

Medizinische Biophysik II.

2020/21 II.

1

Röntgenstrahlung

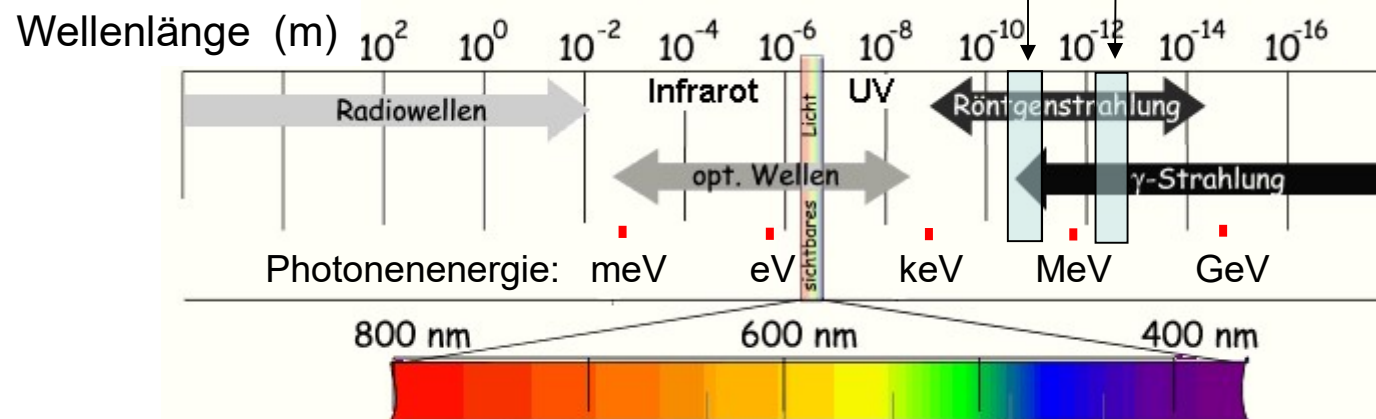
Erzeugung und Eigenschaften

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.)



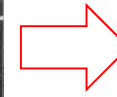
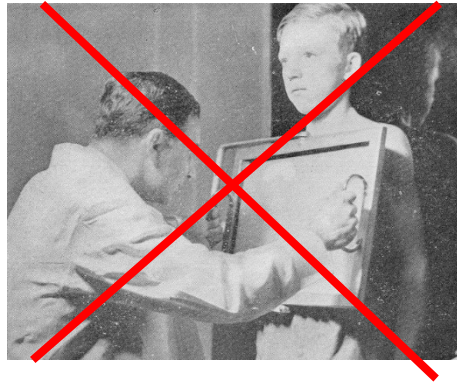
- Wirkungen:

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

- Entstehung: in der Elektronenhülle

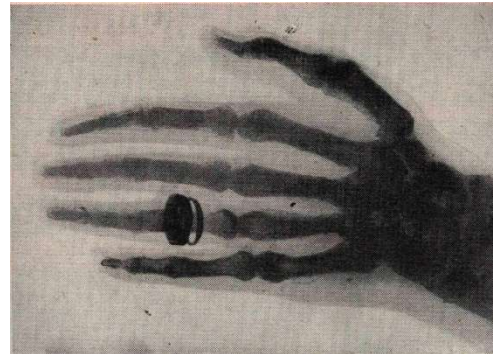
- Typen

- 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

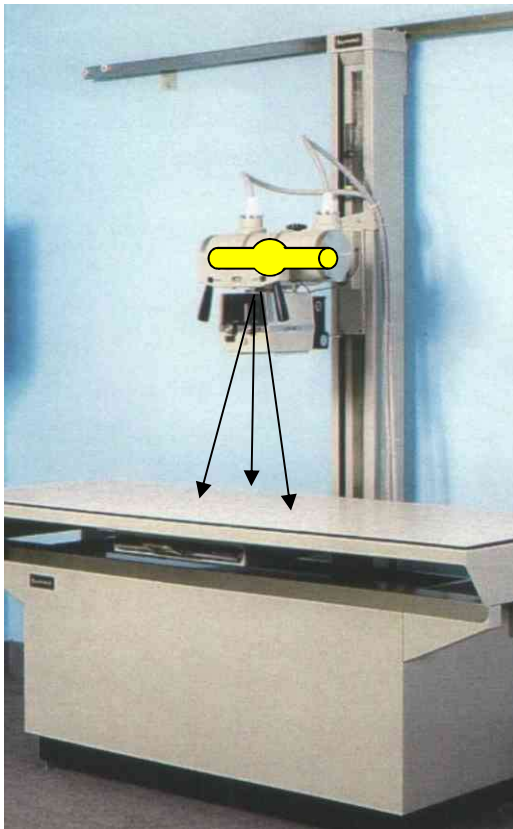
Röntgenstrahlung Entsteht wenn
hochenergetische (beschleunigte)
geladene Teilchen ihre Energie abgeben.

Elektronen E_{kin}

Röntgenröhre (Diagnostik)
Teilchenbeschleuniger (Therapie)

Geräte zur Erzeugung der Röntgenstrahlung

Röntgenröhre



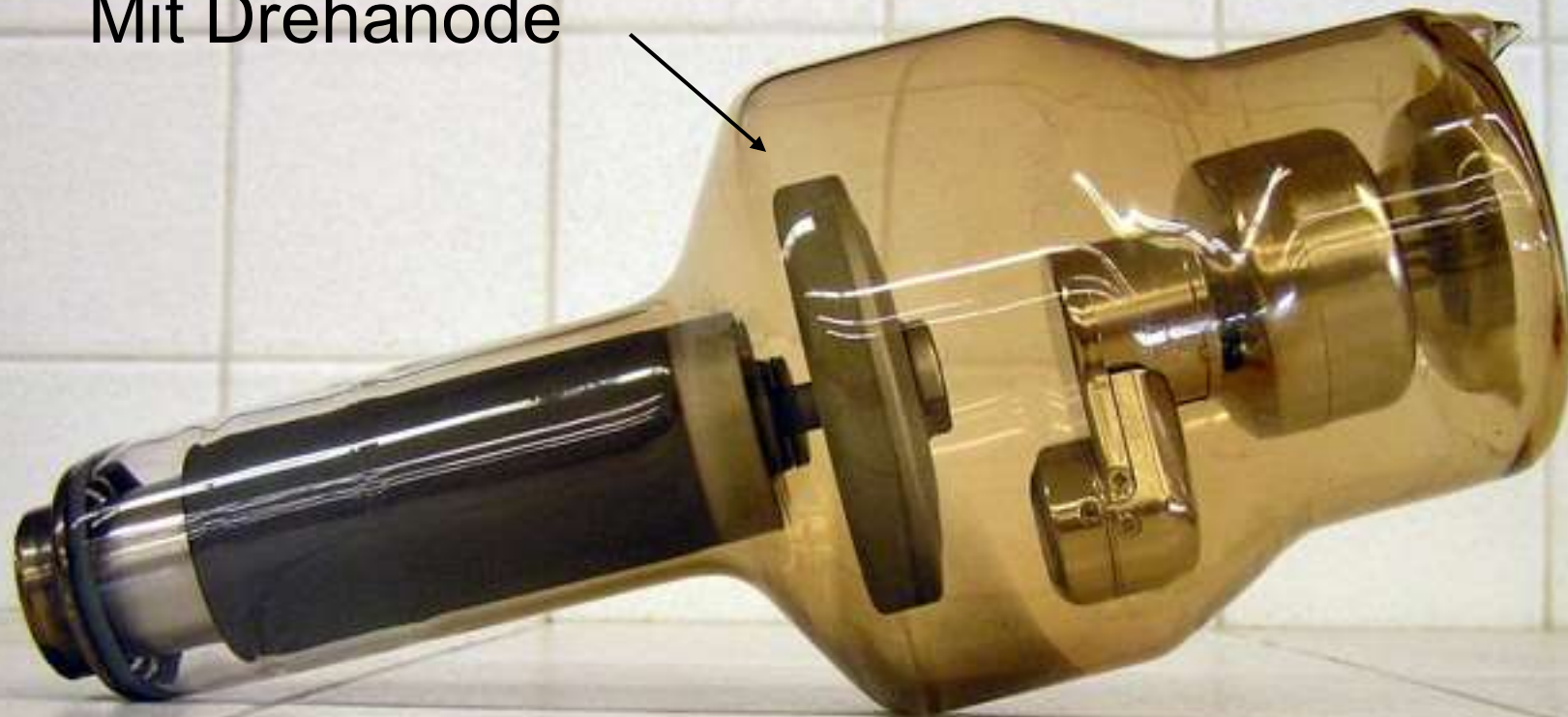
Teilchenbeschleuniger



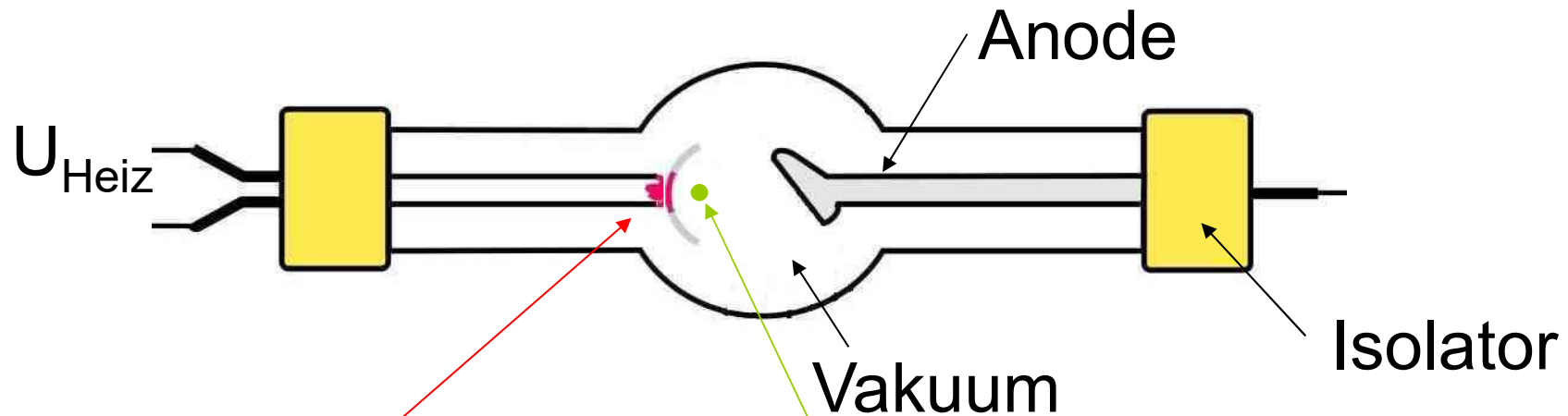
Die Röntgenröhre



Mit Drehanode



Die Röntgenröhre (1)

