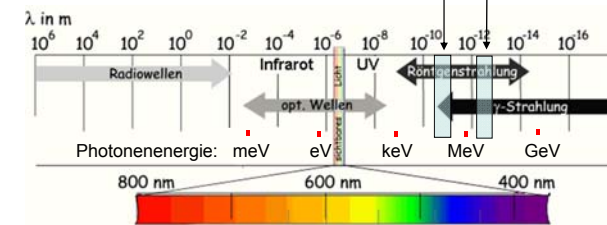




## Charakterisierung der Röntgenstrahlung

- 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

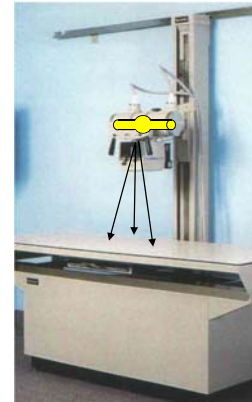
Röntgenstrahlung Entsteht wenn  
hochenergetische (beschleunigte)  
geladene Teilchen ihre Energie abgeben.

Elektronen  $E_{kin}$

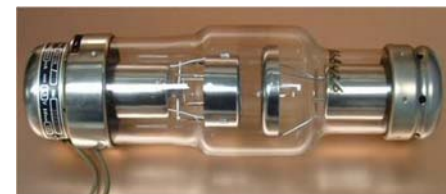
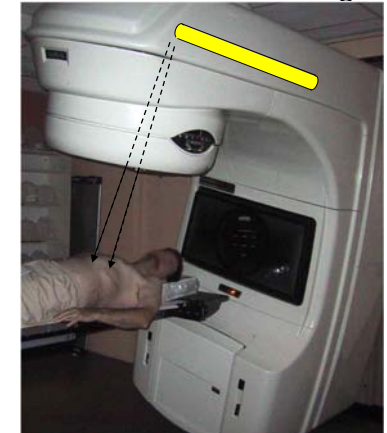
Röntgenröhre (Diagnostik)  
Teilchenbeschleuniger (Therapie)

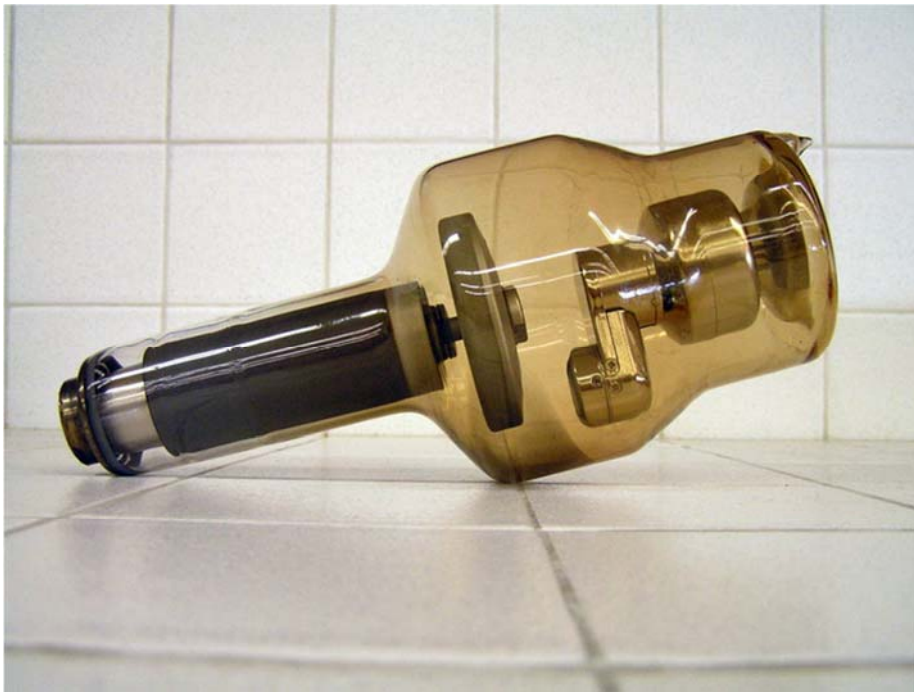
# Geräte zur Erzeugung der Röntgenstrahlung

