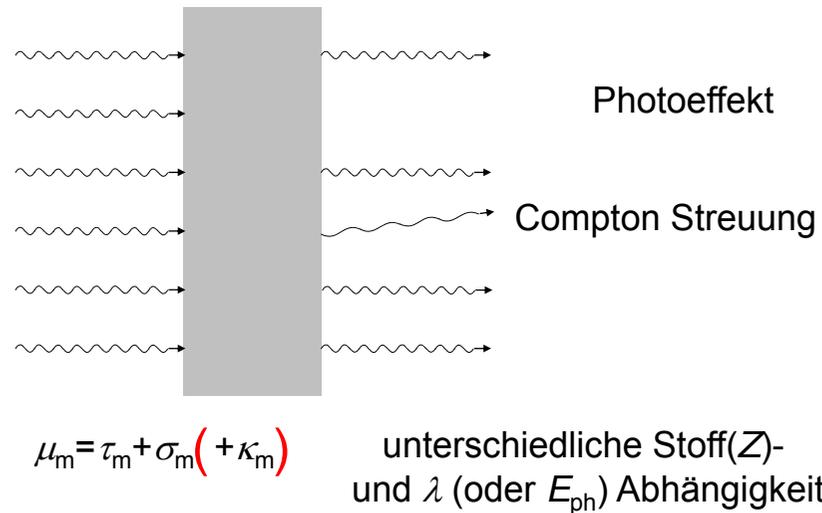
Massen-
schwächungs-
koeffizient



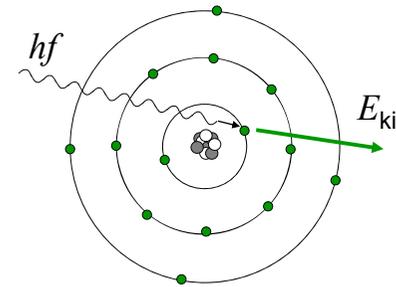
Schwächung der Röntgenstrahlung



Teilprozesse der Schwächung der Röntgenstrahlung



Photoeffekt



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

starke Z Abhängigkeit!
diagn. Bedeutung!

Beispiel:

10% Z Erhöhung

110%=1,1

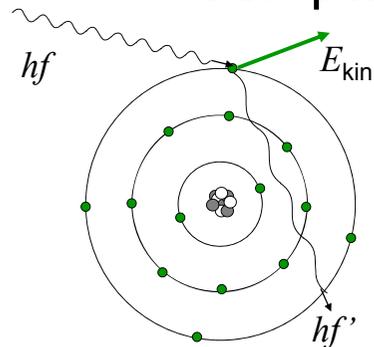
$1,1^3=1,331$

33% τ_m Erhöhung!

bei weicher Strahlung

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

Compton Streuung



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

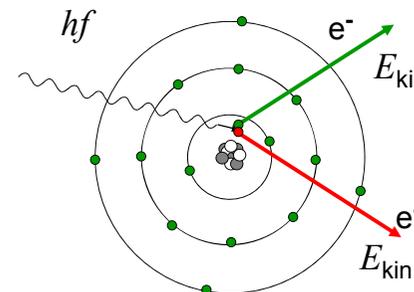
praktisch unabhängig von Z !

zB:

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

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

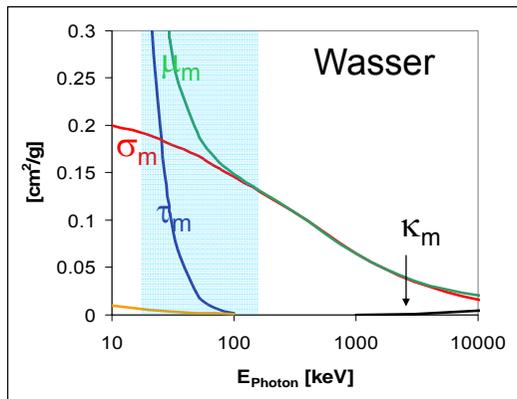
Paarbildung



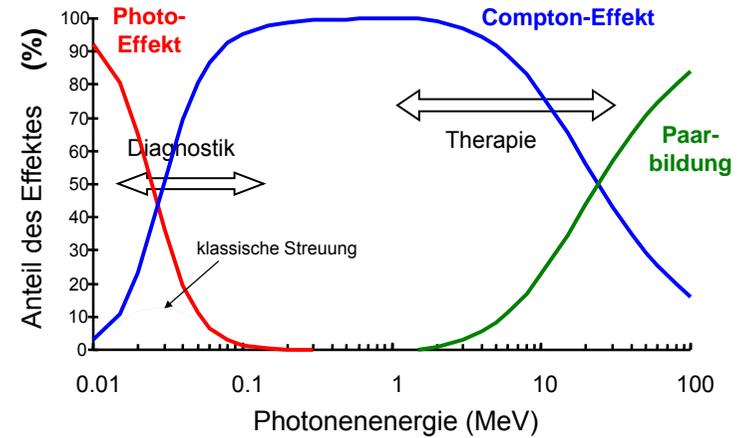
$$hf \geq 2 m_e c^2 \approx 1 \text{ MeV}$$

