

Medizinische Biophysik II.

2023/24 II.

1

Röntgenstrahlung

Erzeugung und Eigenschaften

Physikalische Grundlagen der Röntgendiagnostik

Medizinische Biophysik II.

Röntgenstrahlung I.

I. Allgemein über der Röntgenstrahlung

- 1. Eigenschaften
- 2. Historie

II. Entstehung der Röntgenstrahlung

1. Röntgenröhre

- 2. Bremsstrahlung
 - a) Duane-Hunt Gesetz
 - b) Emmissionsspektrum
 - c) Leistung der Röntgenstrahlung
 - d) Wirkungsgrad der Röntgenröhre

- 3. Charakteristische Röntgenstrahlung
 - a) Entstehung
 - b) Emmissionsspektrum
 - c) Anwendung

III. Physikalische Grundlagen der Röntgendiagnostik

- 1. Schwächung der Röntgenstrahlung
 - a) Schwächungsgesetz
 - b) Absorption der inhomogenen Körper
 - c. Grundprinzip der Summationsaufnahmen

- 2. Teilprozesse der Schwächung der Röntgenstrahlung
 - a) Photoeffekt
 - b) Compton Effekt
 - c) (Paarbildung)
 - d) Photonenenergabhängigkeit...
 - e) Effektive Ordnungszahl

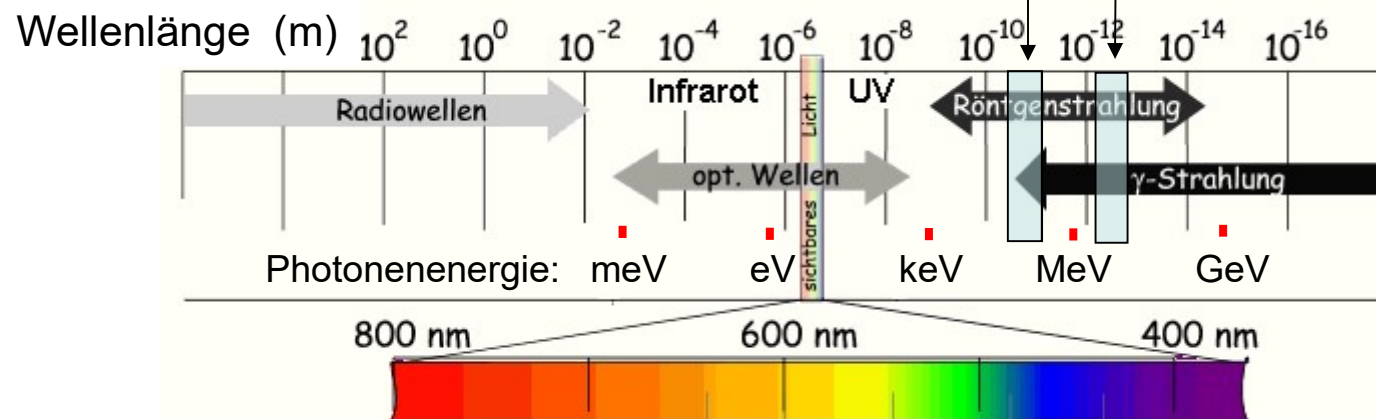
3. Kontrast des Röntgenbildes

4. Kontrastmittel

I. Allgemein über der Röntgenstrahlung

1. Eigenschaften der Röntgenstrahlung

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



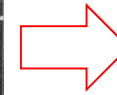
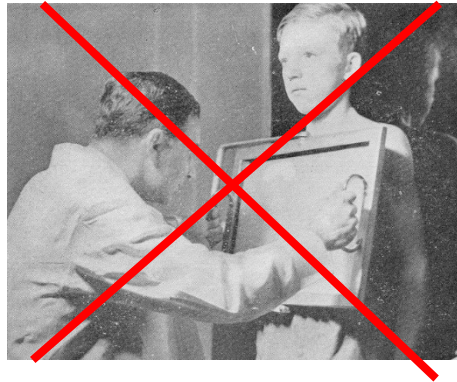
- Wirkungen:

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

- Entstehung: in der Elektronenhülle

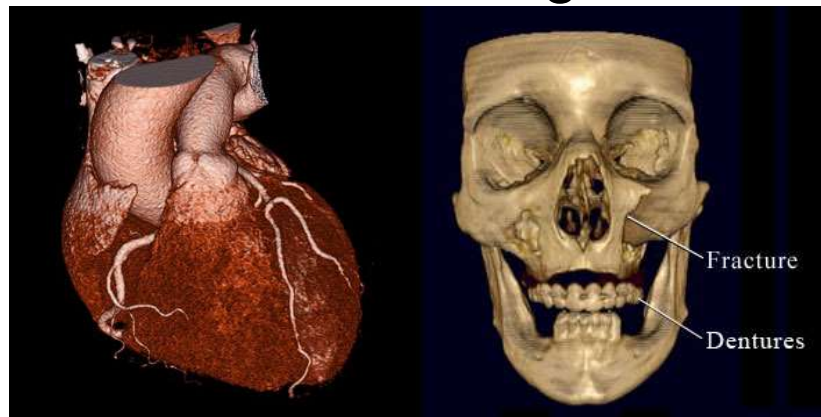
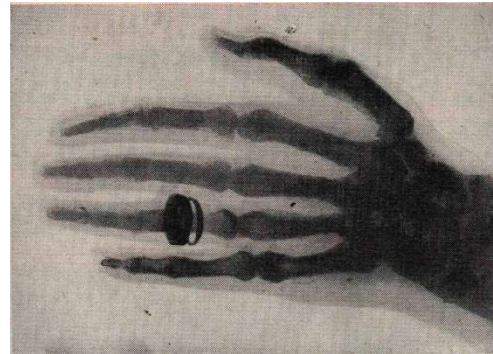
- Typen

- Bremsstrahlung
- charakteristische Strahlung



2. Kurze Historie der Röntgenstrahlung

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



II. Entstehung der Röntgenstrahlung

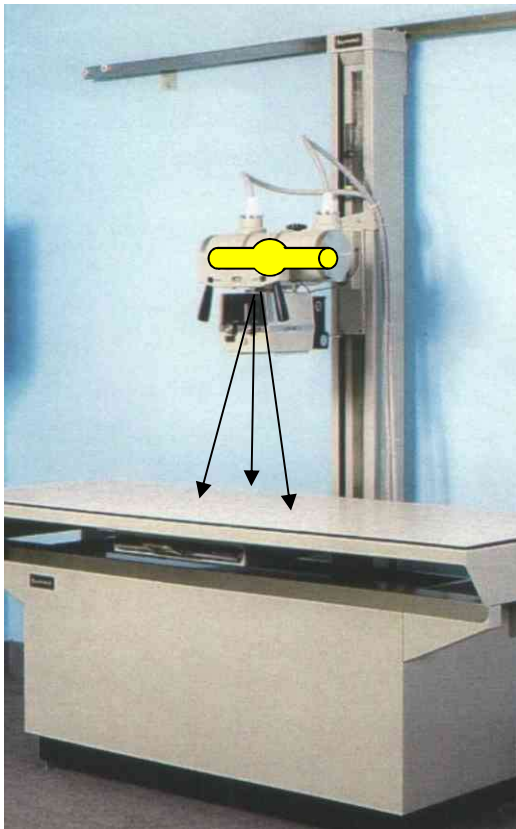
Röntgenstrahlung Entsteht wenn
hochenergetische (beschleunigte)
geladene Teilchen ihre Energie abgeben.

Elektronen E_{kin}

Röntgenröhre (Diagnostik)
Teilchenbeschleuniger (Therapie)

Geräte zur Erzeugung der Röntgenstrahlung:

Röntgenröhre



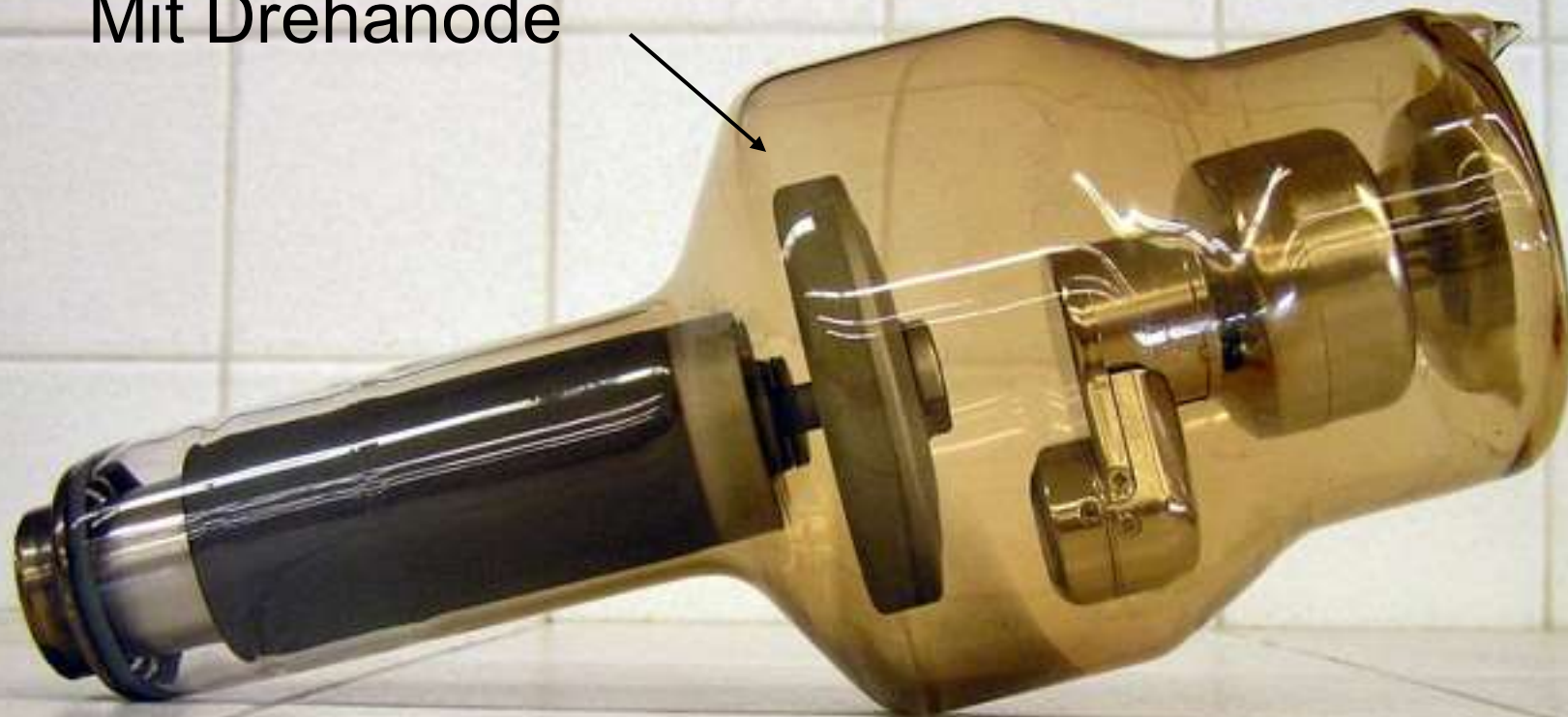
Teilchenbeschleuniger



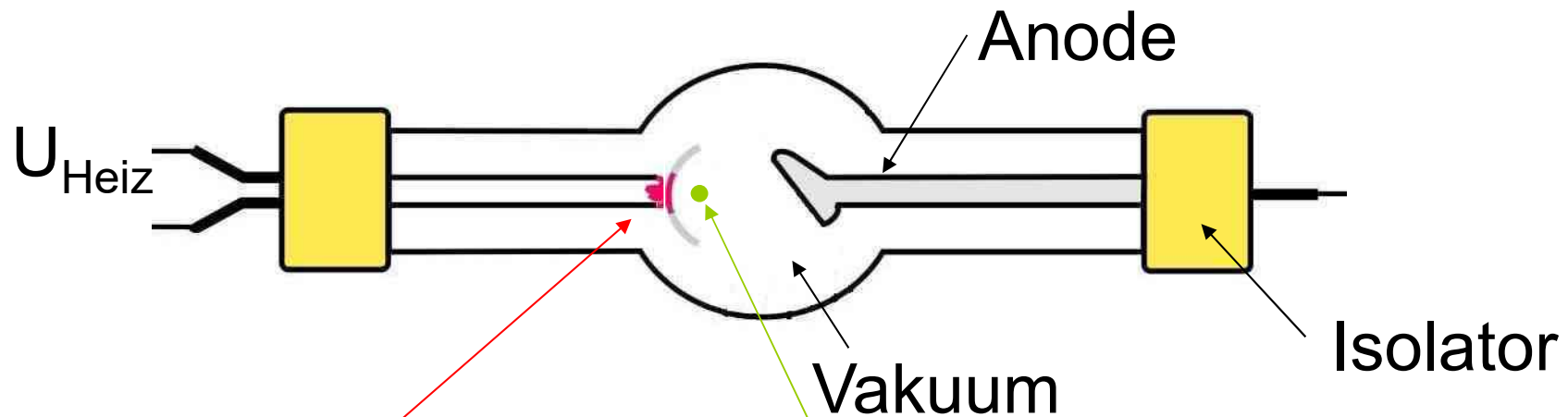




Mit Drehanode



1. Die Röntgenröhre