Röntgenröhre

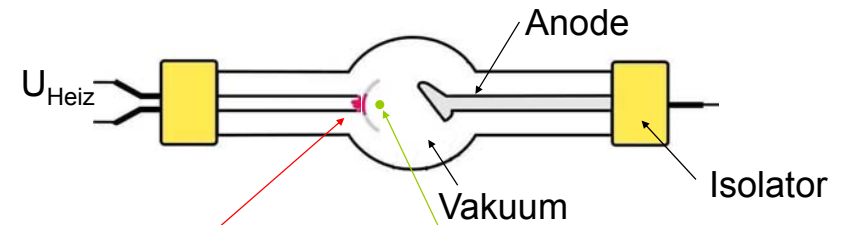


Teilchenbeschleuniger





## Die Röntgenröhre (1)

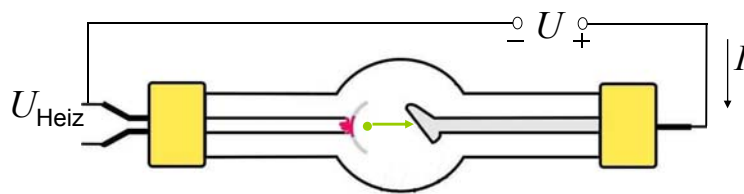


Heizkathode: Heizung (T Erhöhung)  $\Rightarrow$  Erhöhte thermische Energie  $\Rightarrow$  **Elektronen** treten aus der Kathode aus.

(Glühelektrischer Effekt)



## Die Röntgenröhre (2)



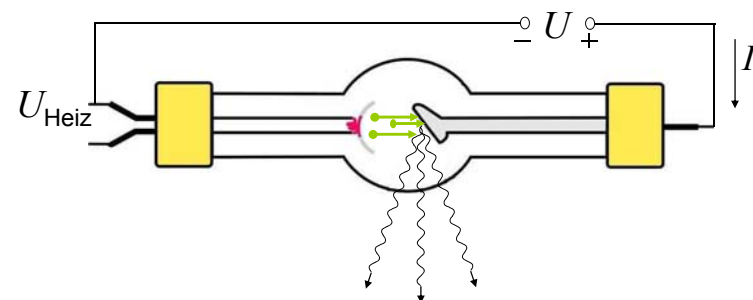
Anodenspannung(U) (typisch 30-200 kV):  
beschleunigt die Elektronen

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

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

kinetische Energie  
des beschleunigten Elektrons

## Die Röntgenröhre (3)

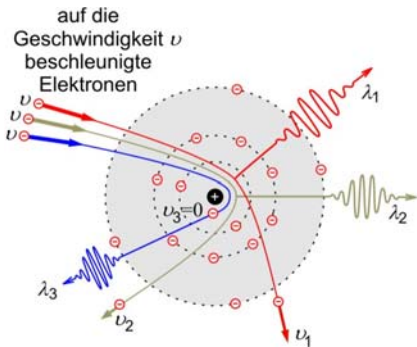


Röntgenstrahlung entsteht wenn die beschleunigten Elektronen auf die Anode prallen.