nur bei therap. Rtg.
und γ -Strahlung

Photonenenergieabhängigkeit des Schwächungskoeffizienten

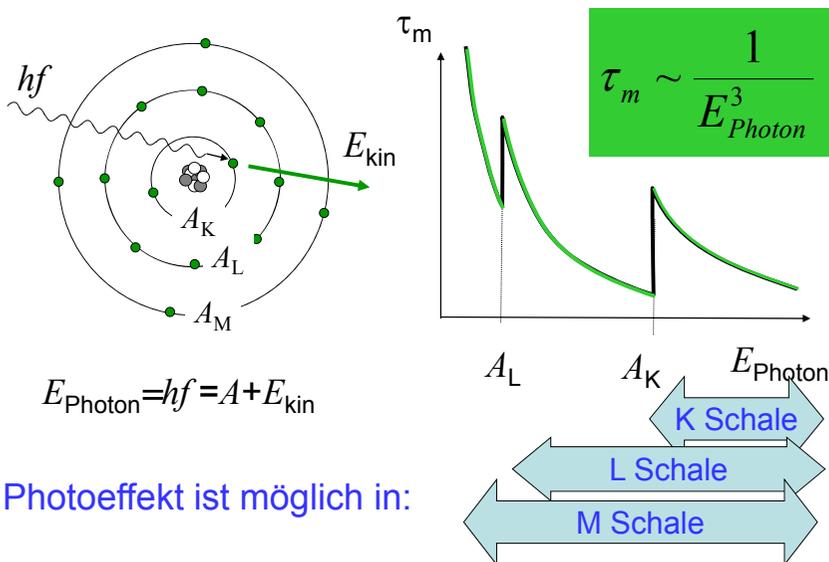


Verteilung der Effekte der Strahlenschwächung für Wasser



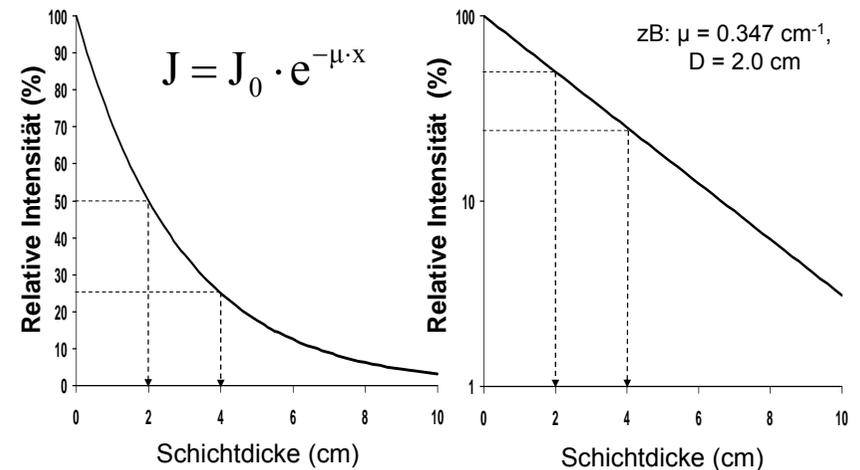
Johns, Cunningham: The physics of radiology, Charles C Thomas, 1983

Absorptionskanten



Photoeffekt ist möglich in:

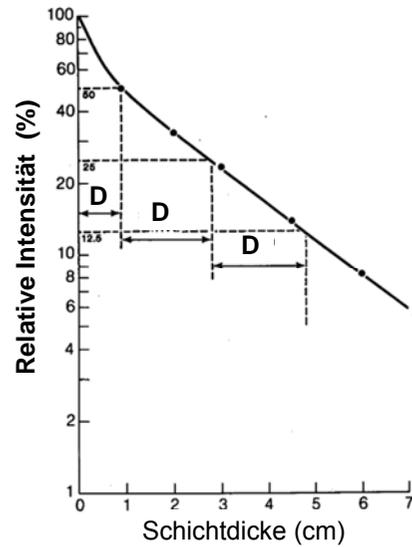
Schwächung der monoenergetischen Röntgenstrahlung



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