



# Röntgenstrahlung

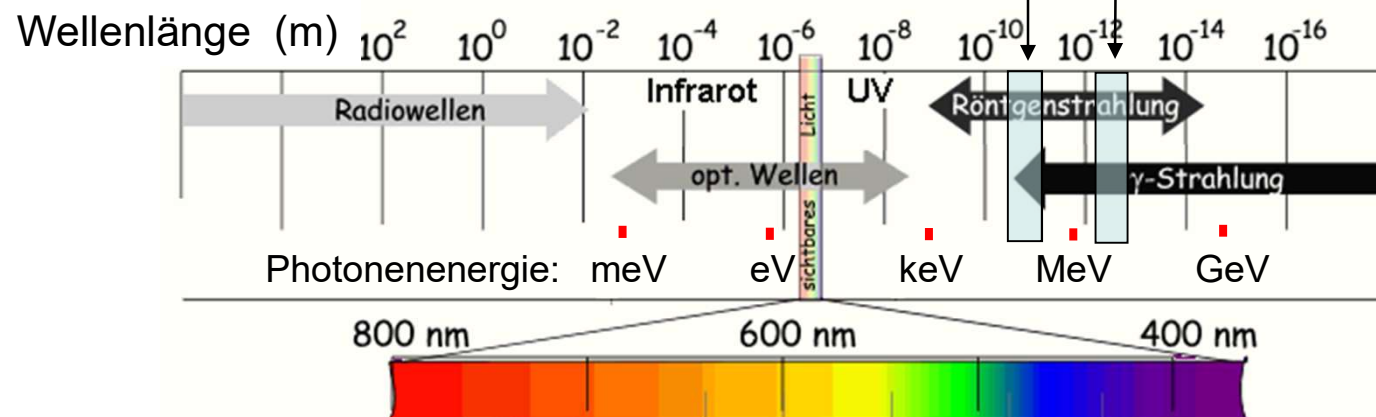
## Erzeugung und Eigenschaften

## Physikalische Grundlagen

## der Röntgendiagnostik

# Charakterisierung der Röntgenstrahlung

- elektromagnetische Strahlung
- Photonenergie:
  - Diagnostik: 30-200 keV
  - Therapie: 5-20 MeV
- Wellenlänge:
  - ~ einige 10 pm (Diagn.)
  - ~ 100 fm (Ther.)



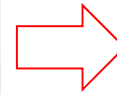
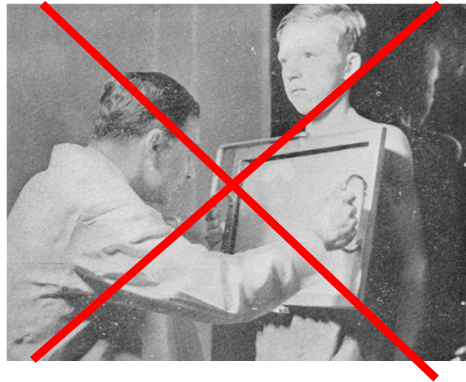
- Wirkungen:

- Ionisation
- Lumineszenz (Fluoroskopie, Bildverstärker)
- chemische (z.B. Photographie)
- biologische (Strahlenschädigung)

- Entstehung: in der Elektronenhülle

- Typen

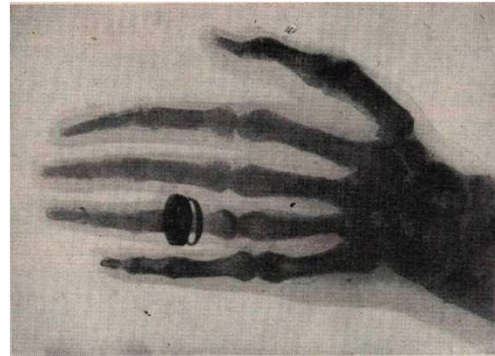
- Bremsstrahlung
- charakteristische Strahlung





# Historie

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



# Entstehung der Röntgenstrahlung

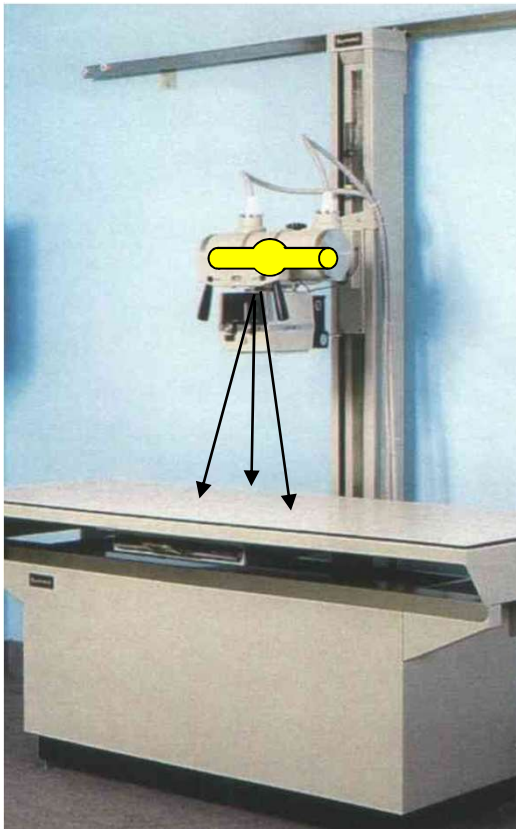
Röntgenstrahlung Entsteht wenn  
hochenergetische (beschleunigte)  
geladene Teilchen ihre Energie abgeben.

Elektronen  $E_{\text{kin}}$

Röntgenröhre (Diagnostik)  
Teilchenbeschleuniger (Therapie)