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

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

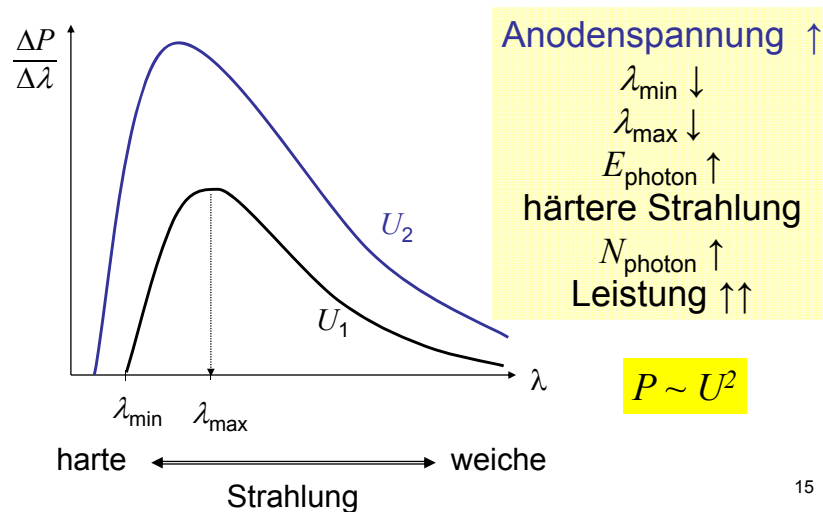
Konst.