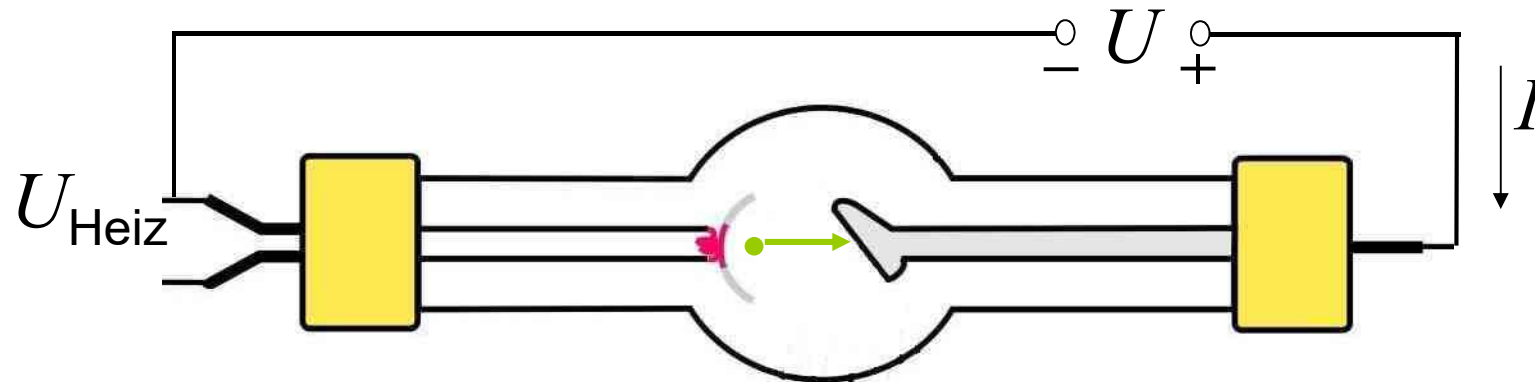


Heizkathode: Heizung (T Erhöhung) \Rightarrow Erhöhte thermische Energie \Rightarrow **Elektronen** treten aus der Kathode aus.

(Glühelektrischer Effekt)



Die Röntgenröhre (2)



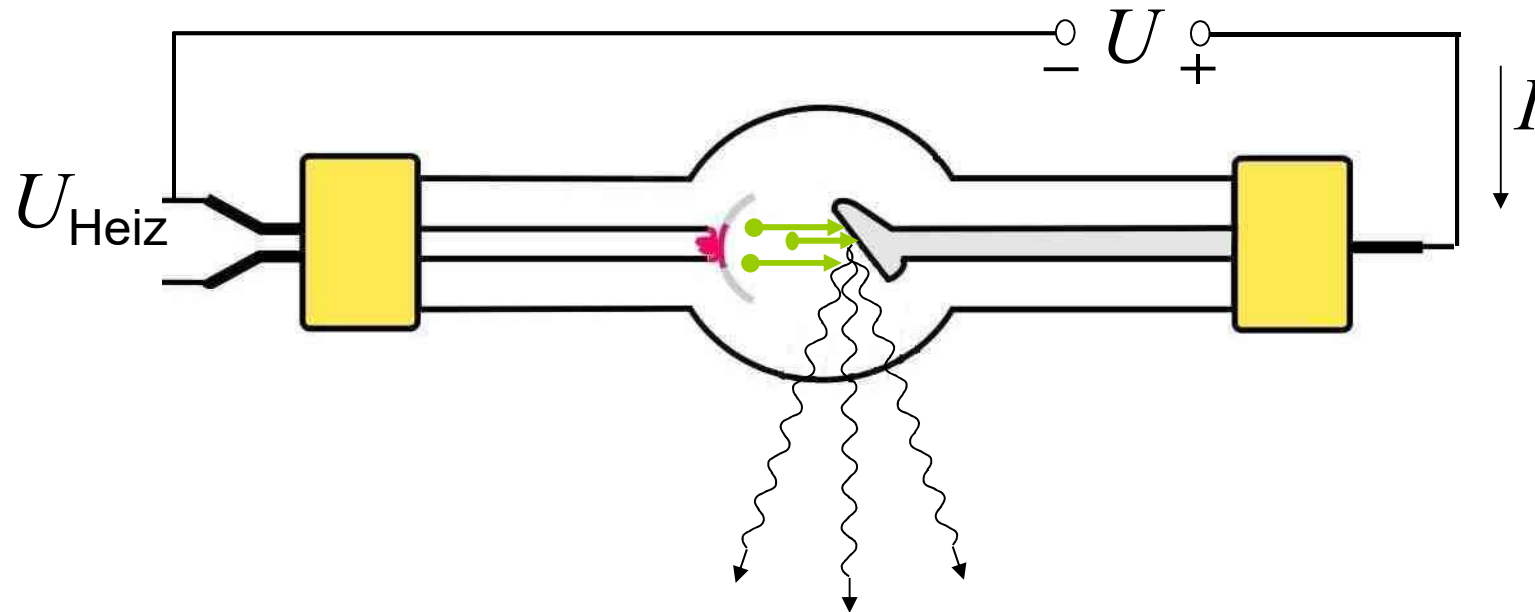
Anodenspannung(U) (typisch 30-200 kV):
beschleunigt die Elektronen

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

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

kinetische Energie
des beschleunigten Elektrons

Die Röntgenröhre (3)

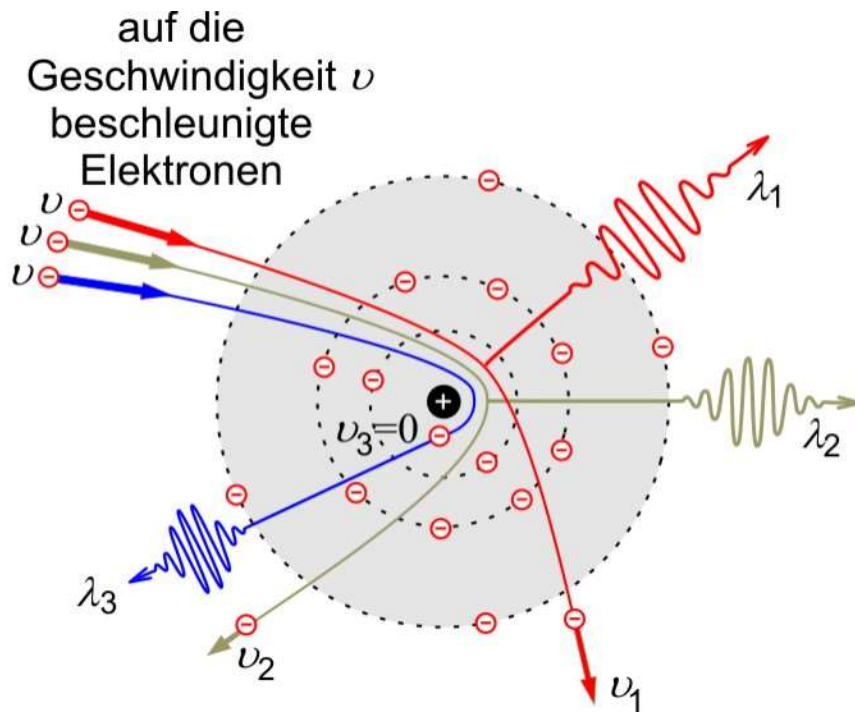


Röntgenstrahlung entsteht wenn die beschleunigten Elektronen auf die Anode prallen.

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

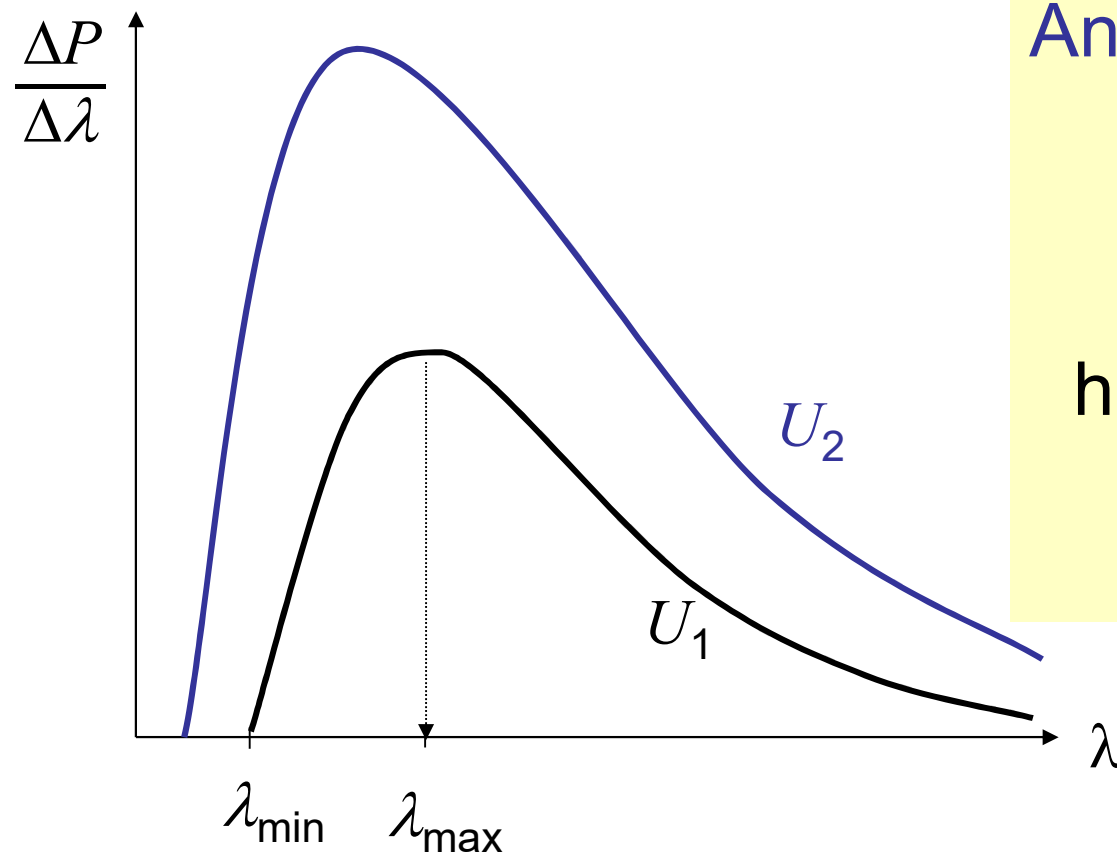
$$\lambda \geq \frac{hc}{U_e} = \lambda_{\min}$$