# Geräte zur Erzeugung der Röntgenstrahlung

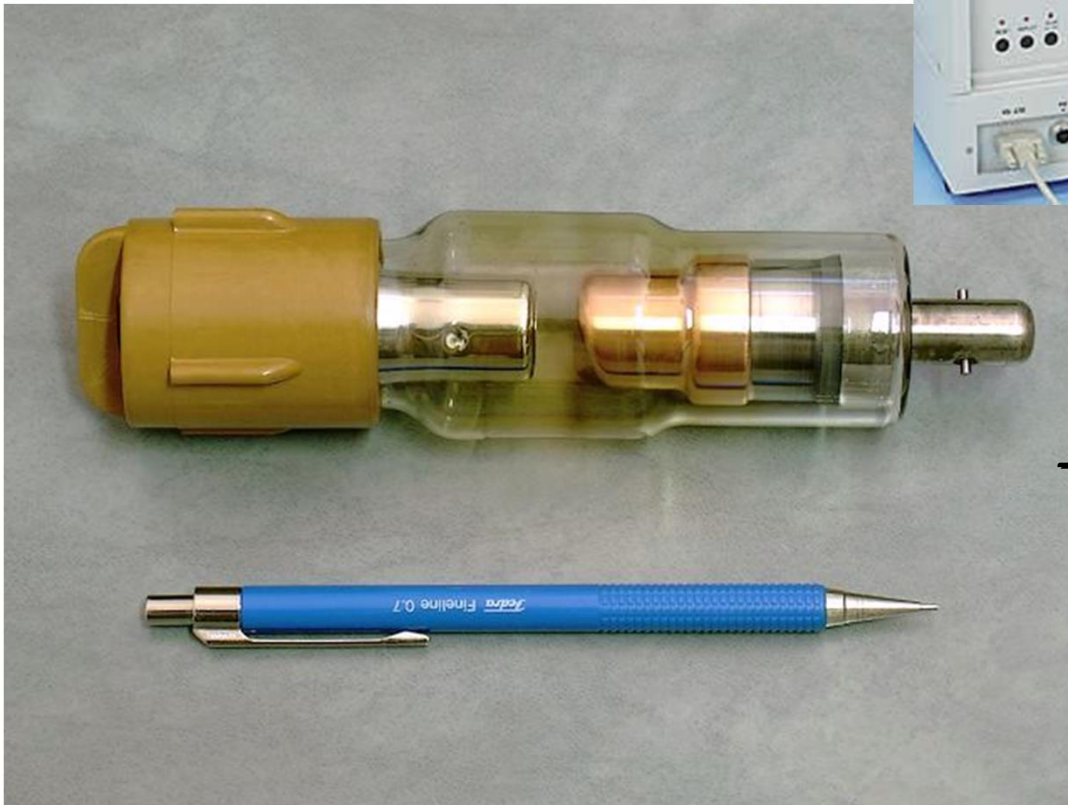
## Röntgenröhre



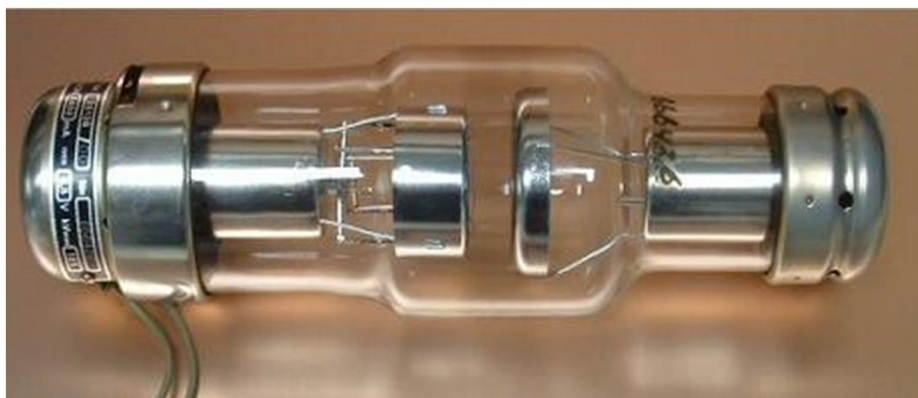
## Teilchenbeschleuniger



# Die Röntgenröhre

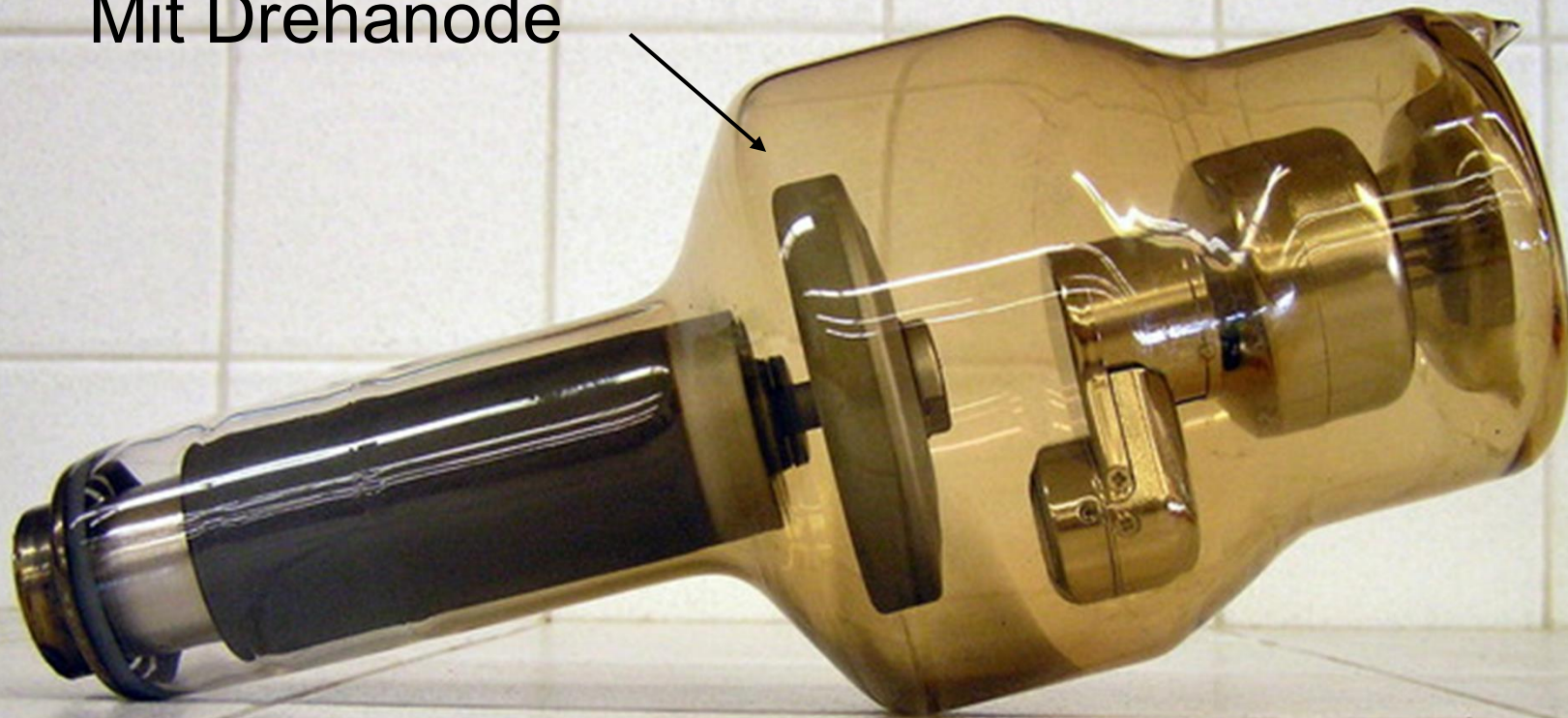




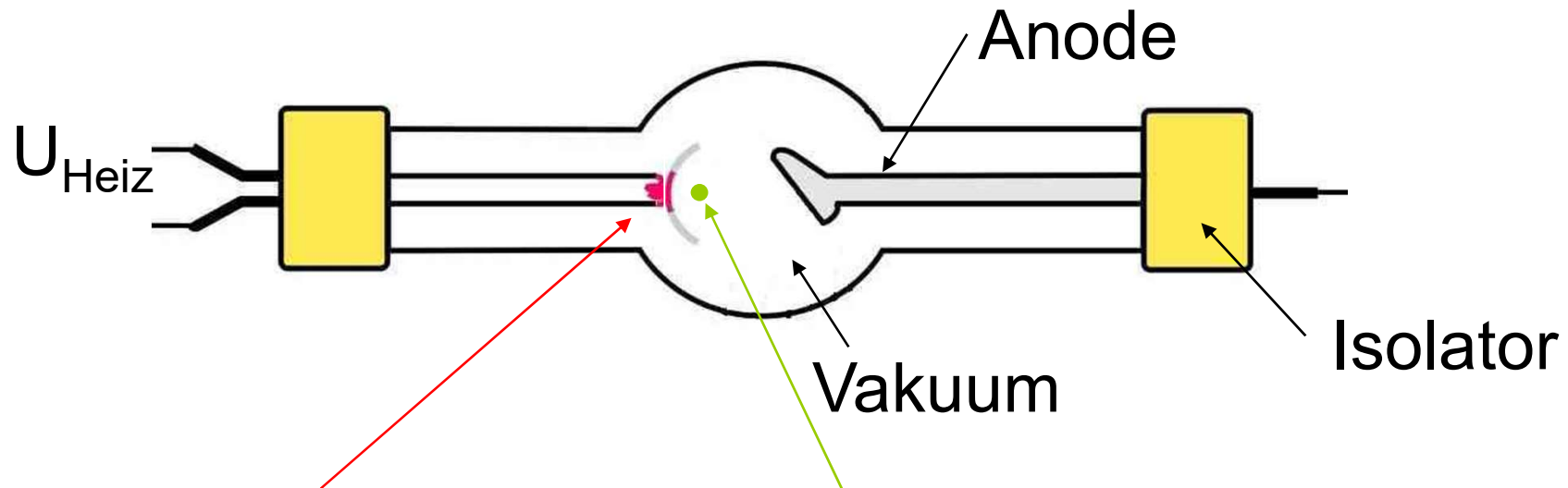




Mit Drehanode



# Die Röntgenröhre (1)

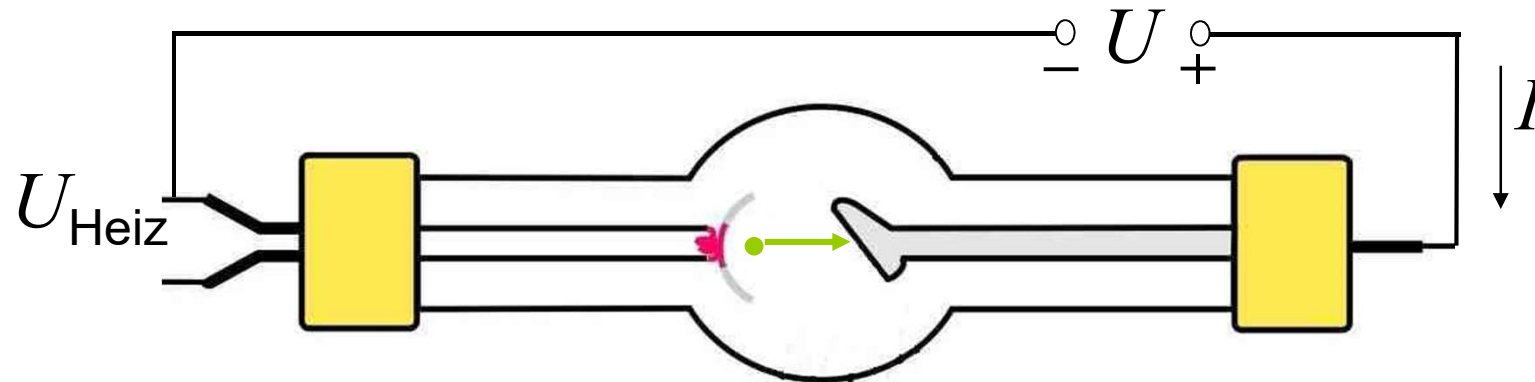


Heizkathode: Heizung (T Erhöhung)  $\Rightarrow$  Erhöhte thermische Energie  $\Rightarrow$  **Elektronen** treten aus der Kathode aus.

(Glühelektrischer Effekt)



# Die Röntgenröhre (2)



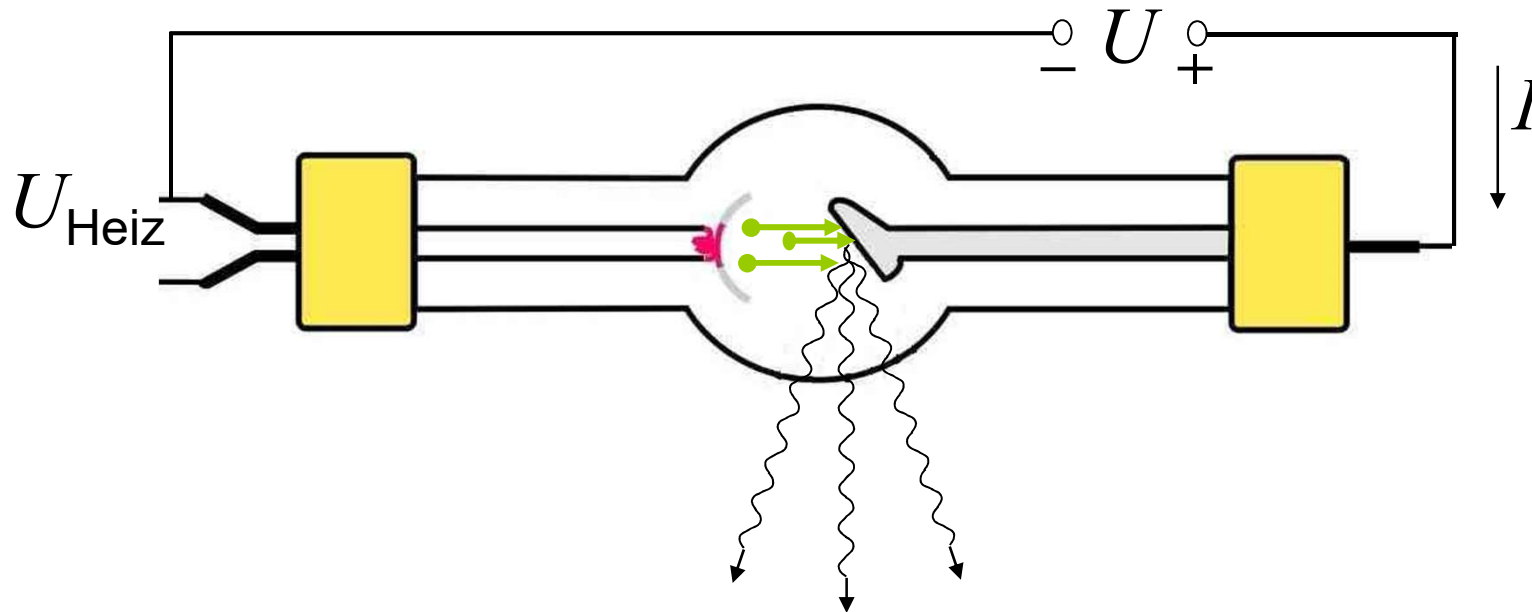
Anodenspannung( $U$ ) (typisch 30-200 kV):  
beschleunigt die Elektronen

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

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

kinetische Energie  
des beschleunigten Elektrons

# Die Röntgenröhre (3)



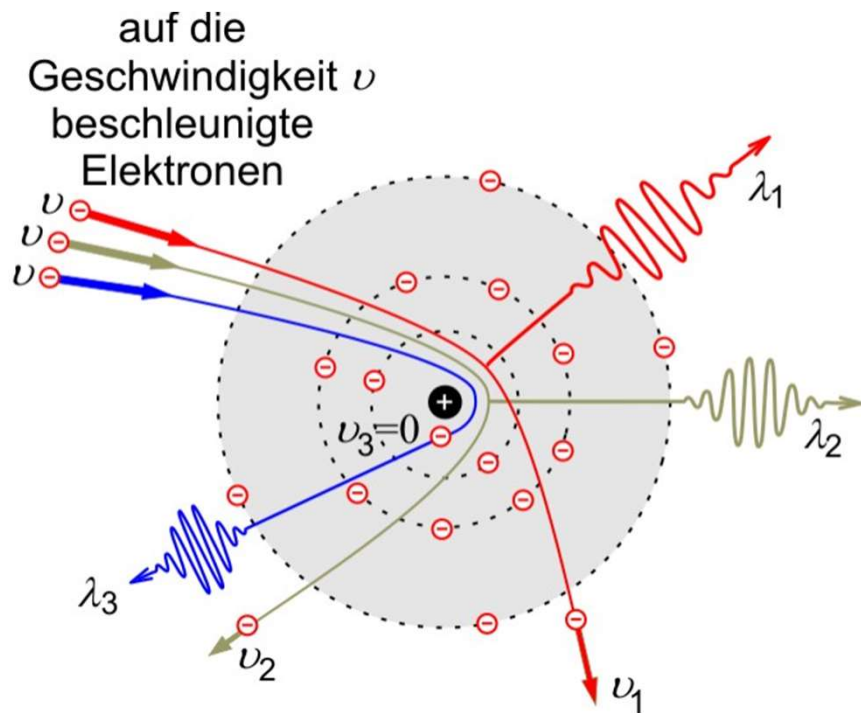
Röntgenstrahlung entsteht wenn die beschleunigten Elektronen auf die Anode prallen.