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

nicht SI  
aber praktische  
Einheit

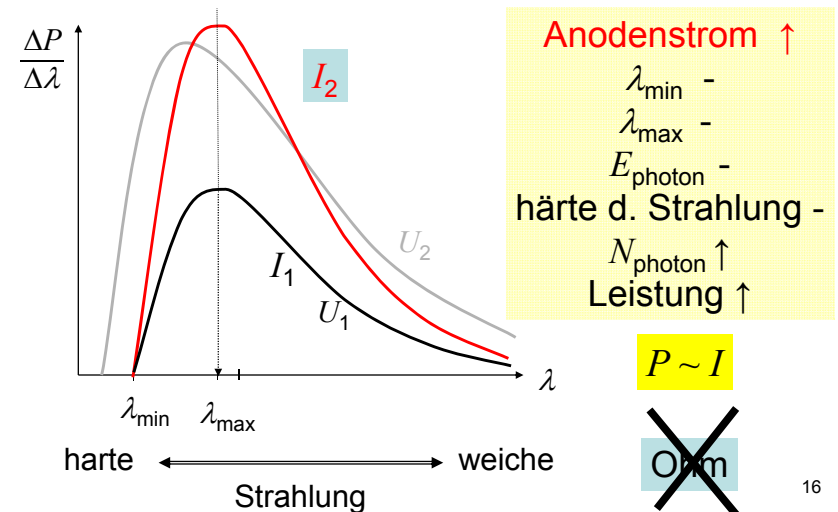
Rechenaufgaben 21 u. 22

# Emissionsspektrum der Bremsstrahlung



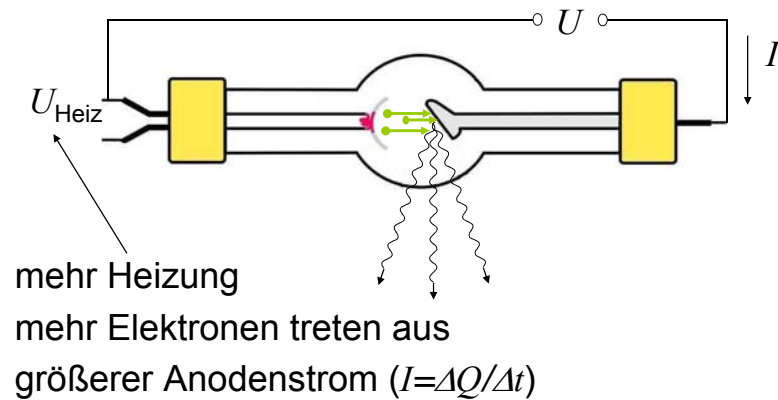
15

# Emissionsspektrum der Bremsstrahlung

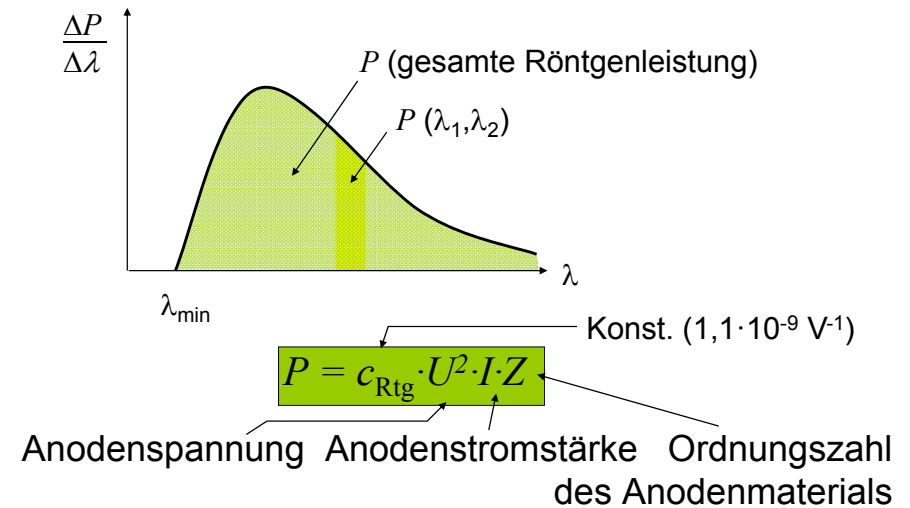


16

## 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 !

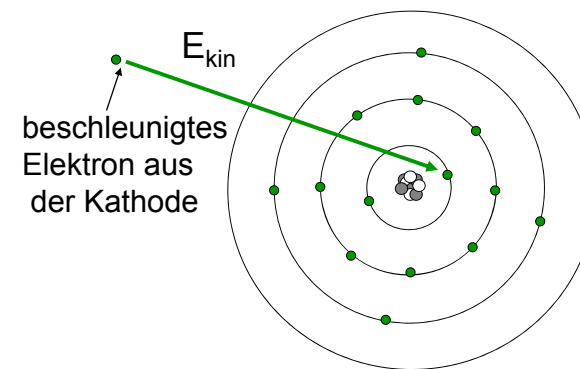
Praktisch: Wolfram ( $Z=74$ )

typisches  $\eta$  : 1% **99% Wärme!**

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

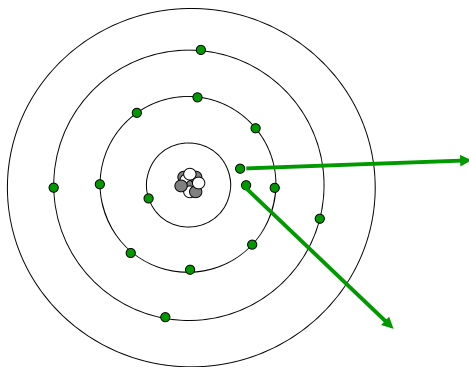
Aber:  $T_{\text{Schm,W}} \approx 3400^\circ\text{C}$   $T_{\text{Schm,Pb}} \approx 330^\circ\text{C}$

## Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung



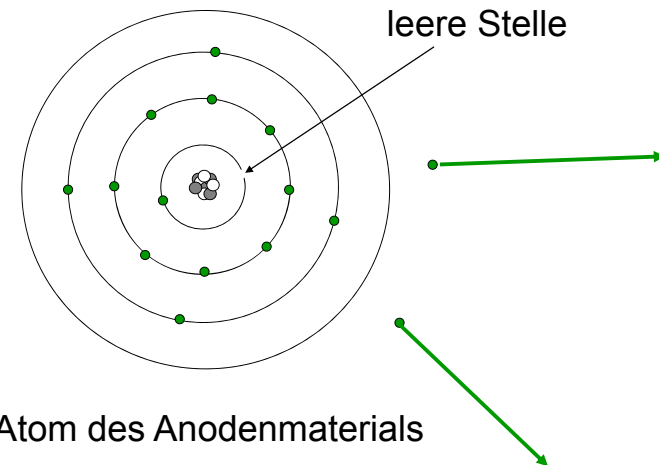
Atom des Anodenmaterials

## Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung



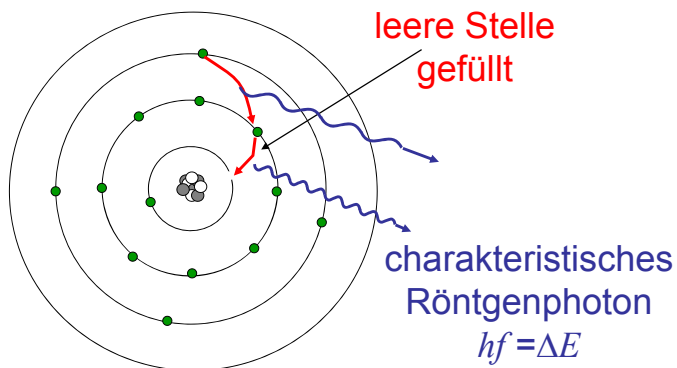
Atom des Anodenmaterials

## Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung



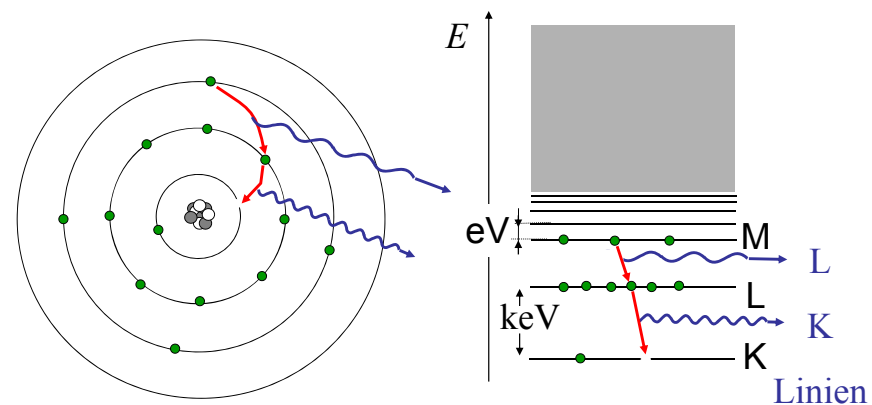
Atom des Anodenmaterials

## Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung



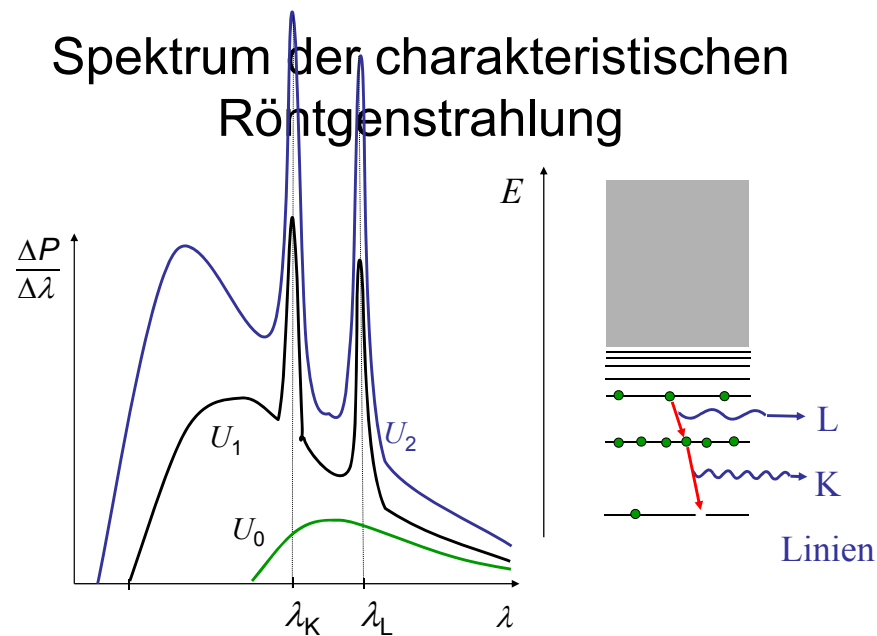
Atom des Anodenmaterials

## 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  $\gamma$ -Strahlung

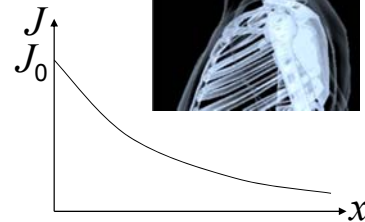