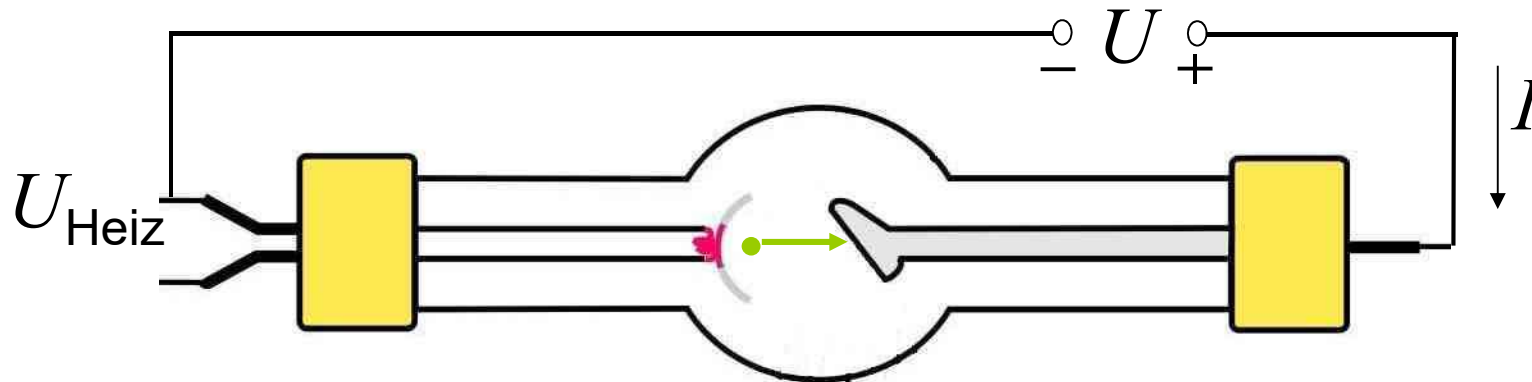


Heizkathode: Heizung (T Erhöhung) \Rightarrow Erhöhte thermische Energie \Rightarrow **Elektronen** treten aus der Kathode aus.

(Glühelektrischer Effekt)