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



# Bremsstrahlung

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



$$E_{\text{kin}} \geq h f$$

$$U_e = E_{\text{kin}} \geq h f = h \frac{c}{\lambda}$$

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

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

# Grenzwellenlänge, Duane-Hunt Gesetz

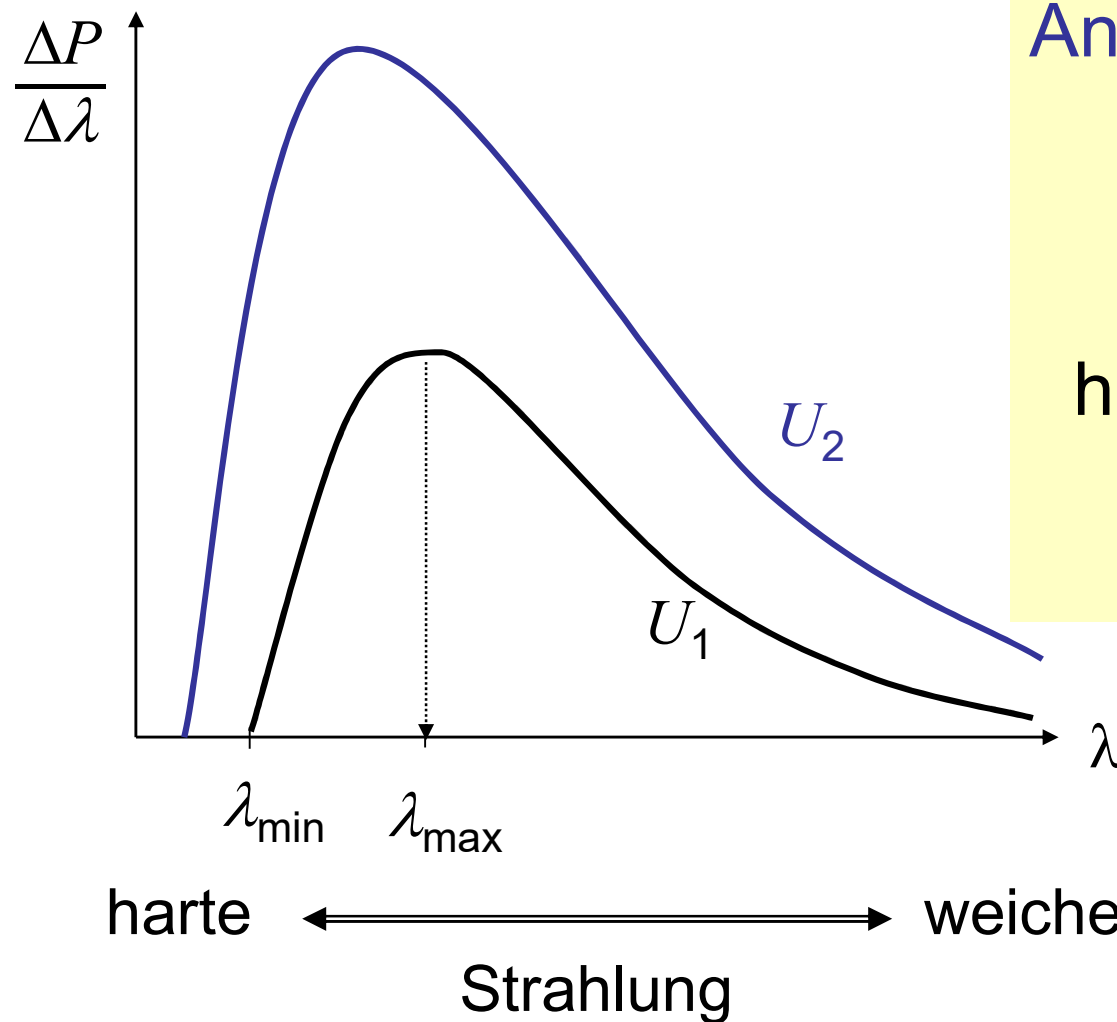
$$\lambda \geq \frac{hc}{U_e} = \lambda_{\min}$$

Konst.

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

nicht SI  
aber praktische  
Einheit

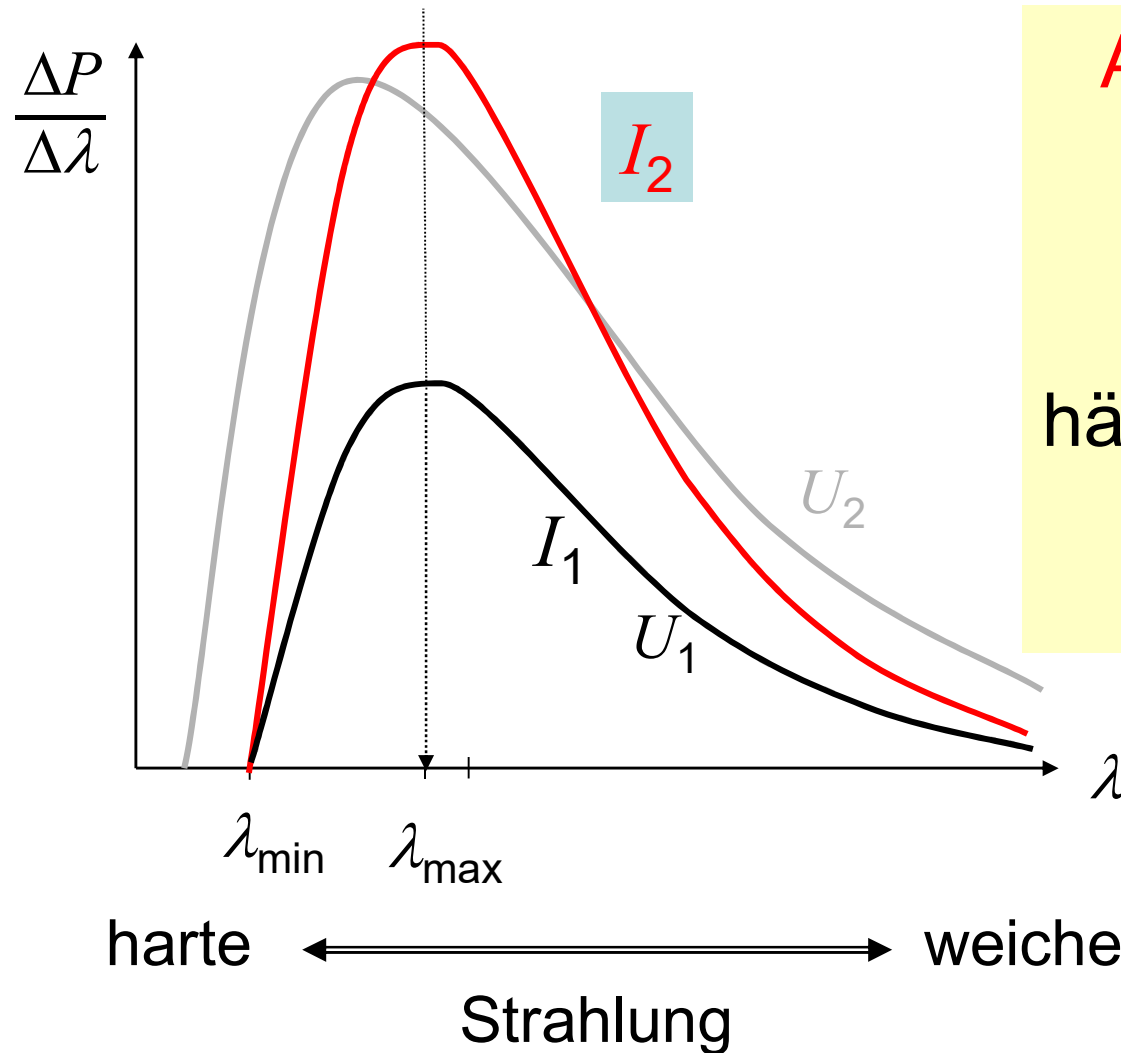
# Emissionsspektrum der Bremsstrahlung



Anodenspannung  $\uparrow$   
 $\lambda_{\min} \downarrow$   
 $\lambda_{\max} \downarrow$   
 $E_{\text{photon}} \uparrow$   
härtere Strahlung  
 $N_{\text{photon}} \uparrow$   
Leistung  $\uparrow\uparrow$