**Schwächungsgesetz:**

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

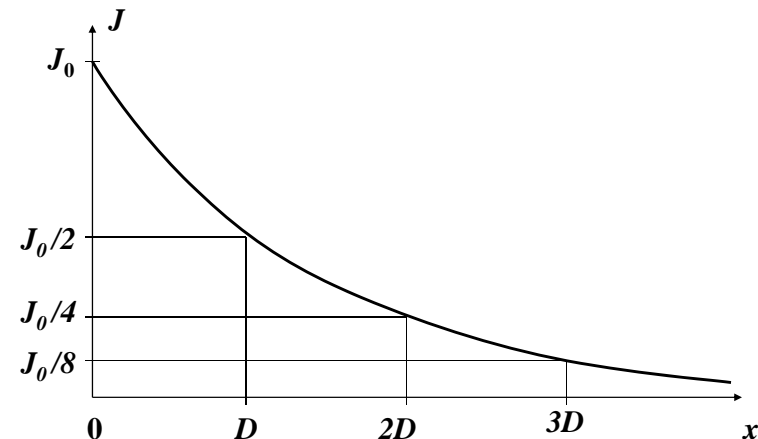
$$\mu(\text{Stoff}, \varrho, \lambda) = \mu_m(\text{Stoff}, \lambda) \cdot \varrho$$

$Z$

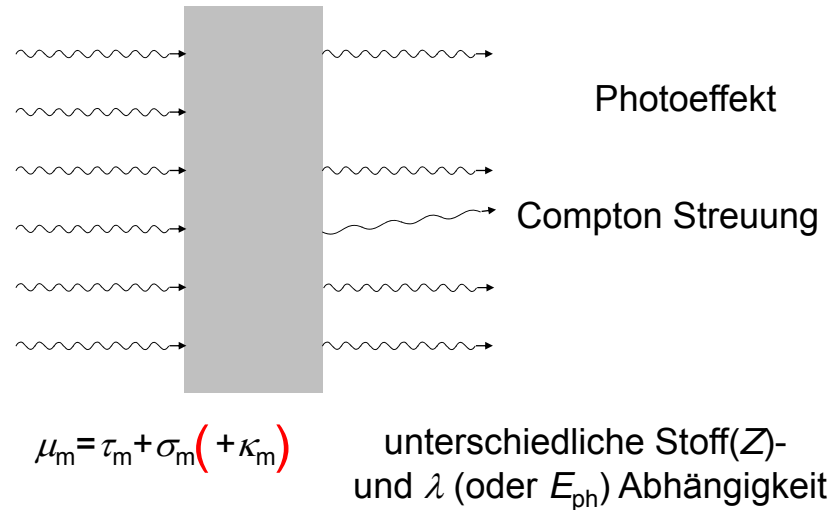
Massen-  
schwächungs-  
koeffizient



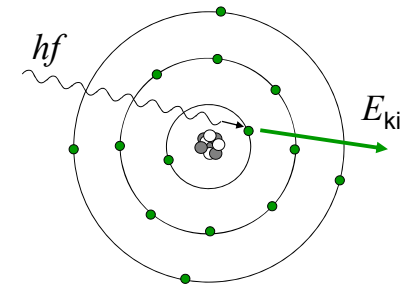
## Schwächung der Röntgenstrahlung



## Teilprozesse der Schwächung der Röntgenstrahlung



## Photoeffekt



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

starke  $Z$  Abhängigkeit!  
diagn. Bedeutung!