Die Röntgenröhre



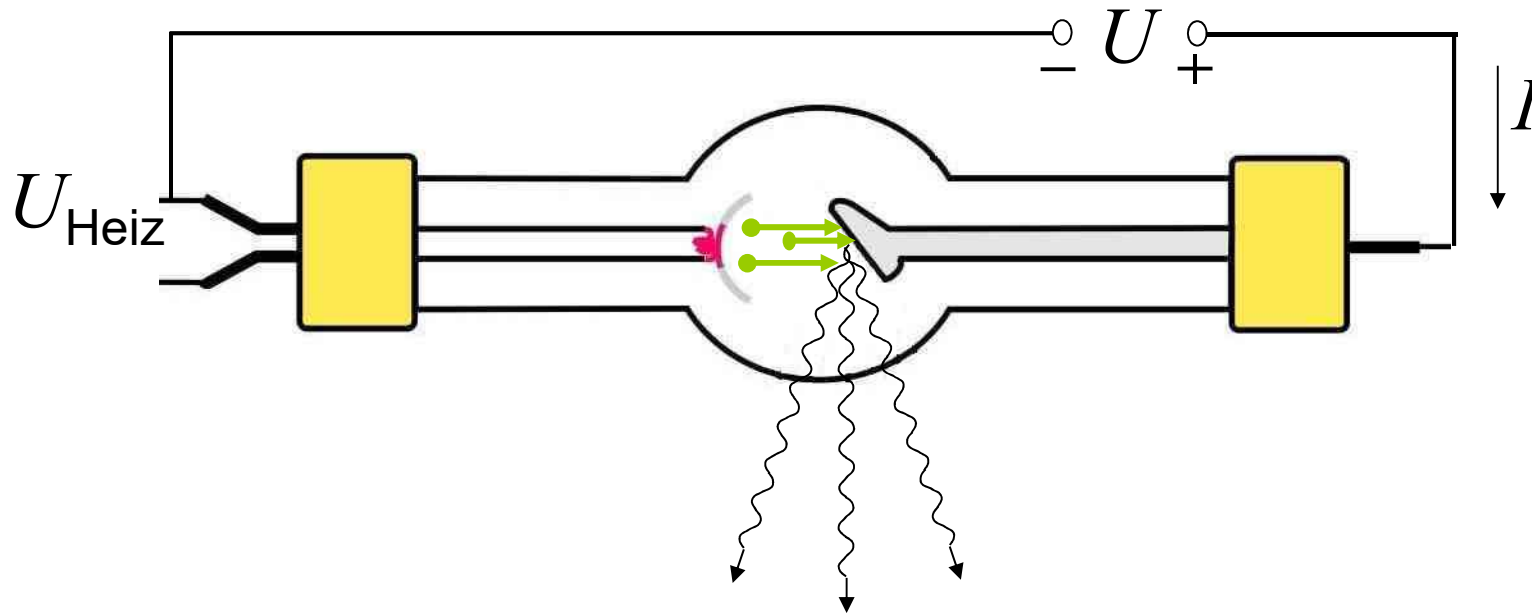
Anodenspannung(U) (typisch 30-200 kV):
beschleunigt die Elektronen

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

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

kinetische Energie
des beschleunigten Elektrons

Die Röntgenröhre



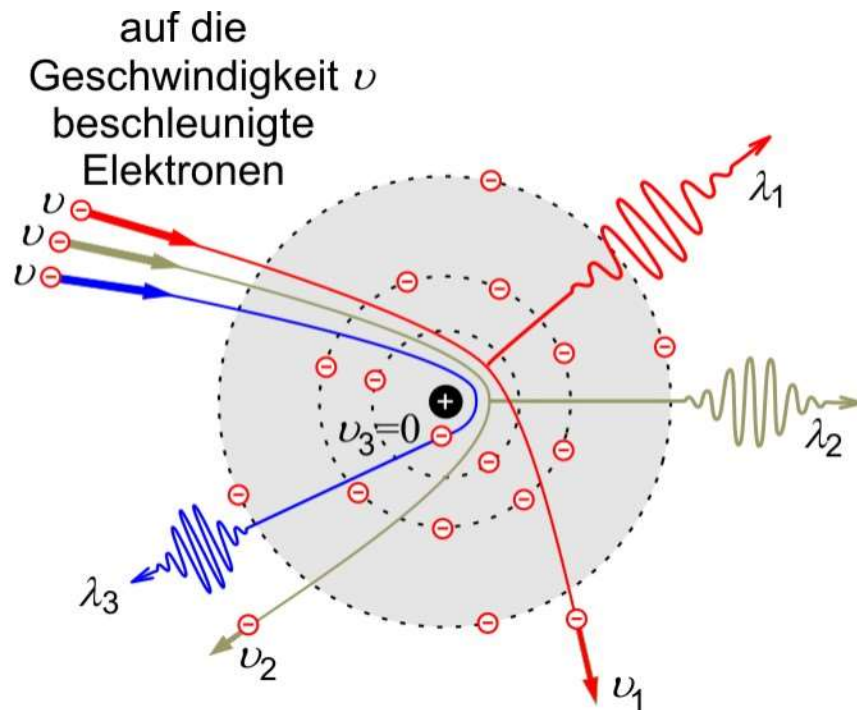
Röntgenstrahlung entsteht wenn die beschleunigten Elektronen auf die Anode prallen.