$$P \sim U^2$$

# Emissionsspektrum der Bremsstrahlung



Anodenstrom  $\uparrow$

$\lambda_{\min}$  -

$\lambda_{\max}$  -

$E_{\text{photon}}$  -

härte d. Strahlung -

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

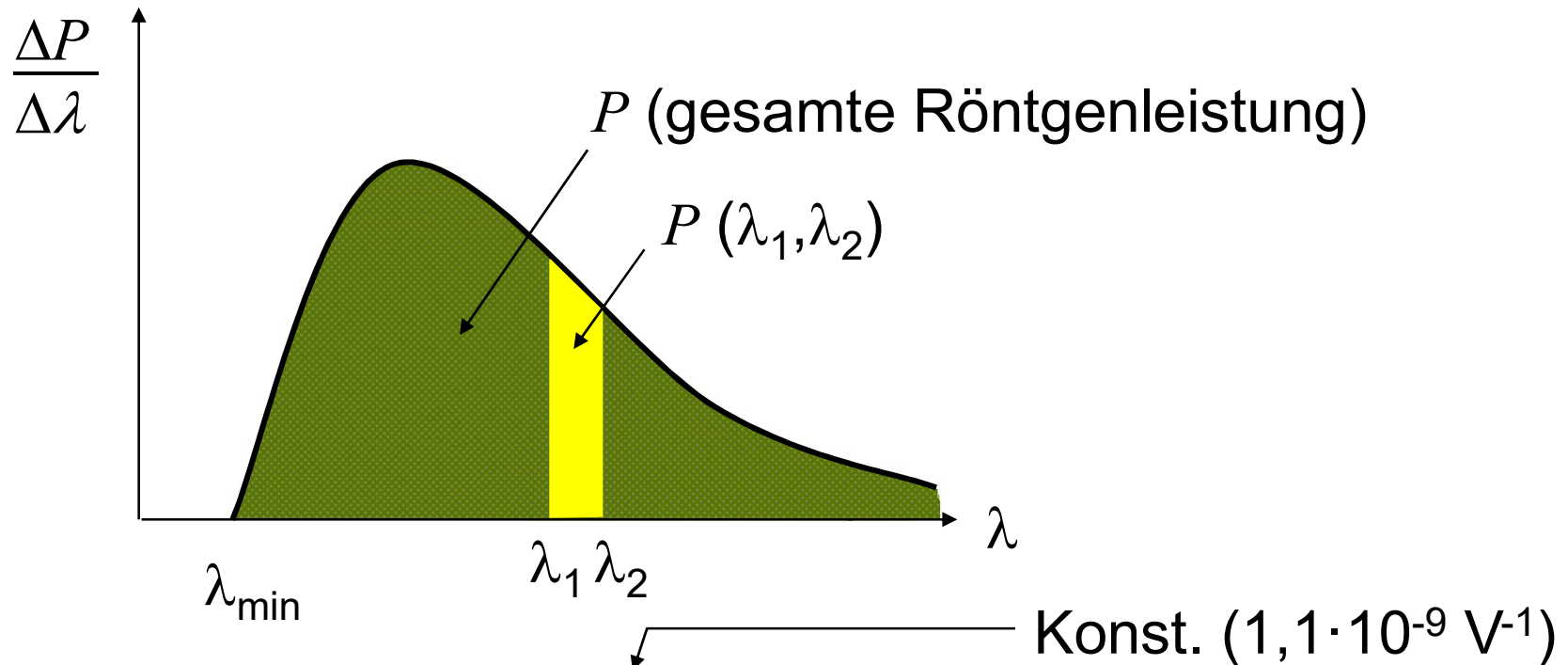
Leistung  $\uparrow$

$$P \sim I$$

~~Ohm~~



# Leistung der Röntgenstrahlung

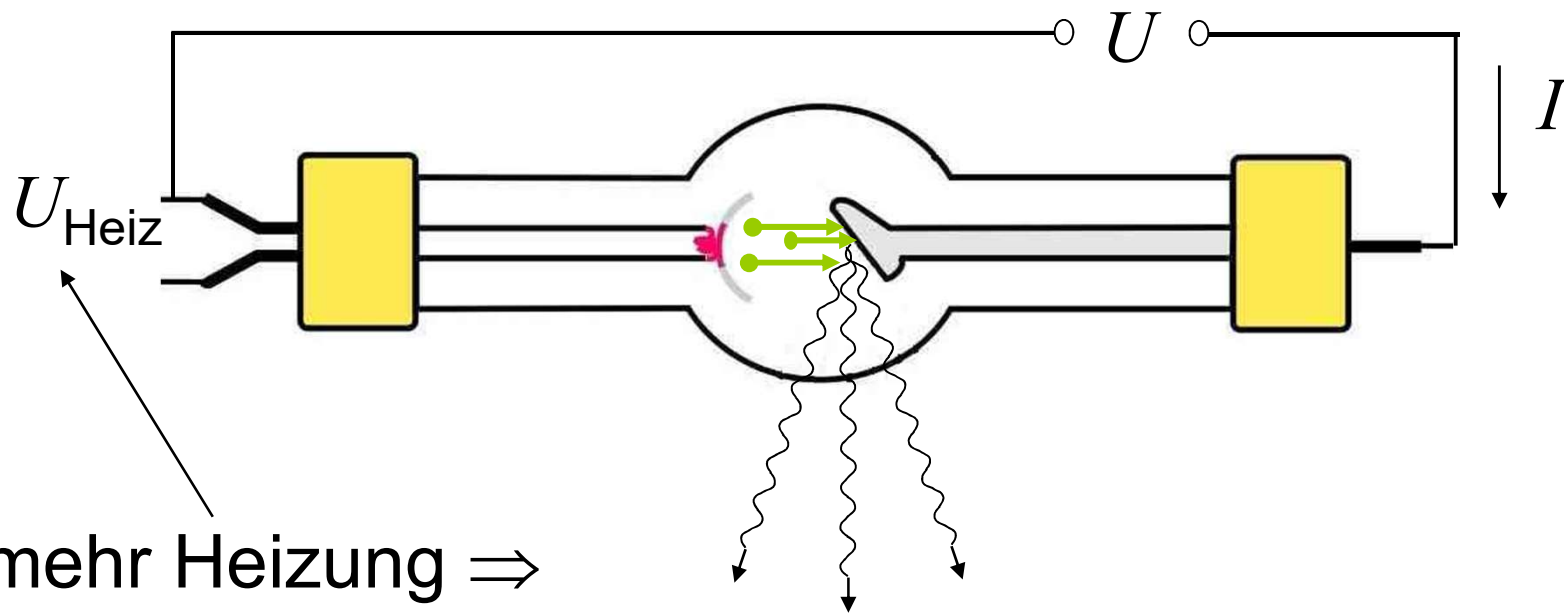


$$P = c_{\text{Rtg}} \cdot U^2 \cdot I \cdot Z$$

Konst. ( $1,1 \cdot 10^{-9} \text{ V}^{-1}$ )

Anodenspannung    Anodenstromstärke    Ordnungszahl  
des Anodenmaterials

# Regulierung der Anodenstromstärke



mehr Heizung  $\Rightarrow$

mehr Elektronen treten aus  $\Rightarrow$

größerer Anodenstrom ( $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{n \cdot e}{\Delta t}$ )

# Wirkungsgrad der Röntgenröhre

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

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

$1,1 \cdot 10^{-9} \text{V}^{-1}$

Anodenmaterial mit hoher Ordnungszahl !

Praktisch: Wolfram ( $Z=74$ )

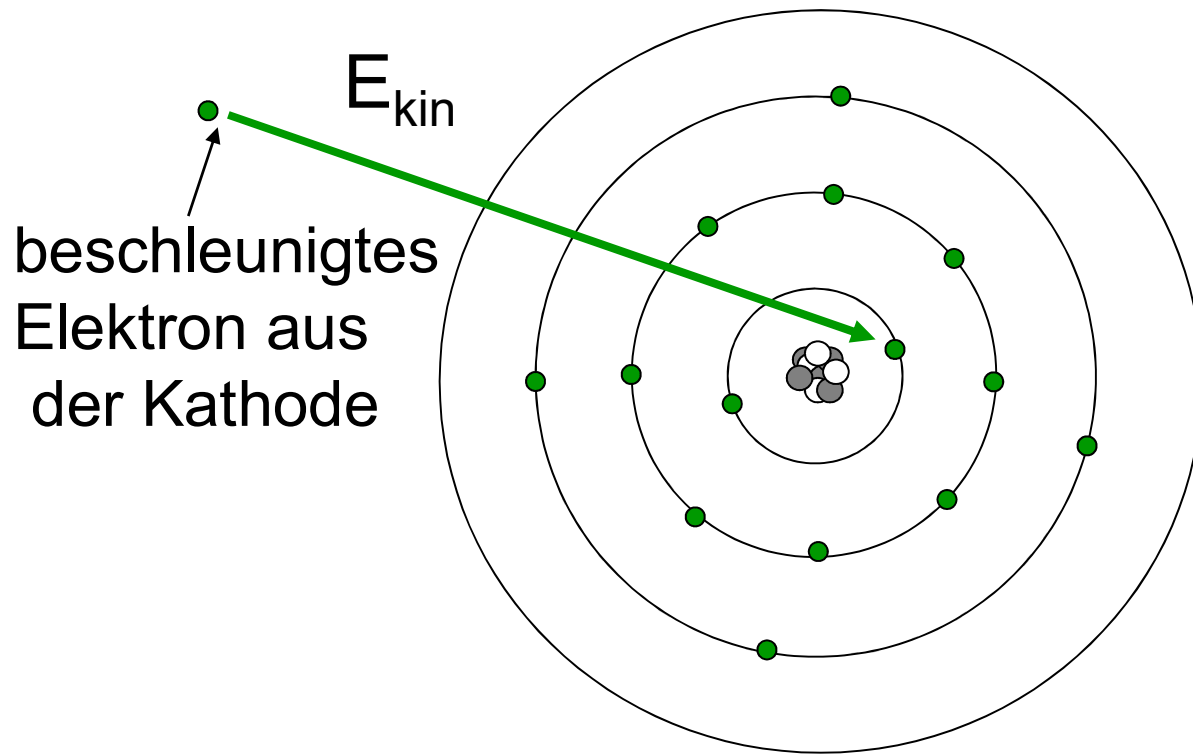
typischer  $\eta$  : 1%    **99% Wärme!**

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

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

Auch Kühlung der Anode ist notwendig!

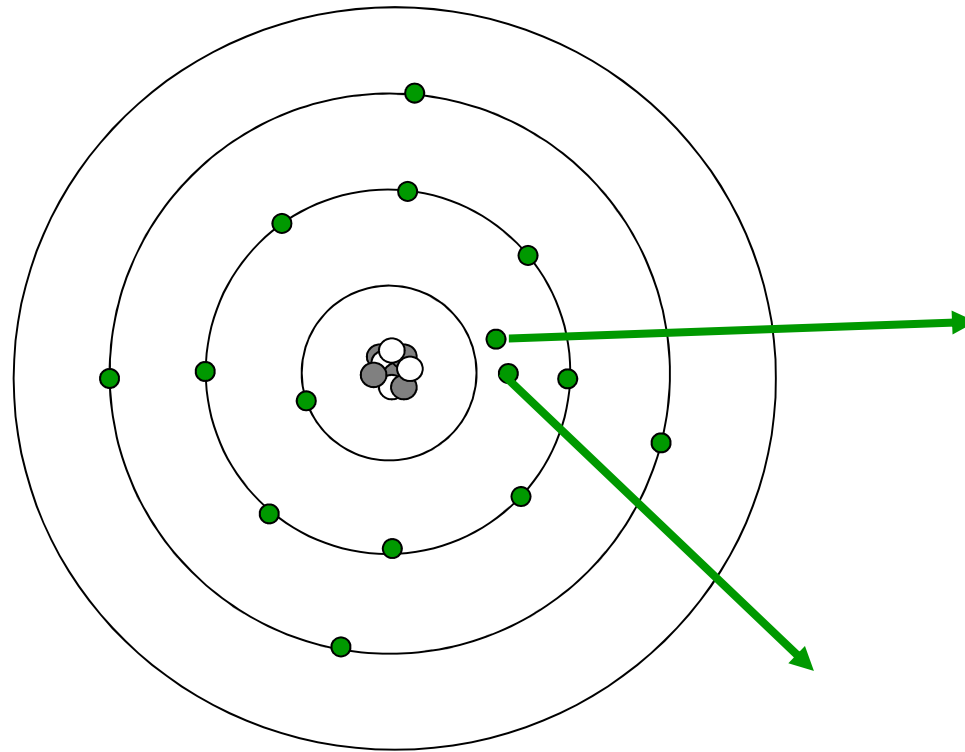
# Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung



Atom des Anodenmaterials

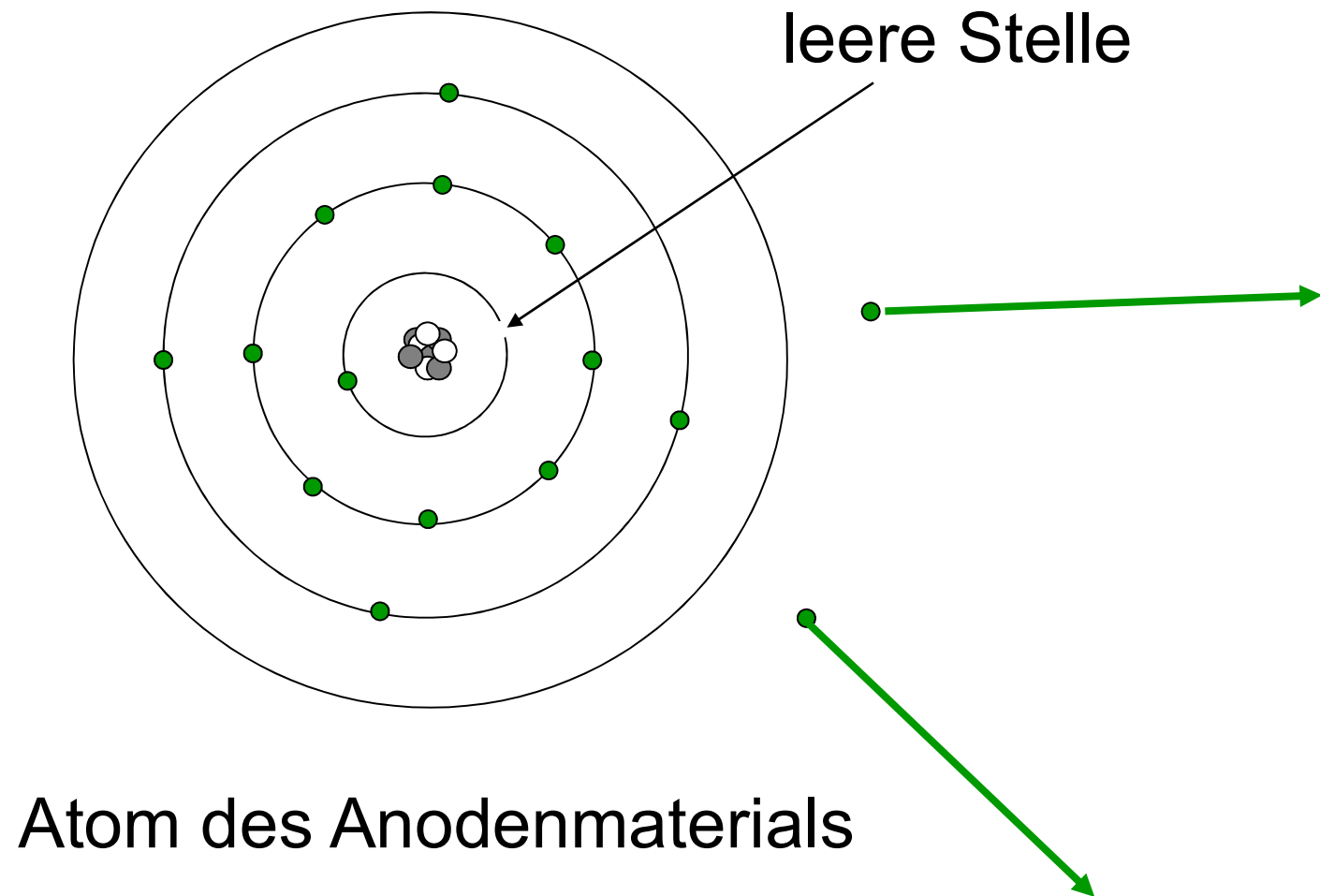


# Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung



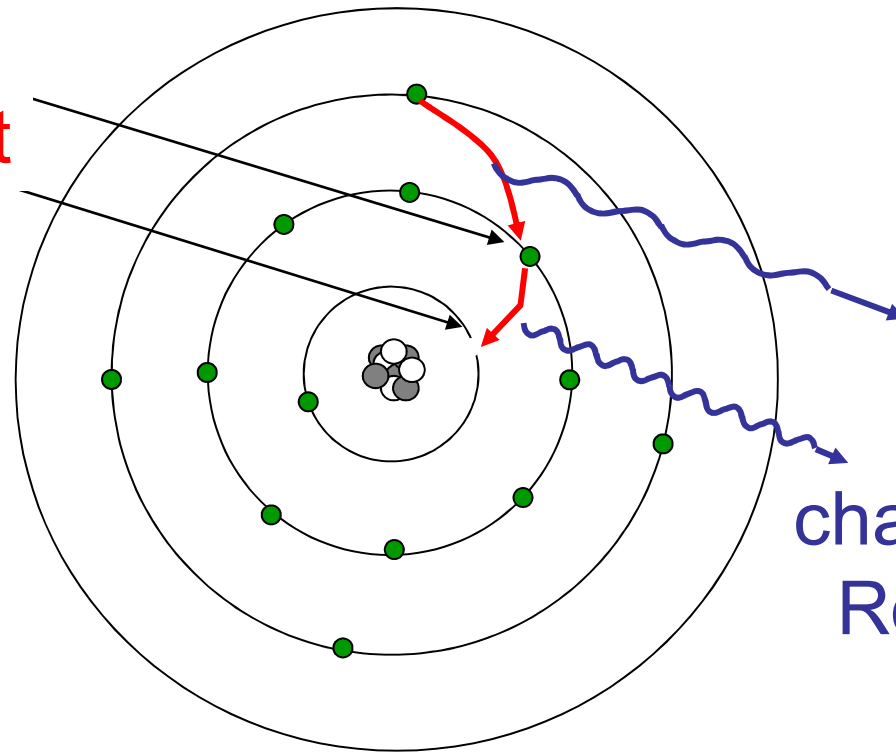
Atom des Anodenmaterials

# Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung



# Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung

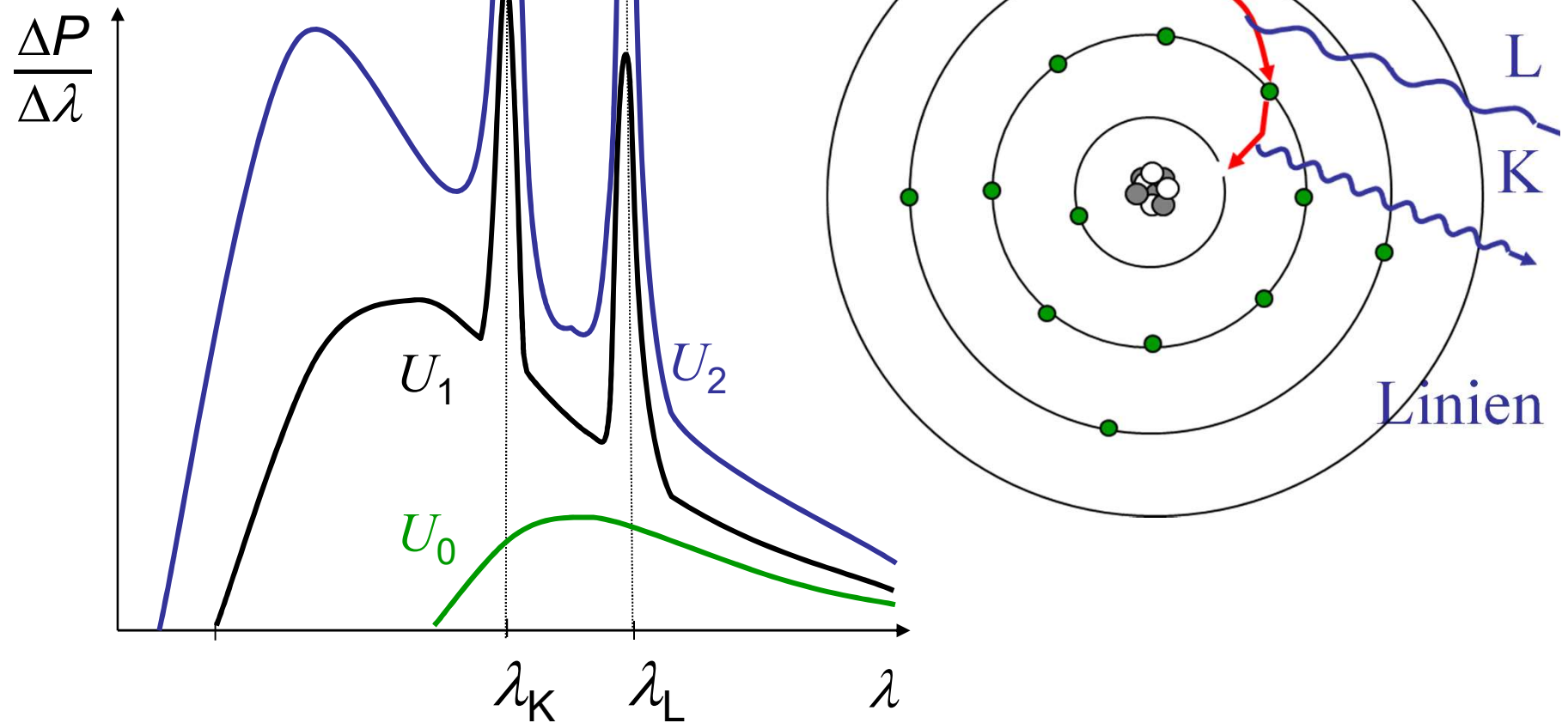
leere Stellen  
werden gefüllt



charakteristisches  
Röntgenphoton  
 $hf = \Delta E$

Atom des Anodenmaterials

# Spektrum der charakteristischen Röntgenstrahlung





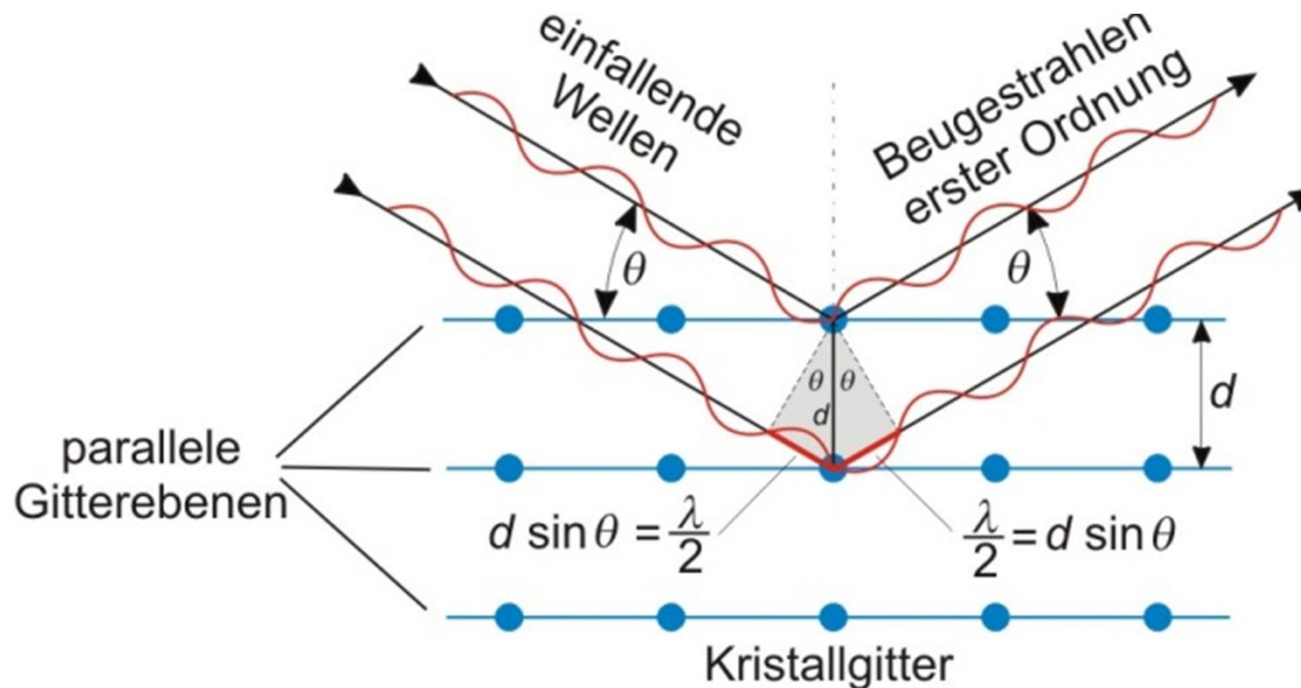
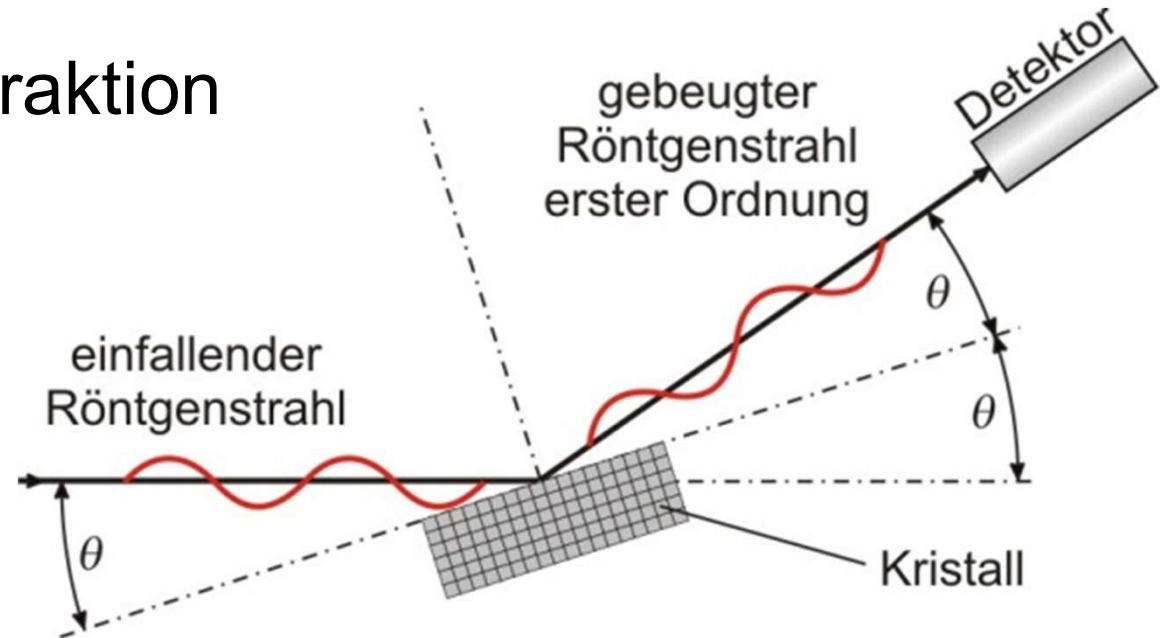
# Anwendung der charakteristischen Röntgenstrahlung

fast monochromatische Röntgenstrahlung

- Diagnostik (zB.: Mammographie)
- Strukturanalyse der Materie (Röntgenbeugung)