Beispiel:

**10%  $Z$  Erhöhung**

$110\% = 1,1$

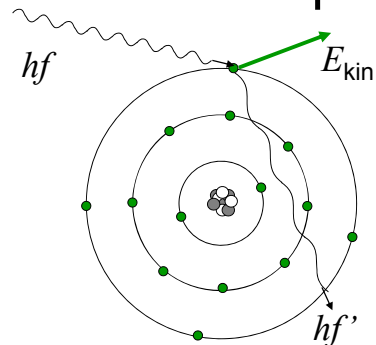
$1,1^3 = 1,331$

**33%  $\tau_m$  Erhöhung!**

bei weicher Strahlung

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

## Compton Streuung



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

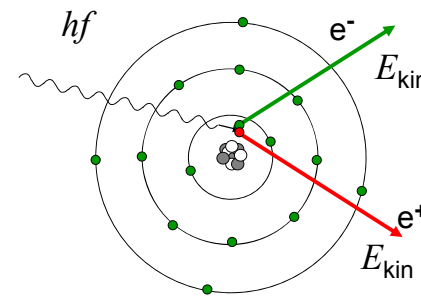
praktisch unabhängig von  $Z$  !

zB:

|       | C   | P            | Ca  | Pb |
|-------|-----|--------------|-----|----|
| $Z$   | 6   | 15           | 20  |    |
| $A$   | 12  | $\approx 31$ | 40  |    |
| $Z/A$ | 0,5 | 0,48         | 0,5 |    |

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

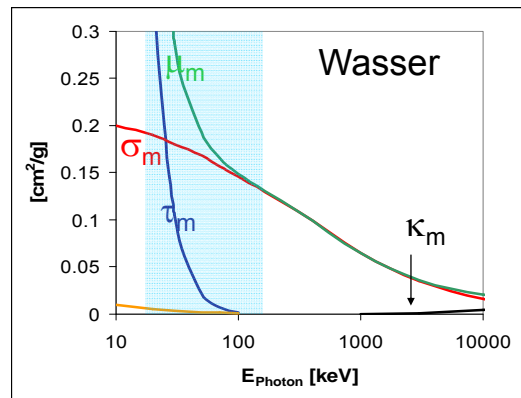
## Paarbildung



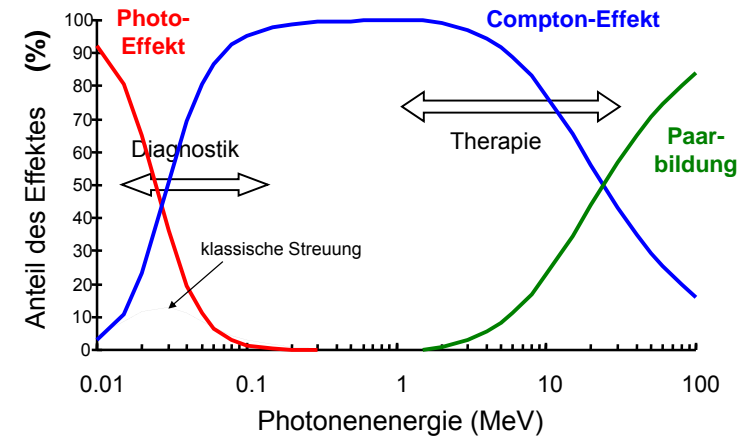
$$hf \geq 2 m_e c^2 \approx 1 \text{ MeV}$$