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

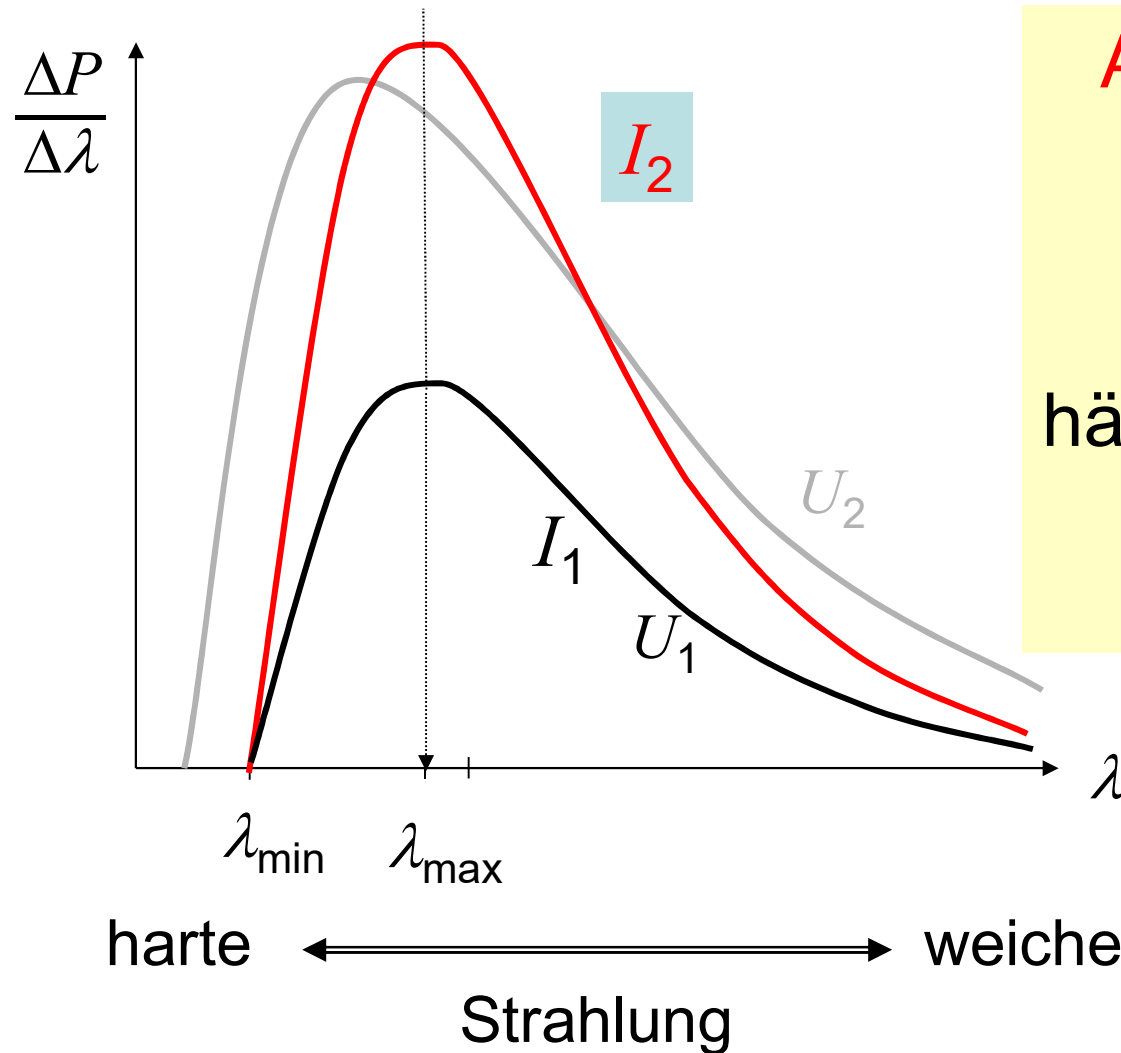
$N_{\text{photon}} \uparrow$

Leistung $\uparrow\uparrow$

$$P \sim U^2$$

harte \longleftrightarrow weiche
Strahlung

Emissionsspektrum der Bremsstrahlung



Anodenstrom \uparrow

λ_{\min} -

λ_{\max} -

E_{photon} -

härte d. Strahlung -

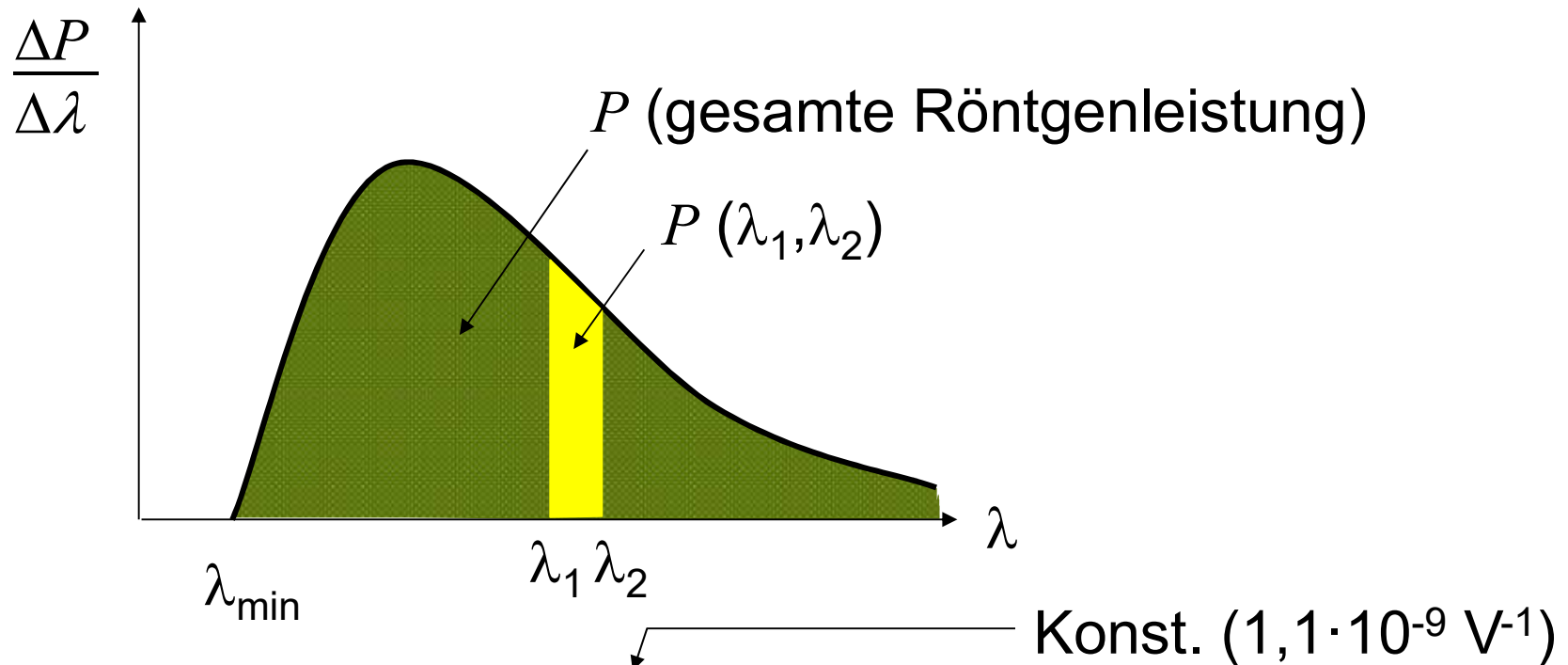
N_{photon} \uparrow

Leistung \uparrow

$$P \sim I$$

~~Ohm~~

Leistung der Röntgenstrahlung

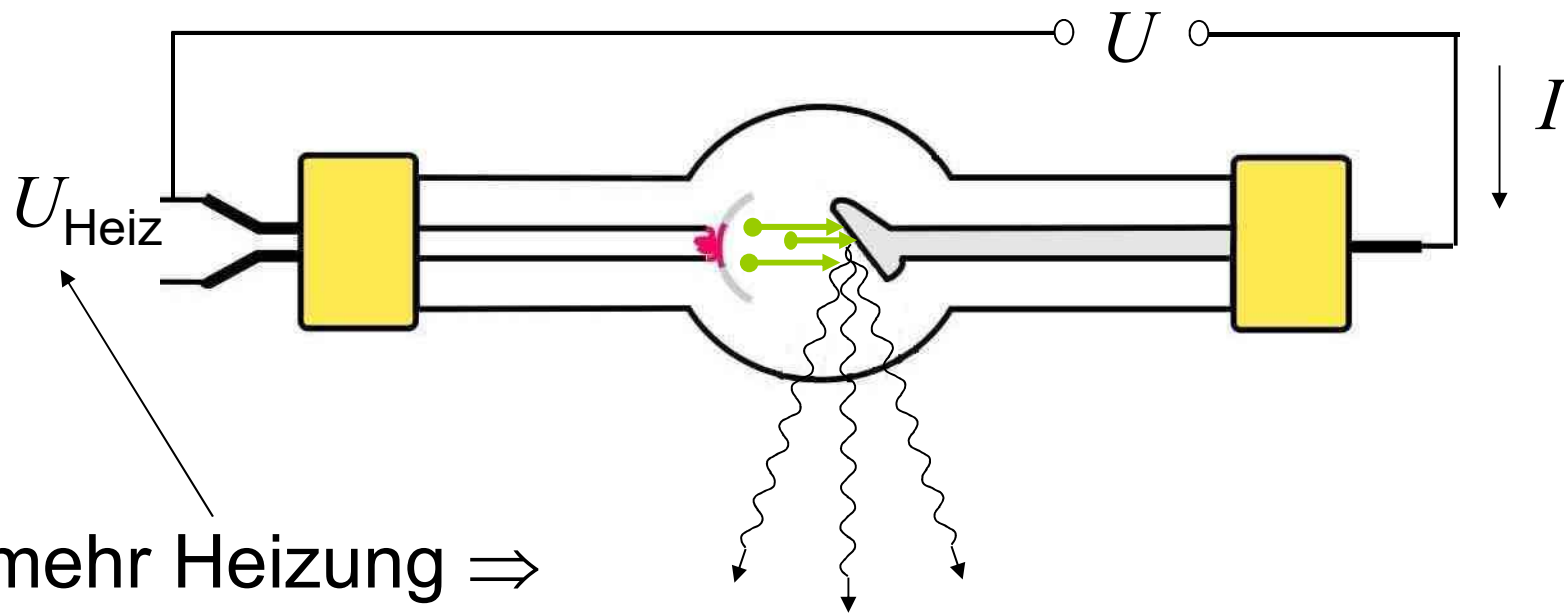


$$P = c_{\text{Rtg}} \cdot U^2 \cdot I \cdot Z$$

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

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

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

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

Anodenmaterial mit hoher Ordnungszahl !