# Umweg: Röntgendiffraktion

$$\lambda \approx 0,01-0,1 \text{ nm}$$



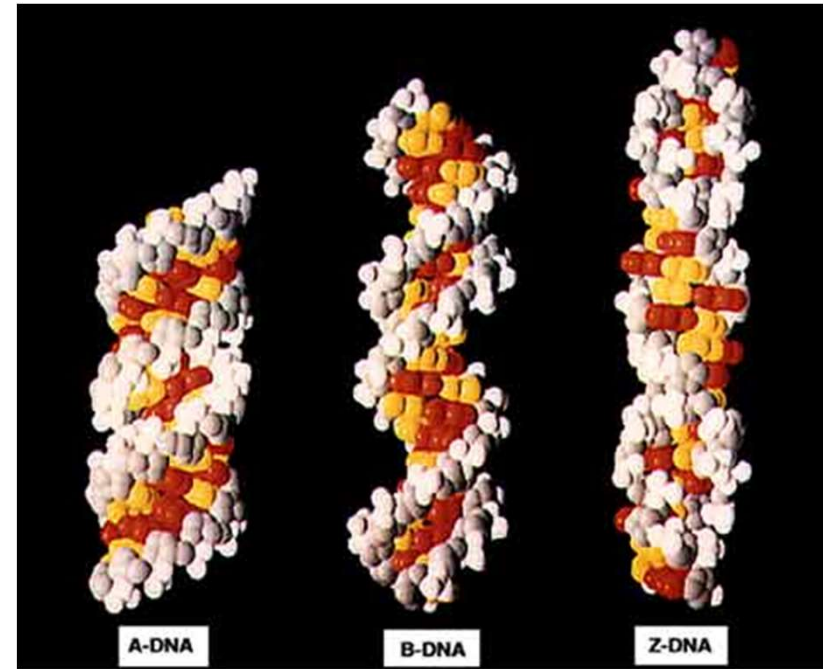
Bragg-Gleichung:

$$2d \sin \theta = n \cdot \lambda$$

Beispiele:

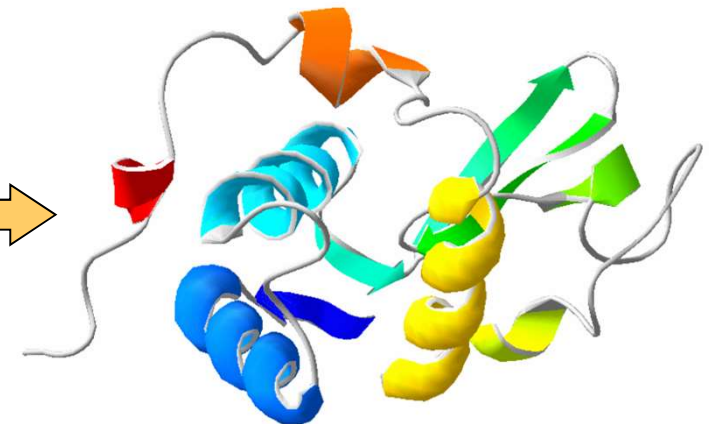
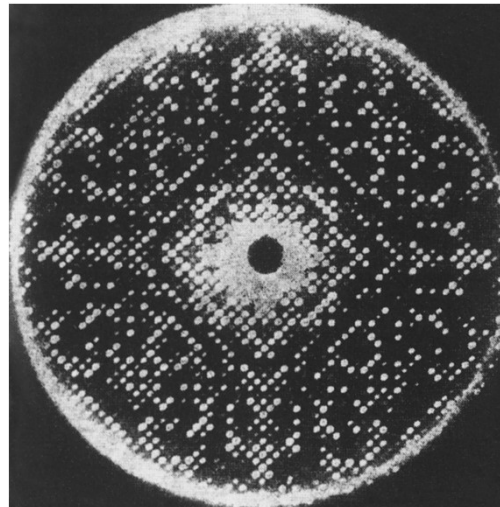
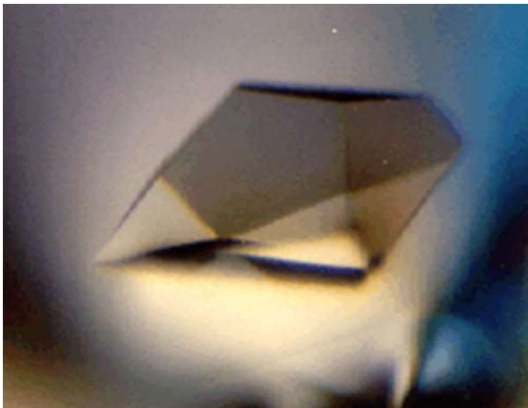


DNA



Lysozyme

Protein-Kristall



# PDB Database: 3D

## Makromolekülstrukturen meistens mit Hilfe der Röntgendiffraktion bestimmt

RCSB PDB - Mozilla Firefox

14.02.2021: 174507

Fájl Szerkesztés Nézet Előzmények Könyvjelzők Eszközök Súgó

www.pdb.org/pdb/home/home.do

Google

RCSB PDB PROTEIN DATA BANK

PDB-101

A MEMBER OF THE PDB

An Information Portal to Biological Macromolecular Structures

As of Tuesday Feb 14, 2012 at 4 PM PST there are ~~79256~~ Structures | PDB Statistics

All Categories Author Macromolecule Sequence Ligand

Search | All Categories: e.g., PDB ID, molecule name, author

Browse Advanced

Customize This Page

MyPDB Hide

Login to your Account  
Register a New Account  
Query Results (2)  
Query History (1)

Home Hide

News & Publications  
Usage/Reference Policies  
Deposition Policies  
Website FAQ  
Deposition FAQ  
Contact Us

### Biological Macromolecular Resource

Full Description

Featured Molecules Hide

Structural View of Biology

List View of Archive By: Title | Date | Category

Health & Disease

Molecule of the Month

**Aminoglycoside Antibiotics**

The discovery of streptomycin in 1944 provided the first effective treatment for tuberculosis. Ever since then, we have fought an escalating battle with

New Structures Hide

Latest Release  
New Structure Papers  
Search Unreleased Entries

New Features Hide

Ligands: Subcomponents and Leaving Atoms

Latest features released:

Website Release Archive: [dropdown]

RCSB PDB News Hide



A photograph of a clinical X-ray room. A large, white, C-arm X-ray machine is positioned over a patient table. The table is covered with a blue padded mat. The room has white tiled walls and a sink in the background. The text is overlaid on the image.

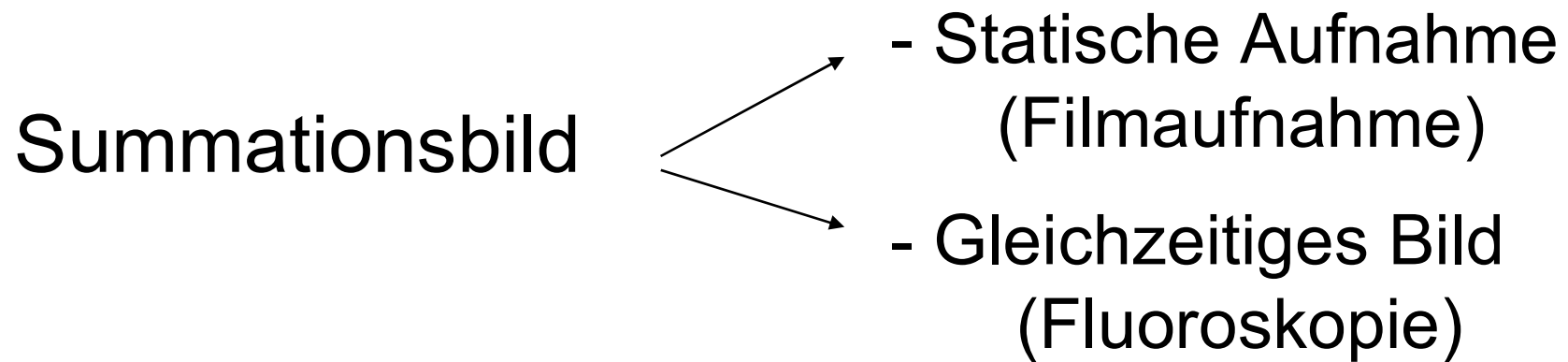
# Röntgenstrahlung

Erzeugung und Eigenschaften

Physikalische Grundlagen

der Röntgendiagnostik

# Röntgendiagnostische Verfahren

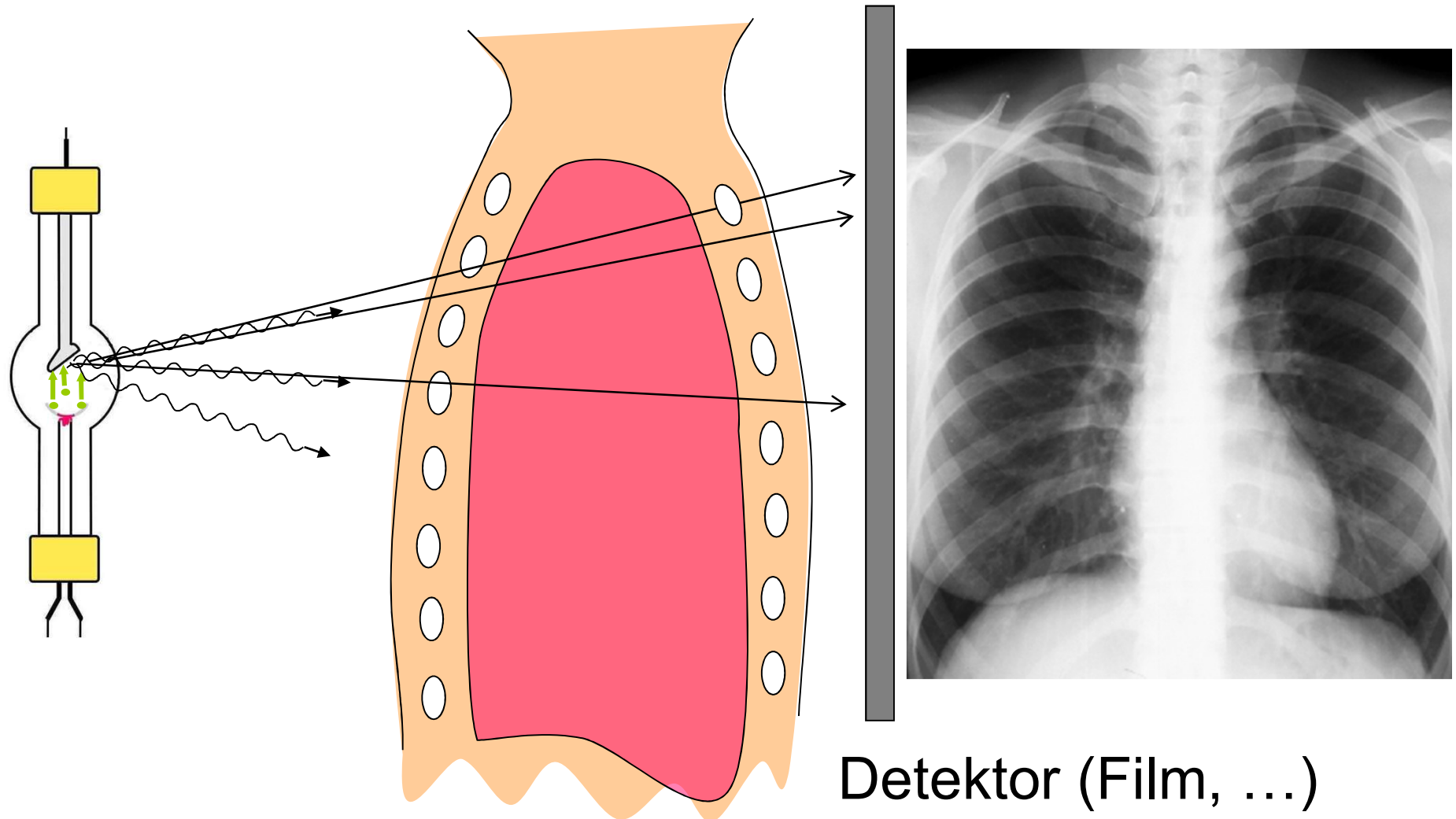


Tomographisches Bild      CT

Spezialitäten: Anwendung von Kontrastmitteln,  
Digitalisierung, Substraktion

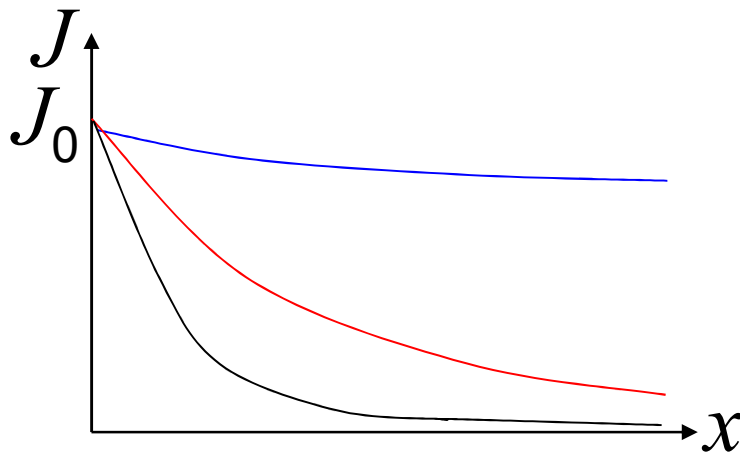


# Grundprinzip der Summationsaufnahmen



# Röntgenbildentstehung

Grundprinzip der Röntgenbildentstehung: Unterschiedliche Strahlungsabsorption der verschiedenen Gewebe.