nur bei therap. Rtg.  
und  $\gamma$ -Strahlung

## Photonenenergieabhängigkeit des Schwächungskoeffizienten

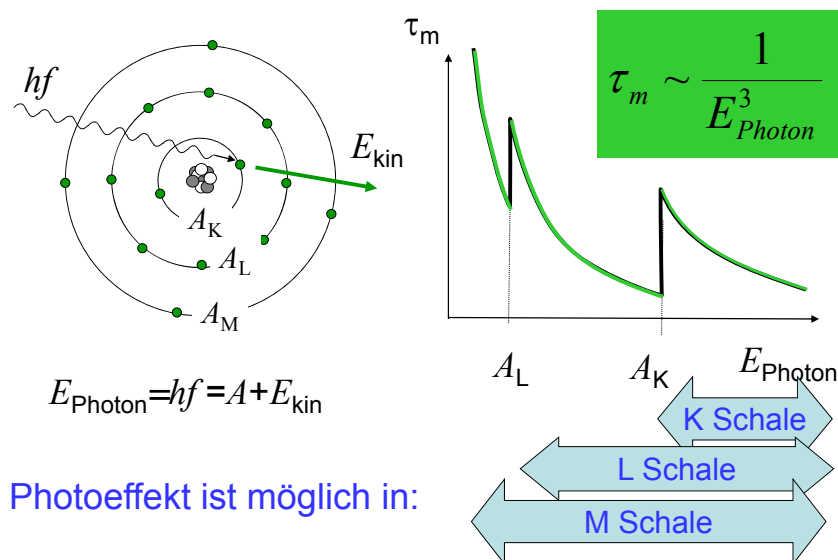


## Verteilung der Effekte der Strahlenschwächung für Wasser

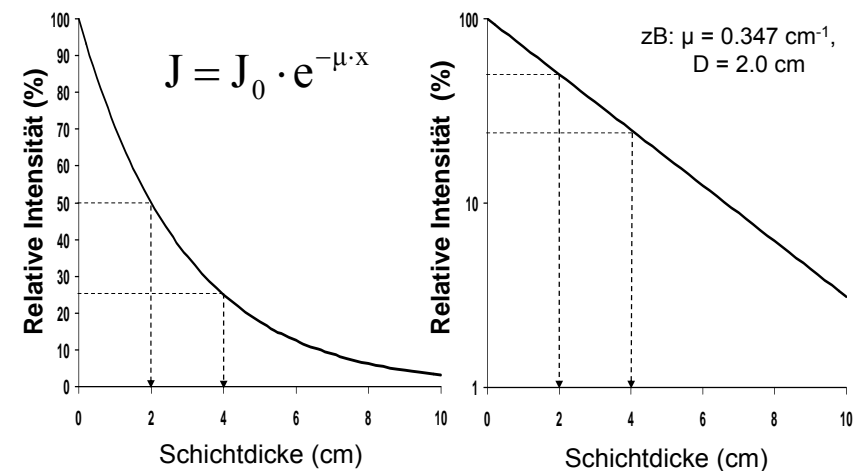


Johns, Cunningham: The physics of radiology, Charles C Thomas, 1983

## Absorptionskanten



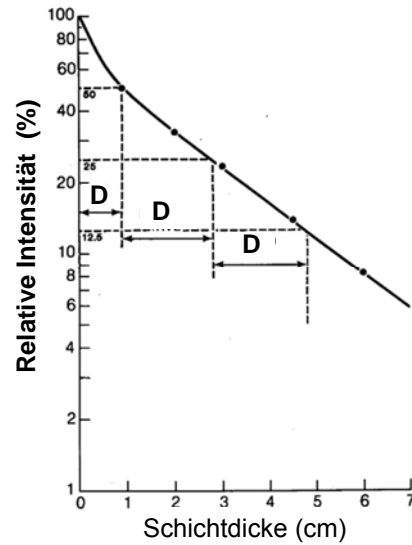
## Schwächung der monoenergetischen Röntgenstrahlung



# Schwächung einer reellen Röntgenstrahlung

1.  $D = 0.99$  mm
2.  $D = 1.90$  mm
3.  $D = 2.00$  mm

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



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