Praktisch: Wolfram ($Z=74$)

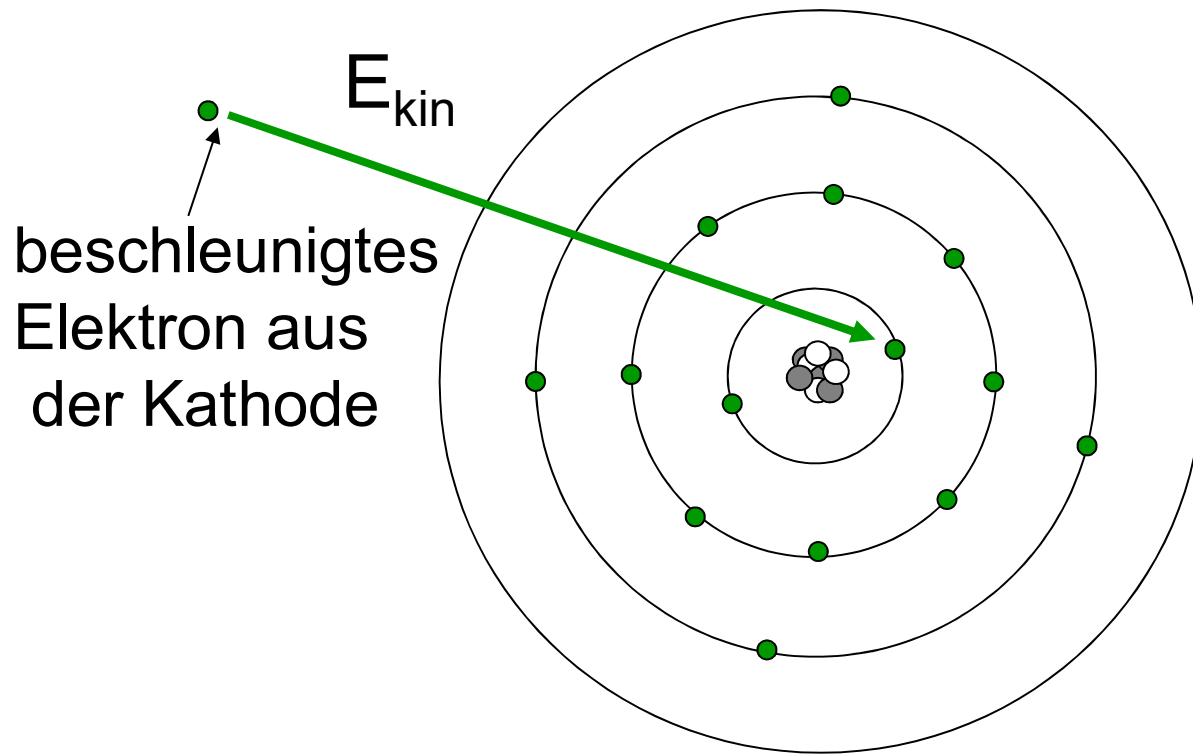
typischer η : 1% **99% Wärme!**

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

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

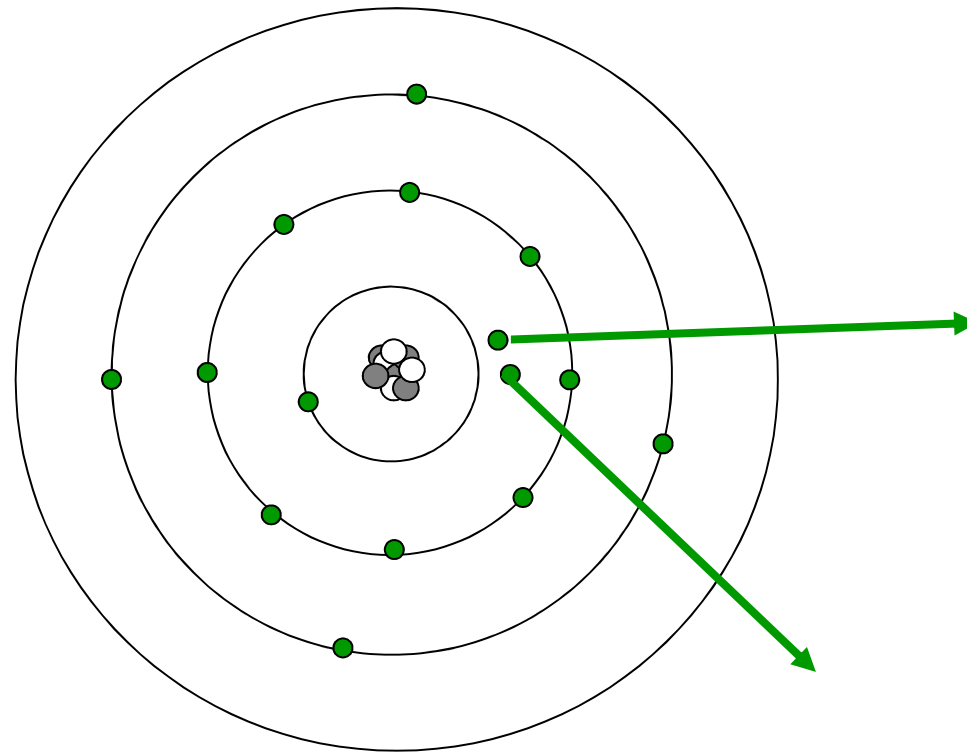
Auch Kühlung der Anode ist notwendig!

Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung



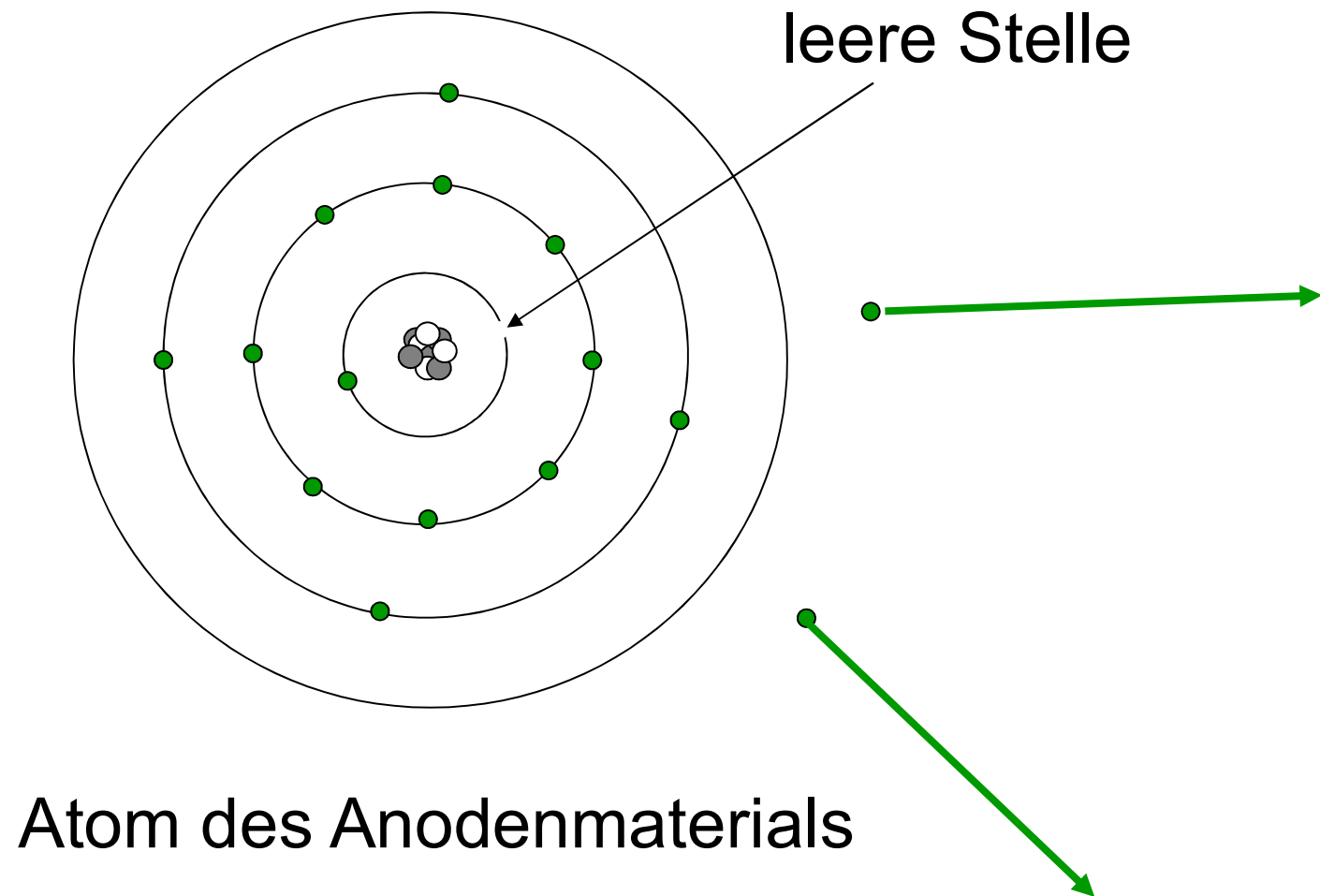
Atom des Anodenmaterials

Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung



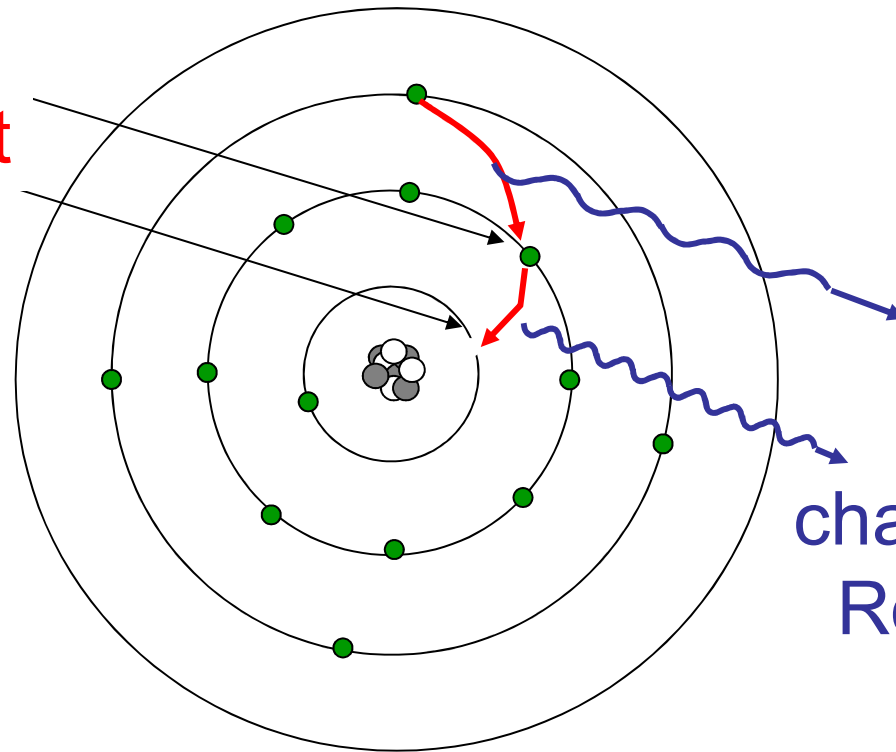
Atom des Anodenmaterials

Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung



Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung

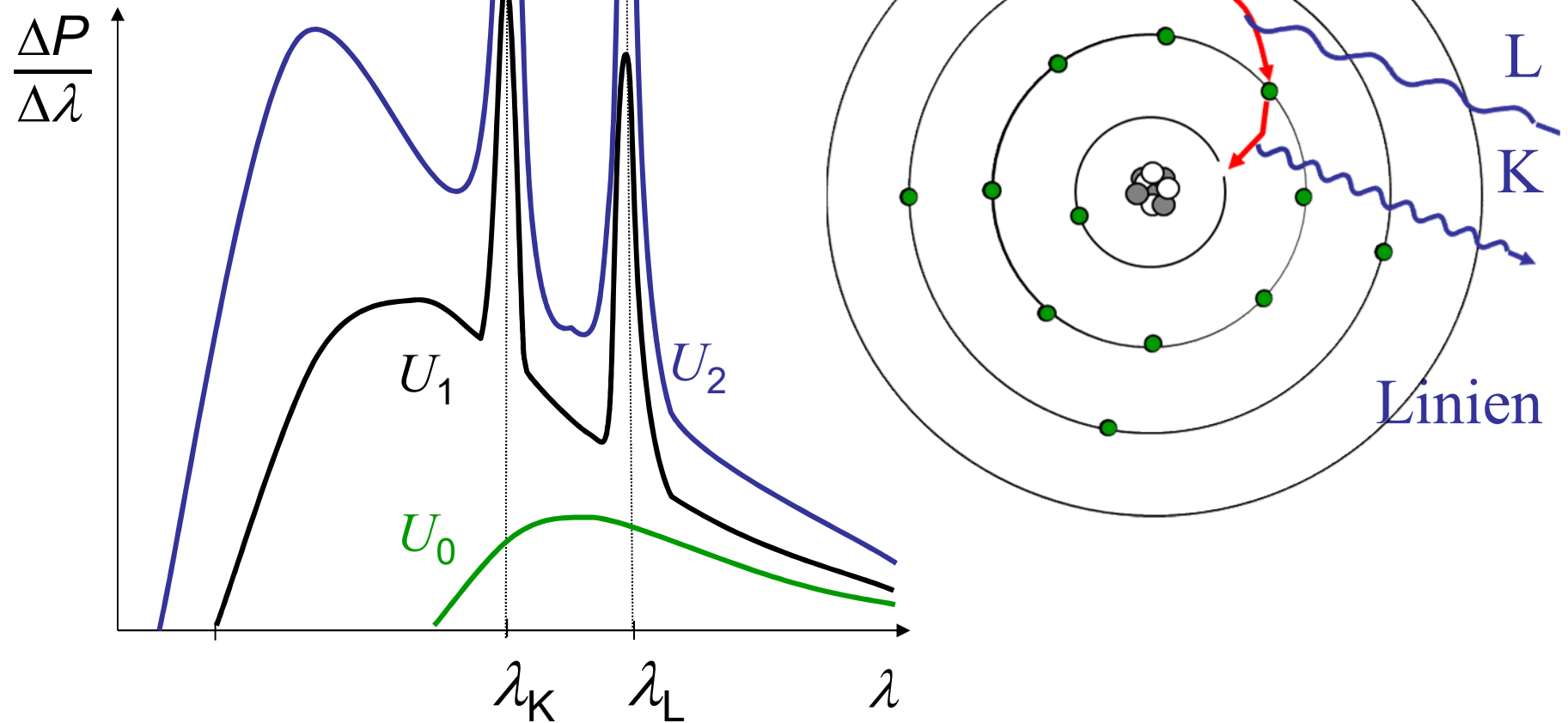
leere Stellen
werden gefüllt



charakteristisches
Röntgenphoton
 $hf = \Delta E$

Atom des Anodenmaterials

Spektrum der charakteristischen Röntgenstrahlung



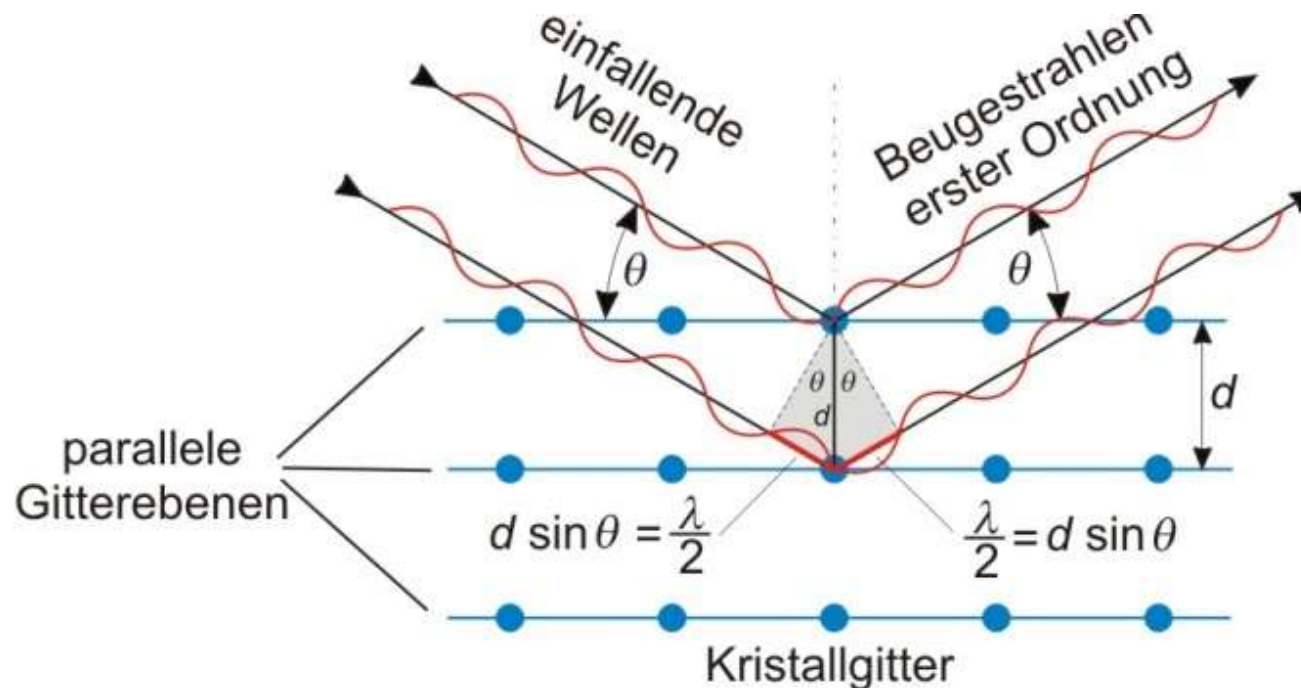
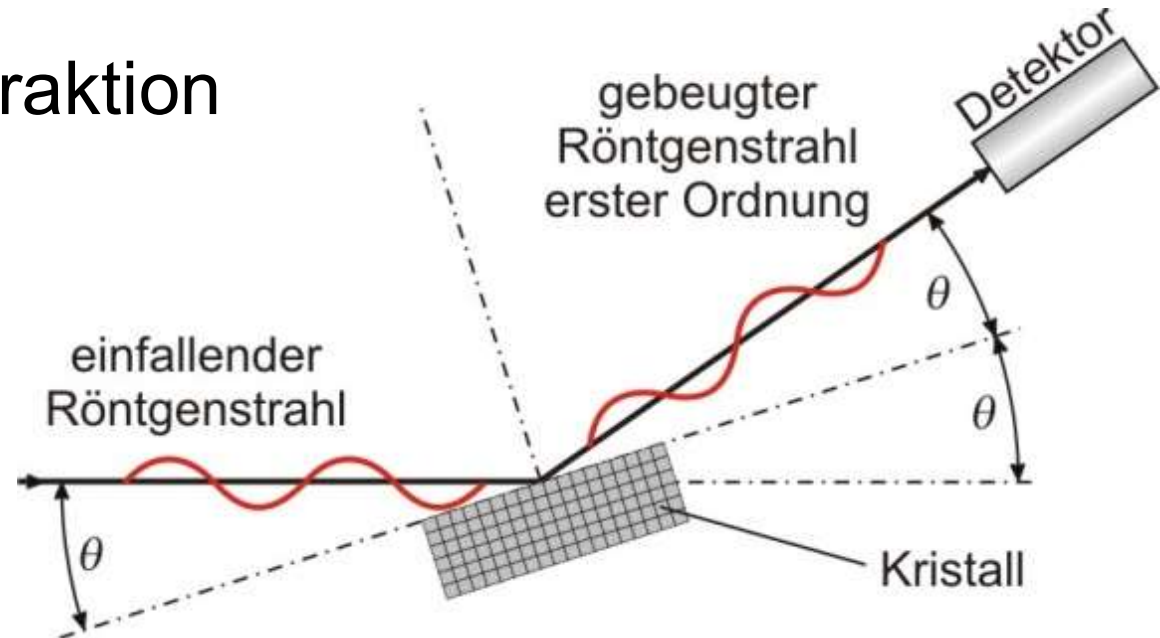
Anwendung der charakteristischen Röntgenstrahlung

fast monochromatische Röntgenstrahlung

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

Umweg: Röntgendiffraktion

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



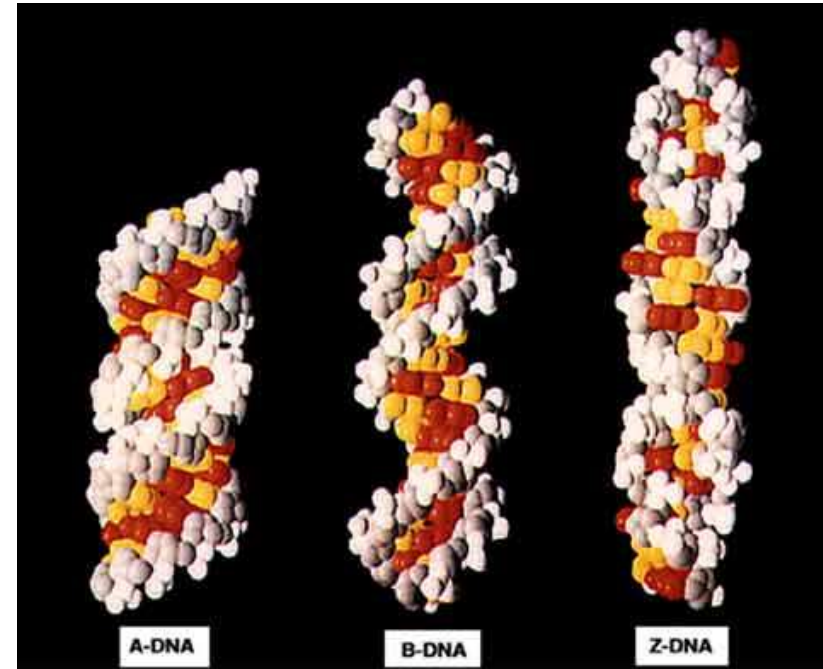
Bragg-Gleichung:

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

Beispiele:

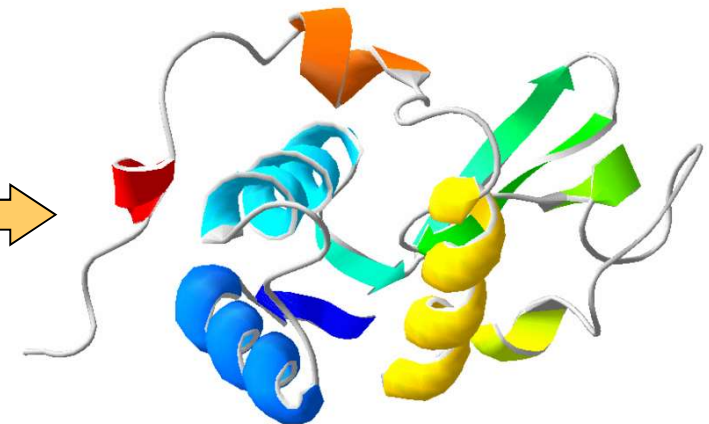
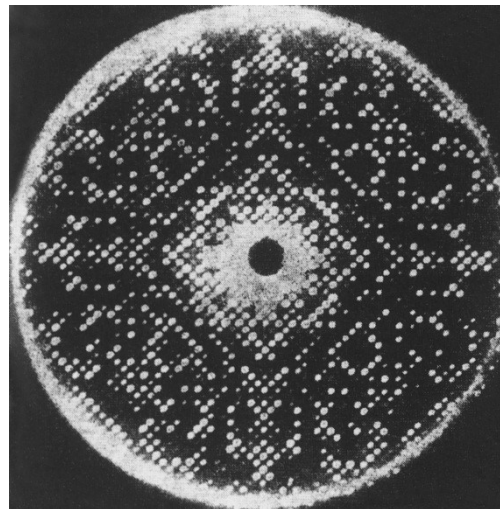


DNA



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

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 ~~79356~~ 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: ▼

RCSB PDB News Hide



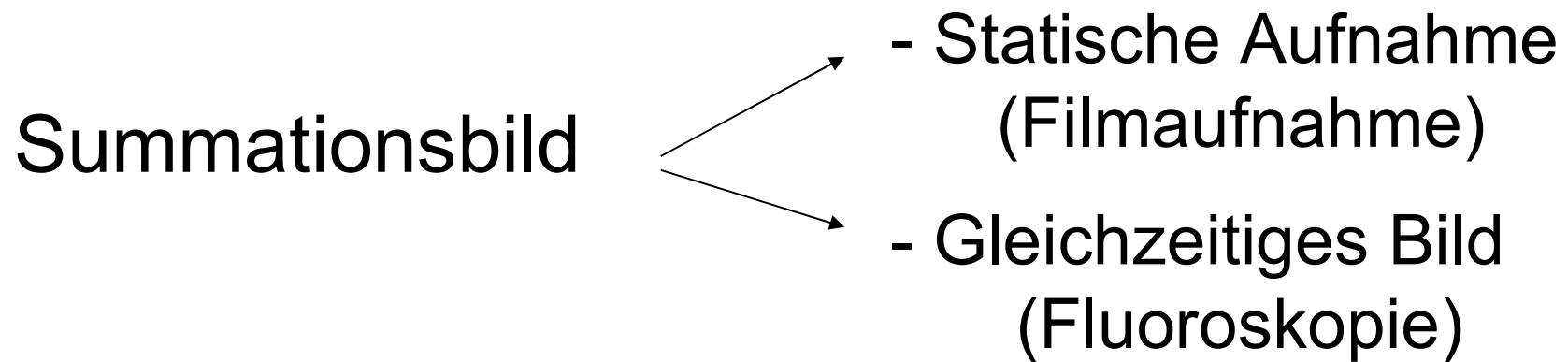
Röntgenstrahlung

Erzeugung und Eigenschaften

Physikalische Grundlagen

der Röntgendiagnostik

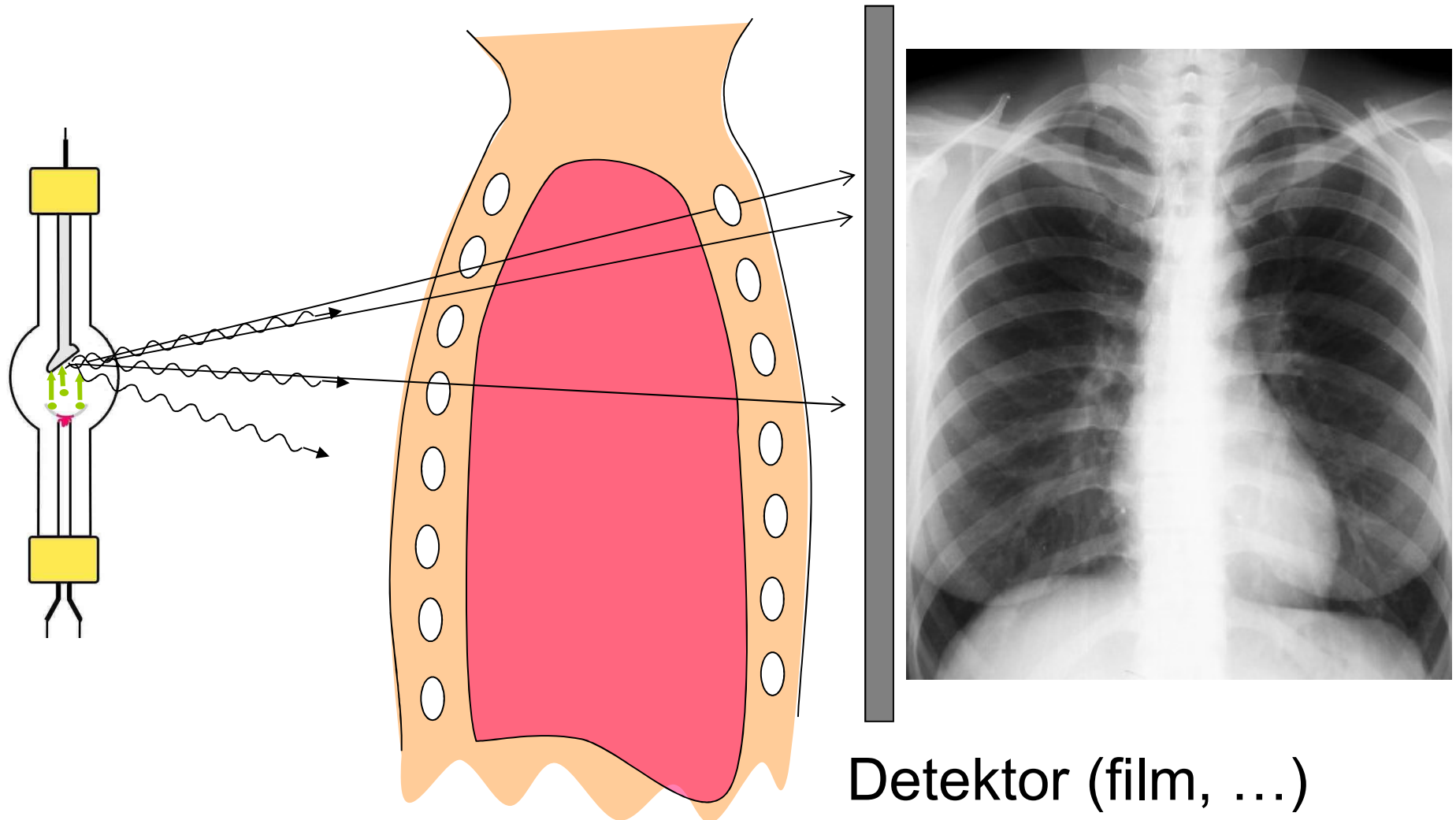
Röntgendiagnostische Verfahren



Tomographisches Bild CT

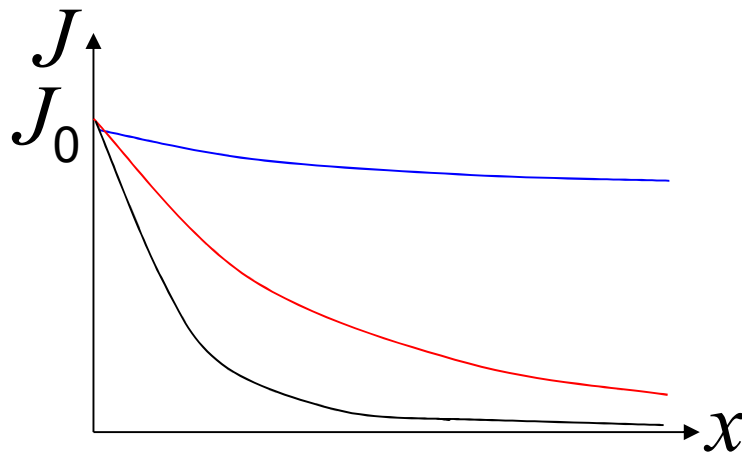
Spezialitäten: Anwendung von Kontrastmitteln,
Digitalisierung, Subtraktion