Luft

Weichteilgewebe

Knochen

# Schwächung der Röntgenstrahlung

## Grund der Röntgendiagnostik

Ähnlich zur Schwächung  
der  $\gamma$ -Strahlung

### Schwächungsgesetz:

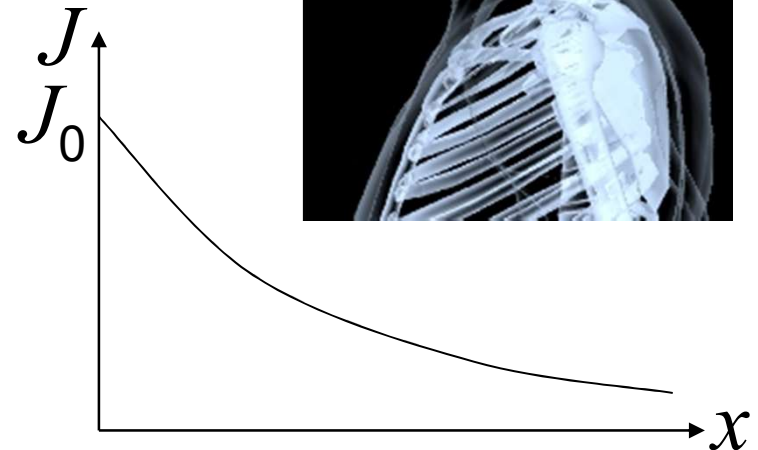
$$J = J_0 \cdot e^{-\mu x}$$

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

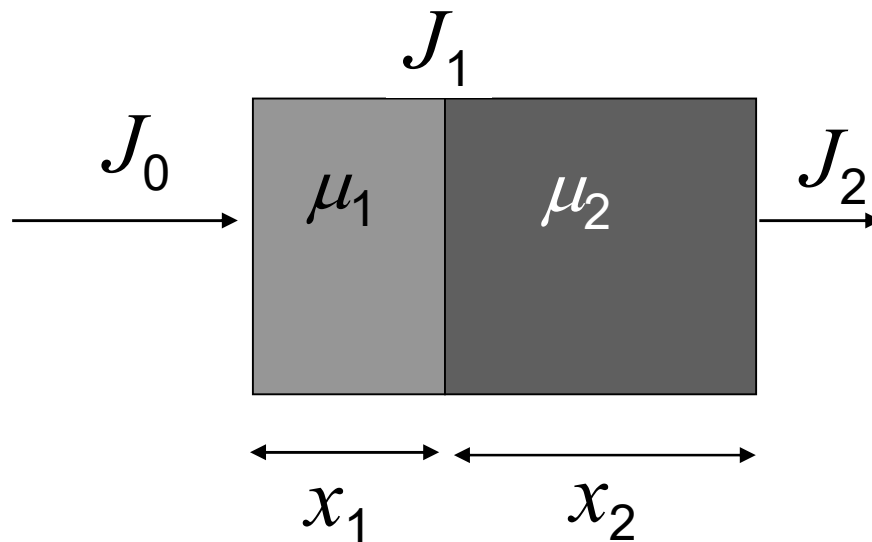
$Z$

$\lambda$  oder  $E_{\text{photon}}$

Massen-  
schwächungs-  
koeffizient



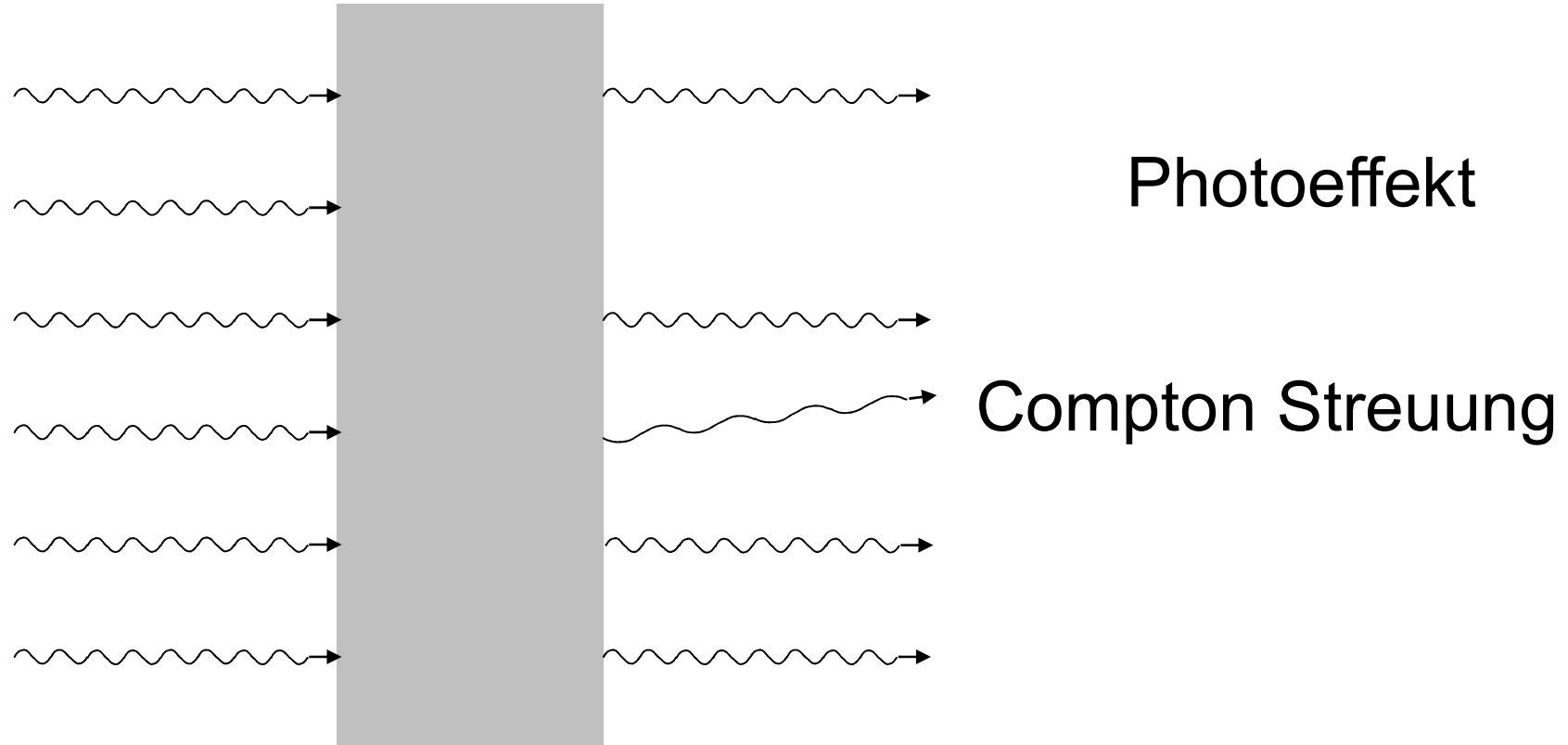
# Absorption von inhomogenen Körpern



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

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

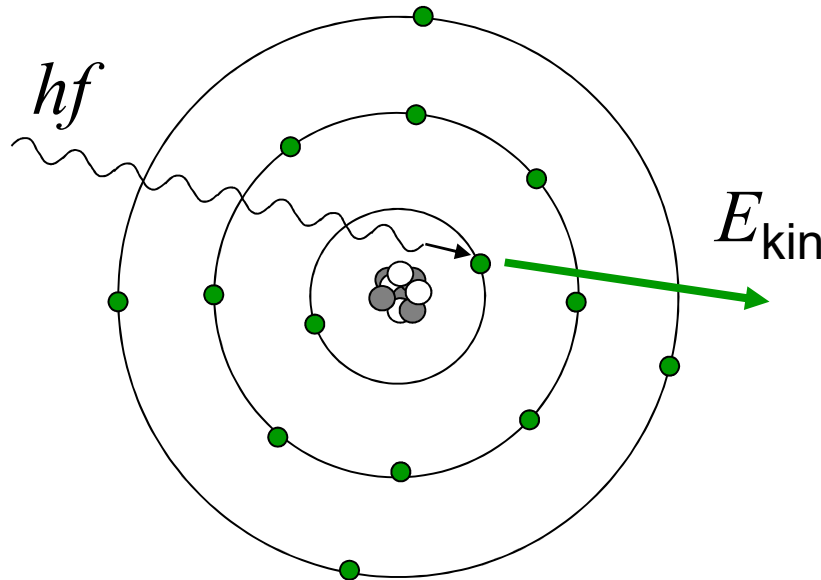
# Teilprozesse der Schwächung der Röntgenstrahlung



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

unterschiedliche Stoff( $Z$ )-  
und  $\lambda$  (oder  $E_{ph}$ ) Abhängigkeit

# Photoeffekt



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

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

starke  $Z$  Abhängigkeit!  
diagn. Bedeutung!

Beispiel:

**10%  $Z$  Erhöhung**

110%=1,1

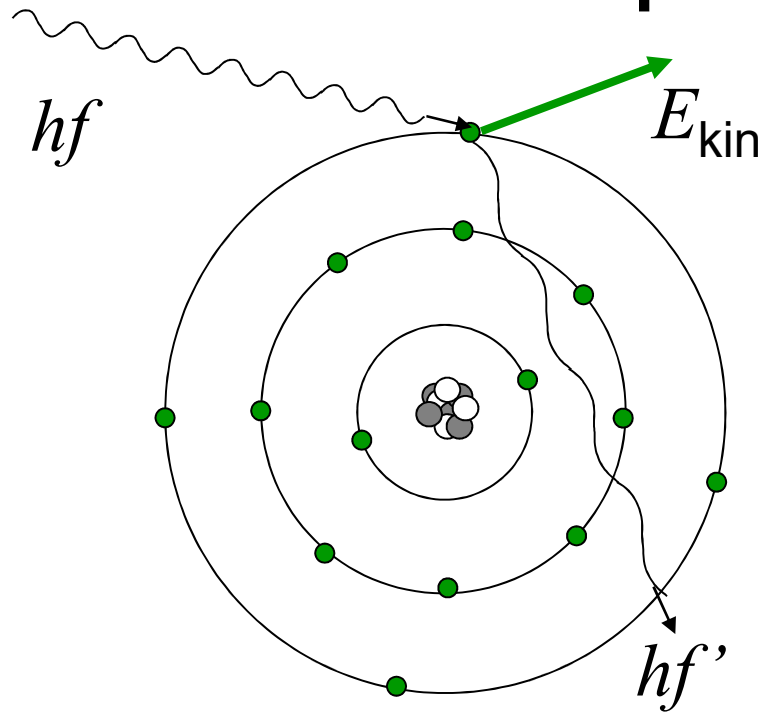
$1,1^3=1,331$

**33%  $\tau_m$  Erhöhung!**

bei weicher Strahlung



# Compton Streuung



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

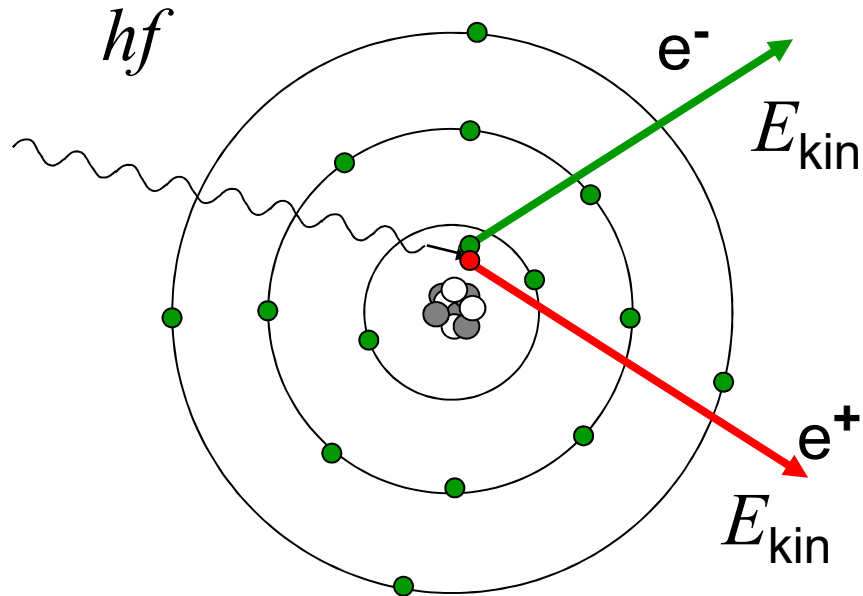
praktisch unabhängig von  $Z$  !

zB:

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

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

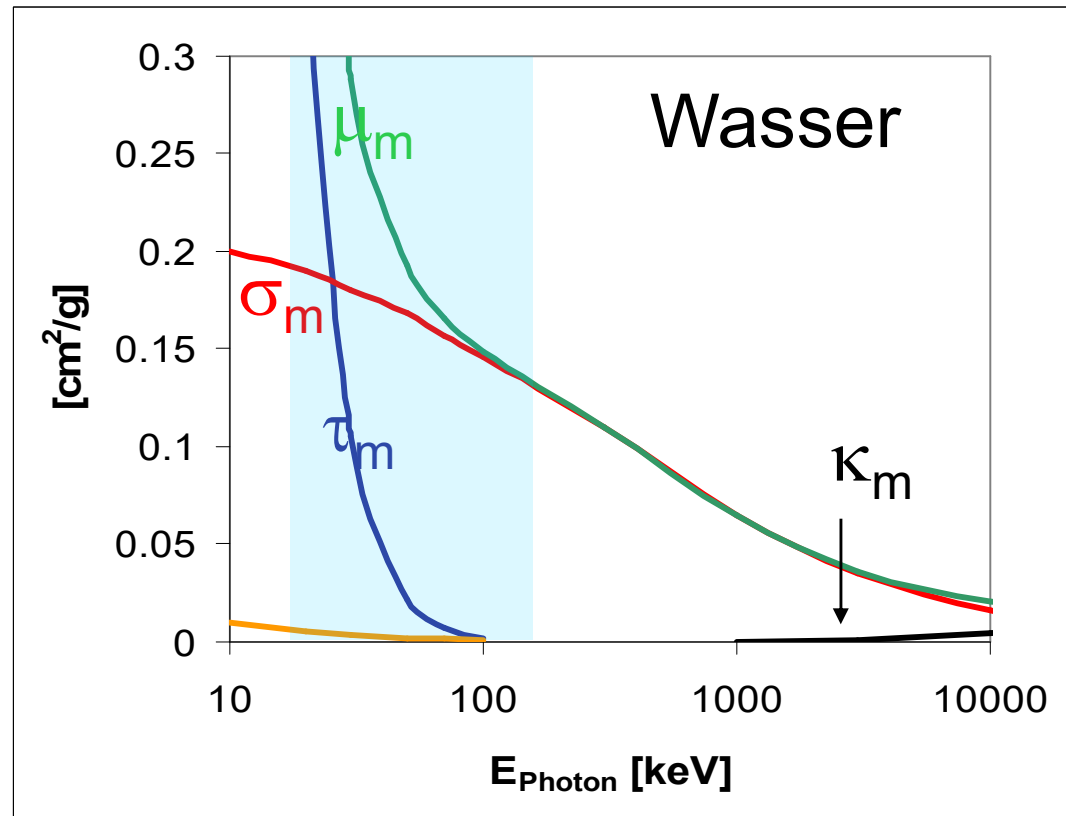
# Paarbildung



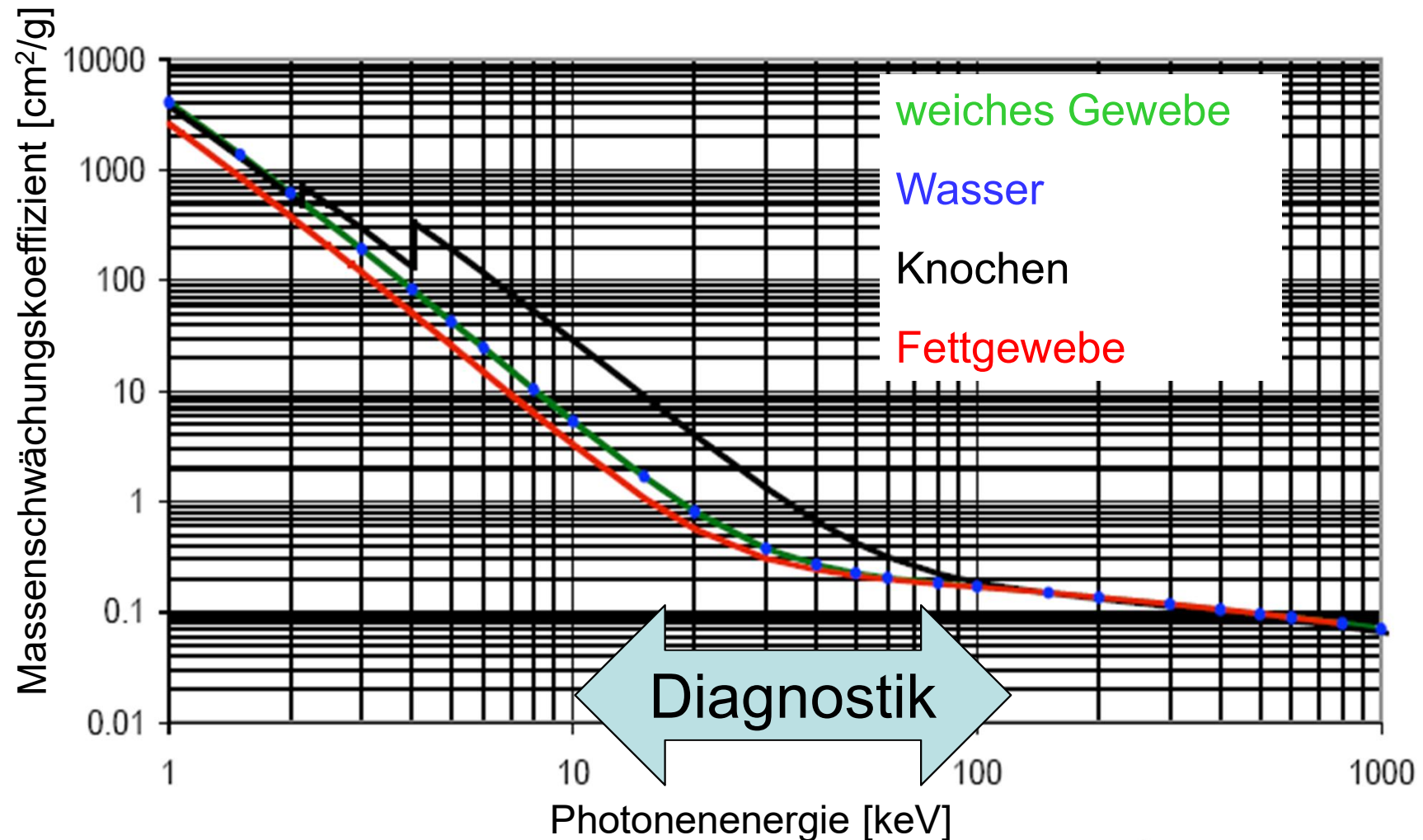
$$hf \geq 2 m_e c^2 \approx 1\text{MeV}$$

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

# Photonenenergieabhängigkeit des Schwächungskoeffizienten



# Photonenenergieabhängigkeit des Massenschwächungskoeffizienten



# 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

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

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



# Warum die unterschiedliche gewebe unterschiedlich absorbieren?

Effektive Ordnungszahl der 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:  $\approx 6$       7,4      13,8

# Kontrast bei der Röntgenaufnahme

## Ein Beispiel

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:

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

$$\mu_m = \tau_m + \sigma_m$$

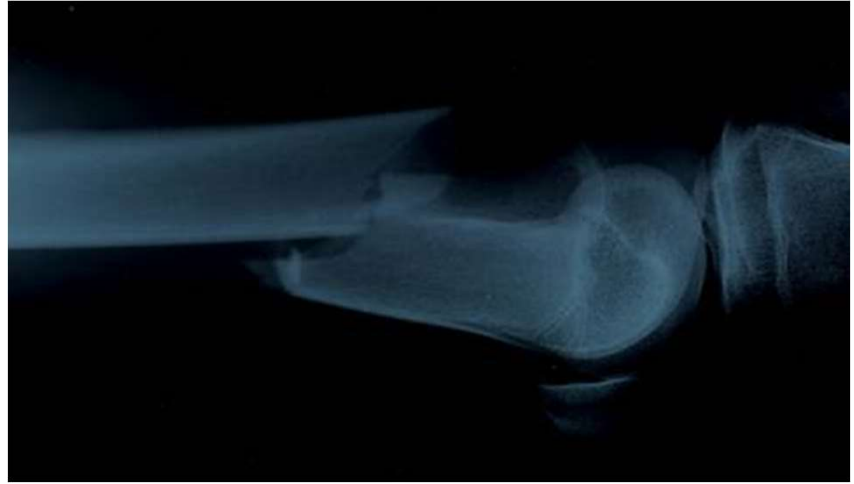
$$\mu = \mu_m \rho$$

$$\rho_{wG} = 1,05$$

$$\rho_{Knochen} = 1,7..1,8$$

wenn  $\tau_{m,wG} = \sigma_{m,wG}$

$$\frac{\mu_{Knochen}}{\mu_{weiches Gewebe}} = \frac{6,5 + 1}{1 + 1} \cdot \frac{1,75}{1,05} = 6,25$$



# Kontrastmittel

Positives Kontrastmittel:

mehr Absorption

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

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

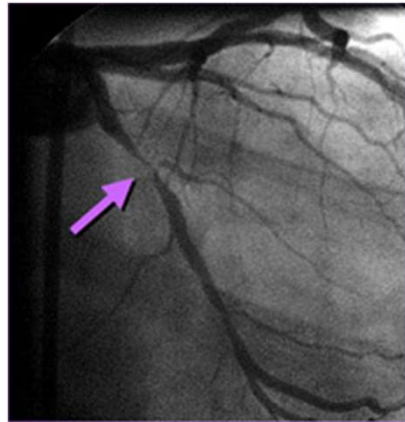
Jod (Z= 53)

Blutgefäß  
(Angiographie)

Barium (Z=56)

Magen, Darm  
in Form von  $\text{BaSO}_4$

# Angiographie







# Kontrastmittel

Negatives Kontrastmittel:

wenige Absorption  $\mu \downarrow$   $\rho \downarrow$   $\mu_m - Z_{\text{eff}} -$   
Luft, CO<sub>2</sub> (Gase) in Darm

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

BaSO<sub>4</sub> + Luft in Darm.

# Doppelkontrastaufnahmen