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 γ -Strahlung

Schwächungsgesetz:

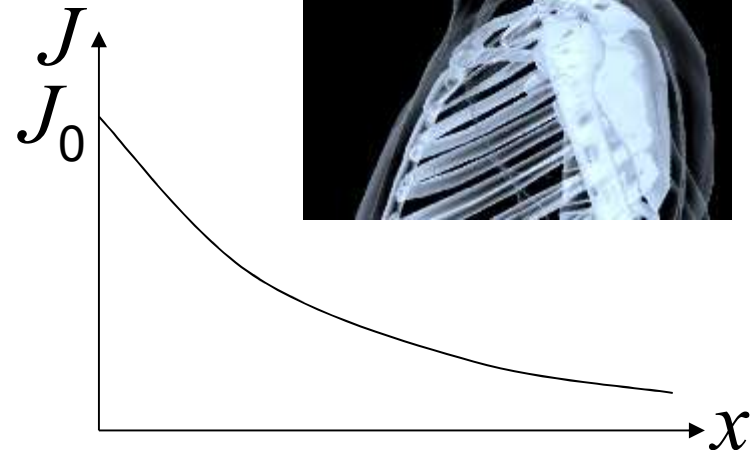
$$J = J_0 \cdot e^{-\mu x}$$

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

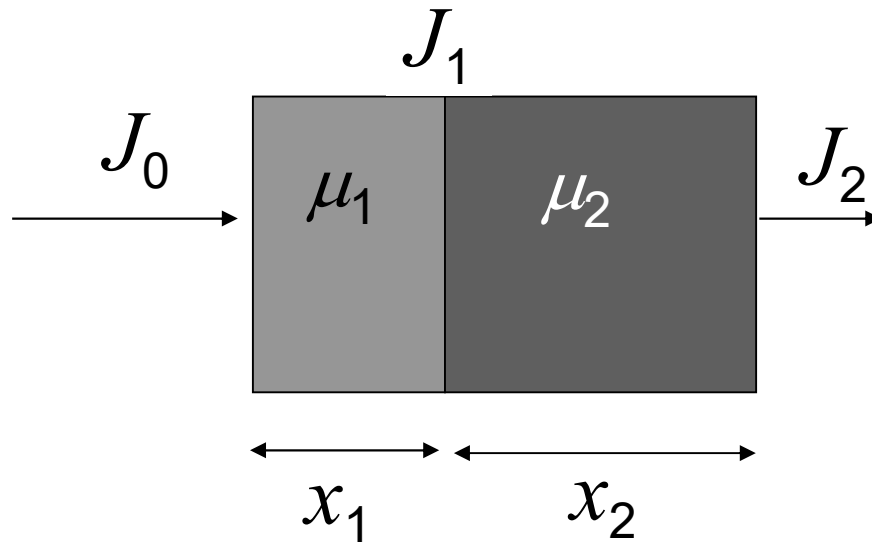
Z

λ oder E_{photon}

Massen-
schwächungs-
koeffizient



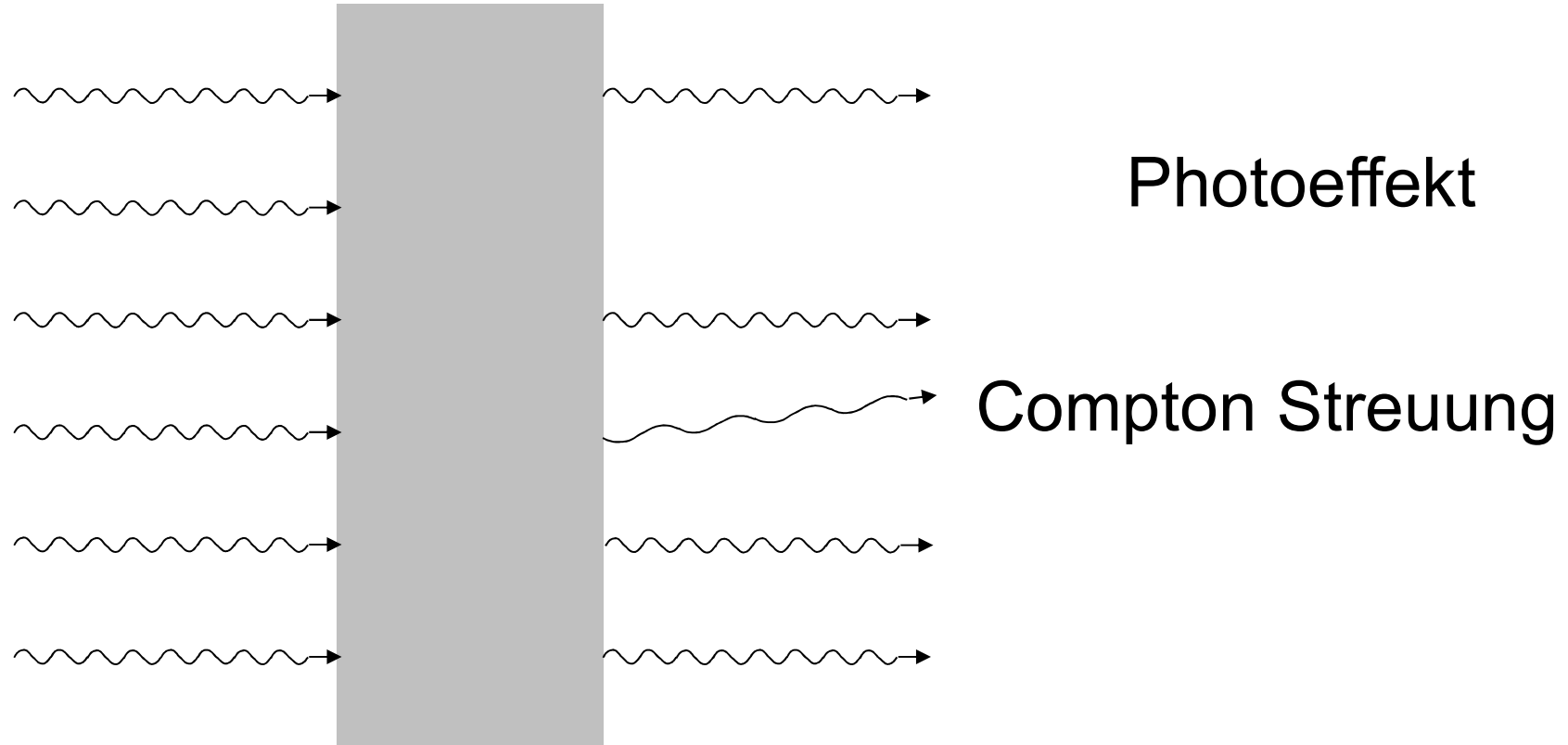
Absorption von inhomogenen Körper



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

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

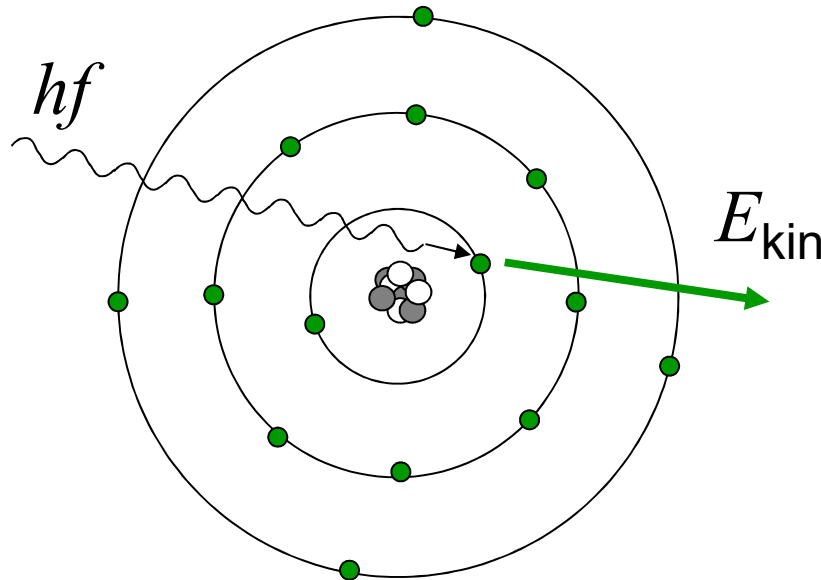
Teilprozesse der Schwächung der Röntgenstrahlung



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

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

Photoeffekt



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

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

starke Z Abhängigkeit!
diagn. Bedeutung!

Beispiel:

10% Z Erhöhung

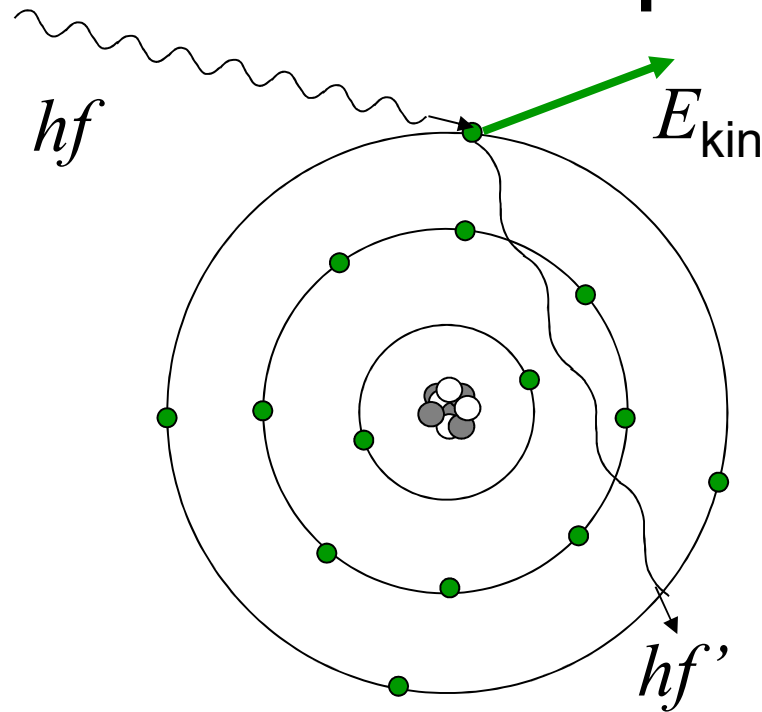
110%=1,1

$1,1^3=1,331$

33% τ_m Erhöhung!

bei weicher Strahlung

Compton Streuung



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

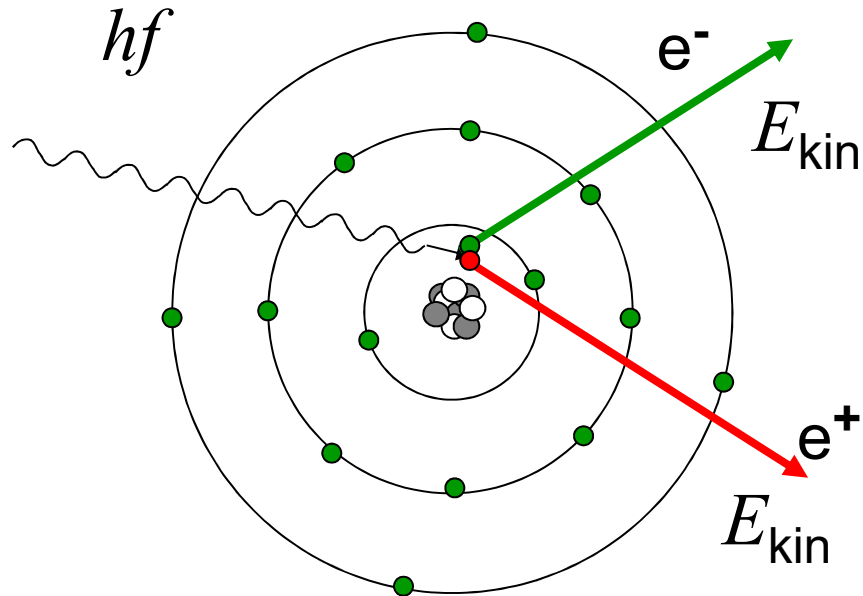
praktisch unabhängig von Z !

zB:

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

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

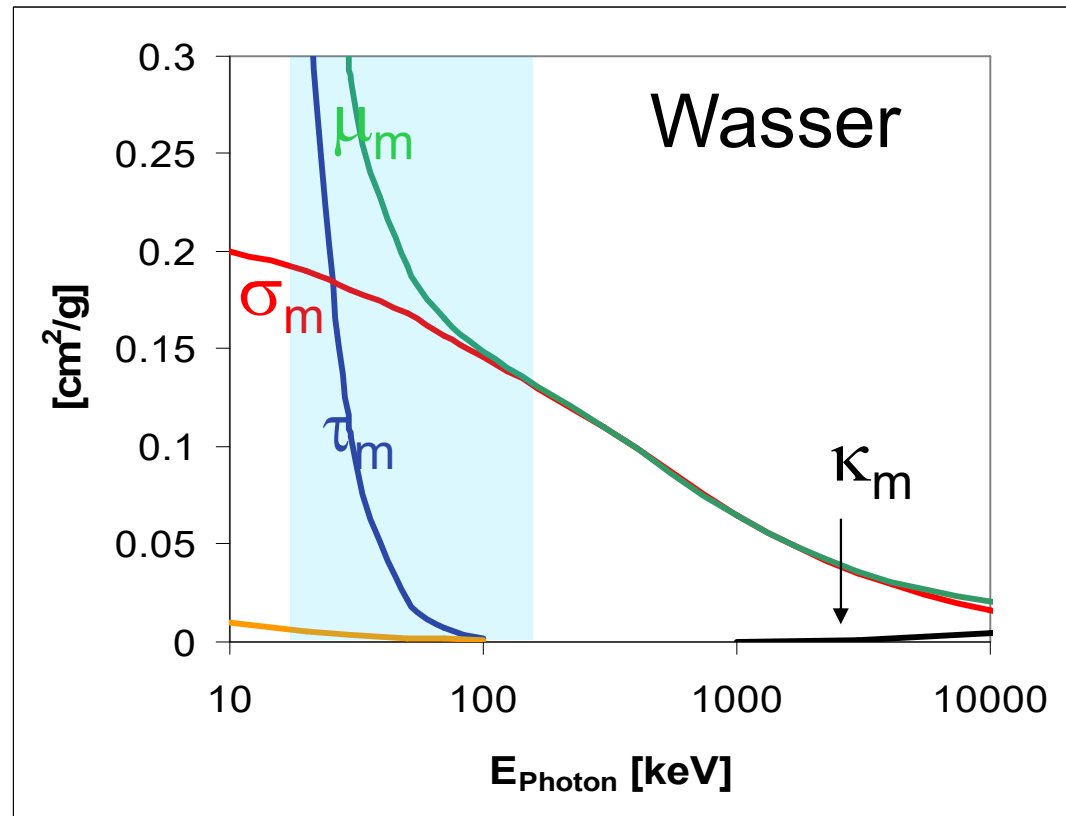
Paarbildung



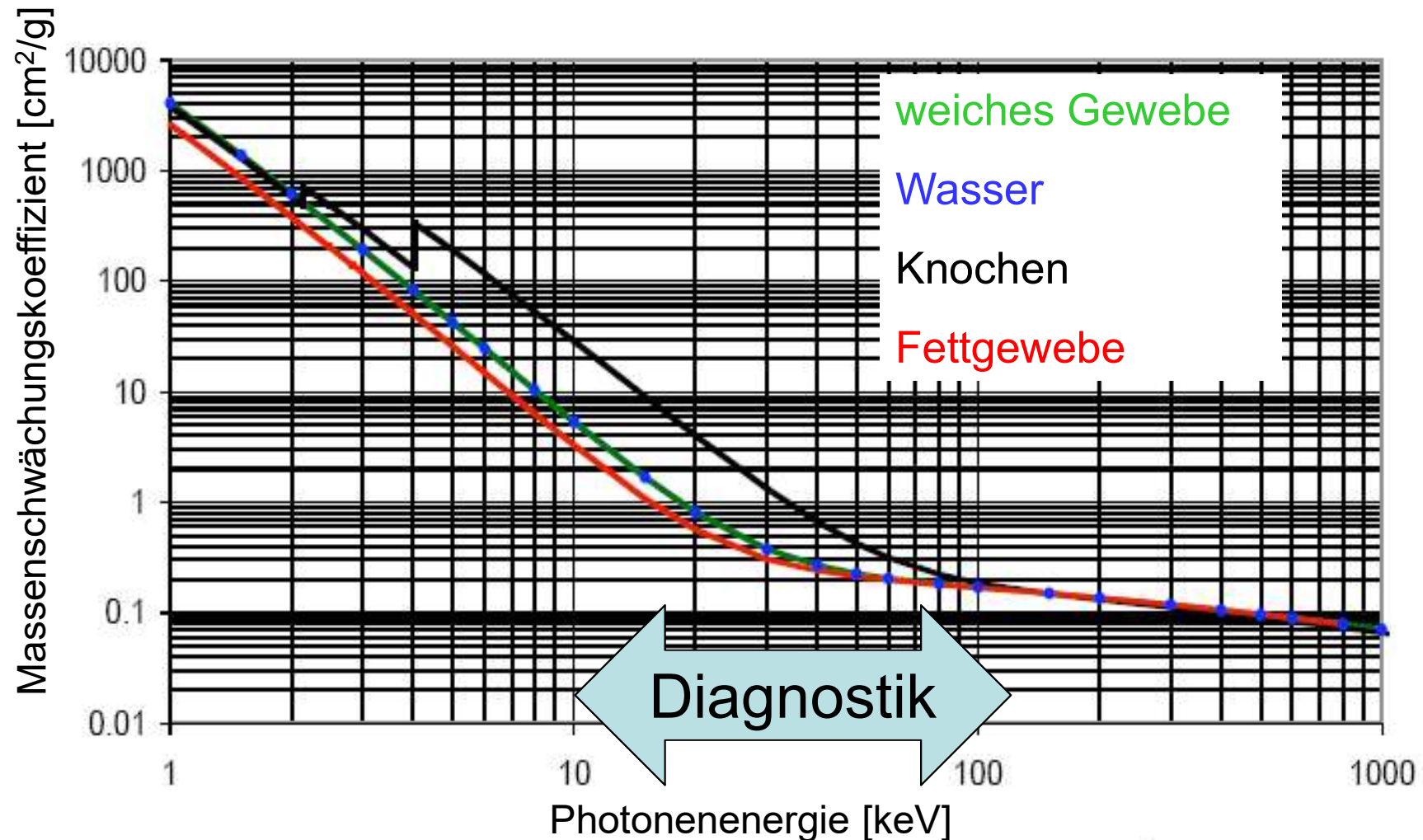
$$hf \geq 2 m_e c^2 \approx 1\text{MeV}$$

nur bei therap. Rtg.
und γ -Strahlung

Photonenenergieabhängigkeit des Schwächungskoeffizienten



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: ≈ 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:

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

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

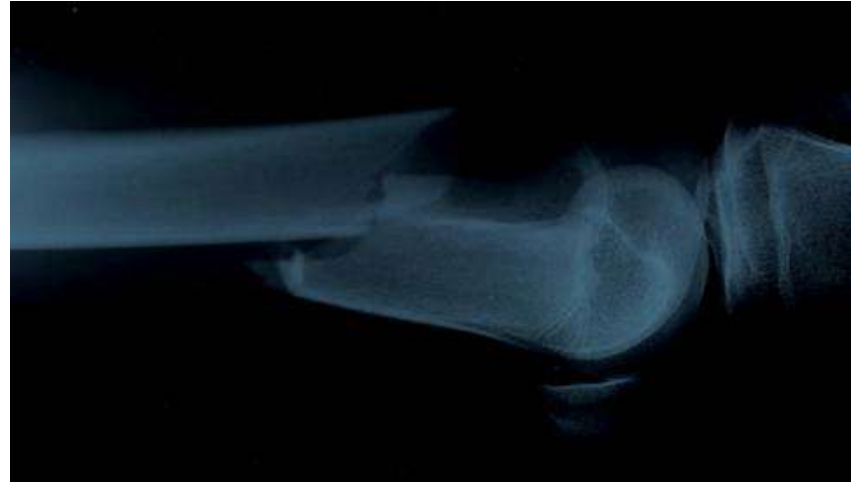
$$\mu = \mu_m \rho$$

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

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

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

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

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

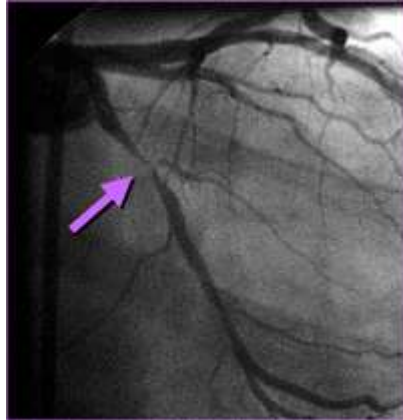
Jod (Z= 53)

Blutgefäß
(Angiographie)

Barium (Z=56)

Magen, Darm
in Form von 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