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

2. Bremsstrahlung

a) Duane-Hunt Gesetz

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



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

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

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

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

Duane-Hunt Gesetz

Grenzwellenlänge:

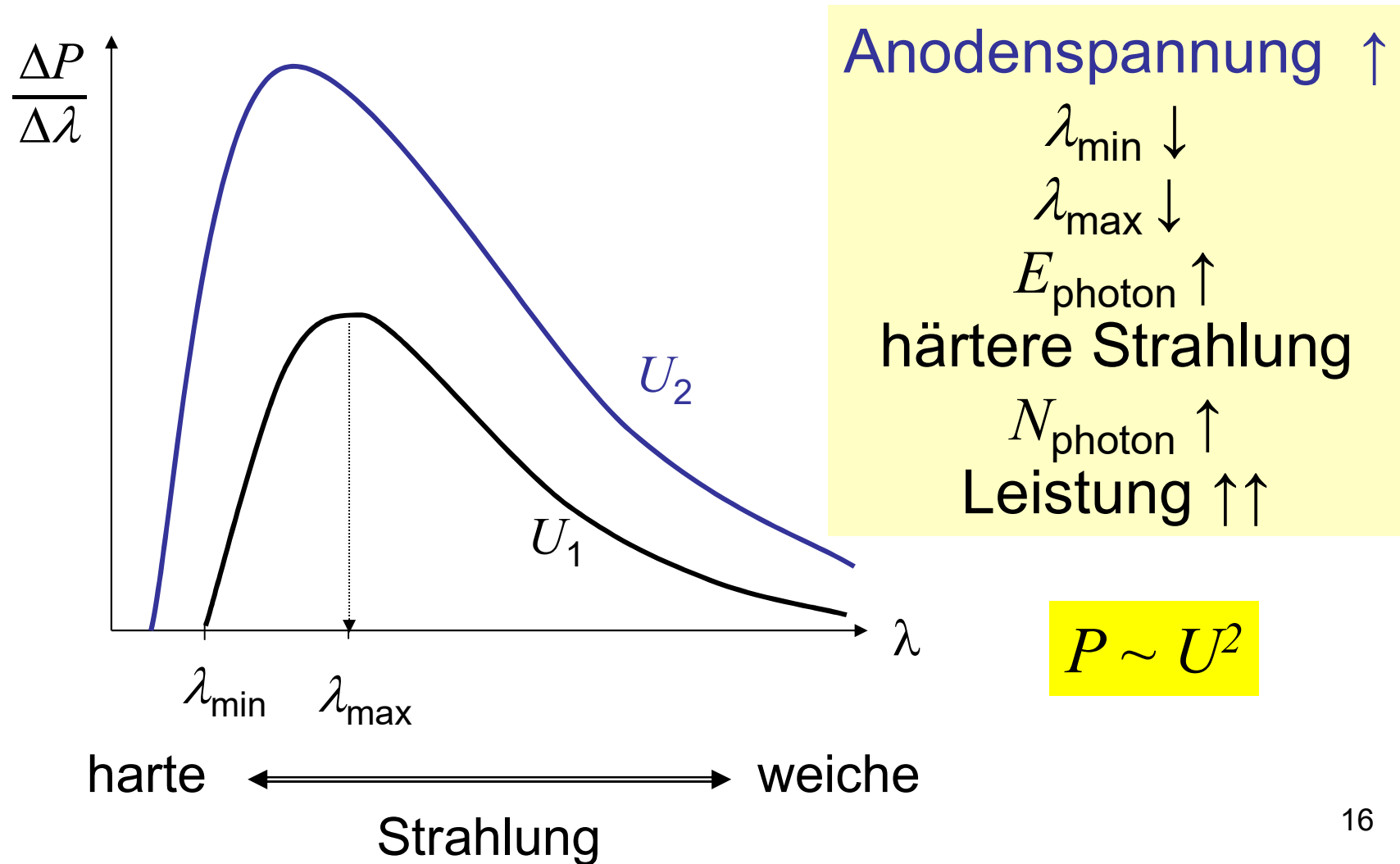
$$\lambda \geq \frac{hc}{U_e} = \lambda_{\min}$$

Konst.

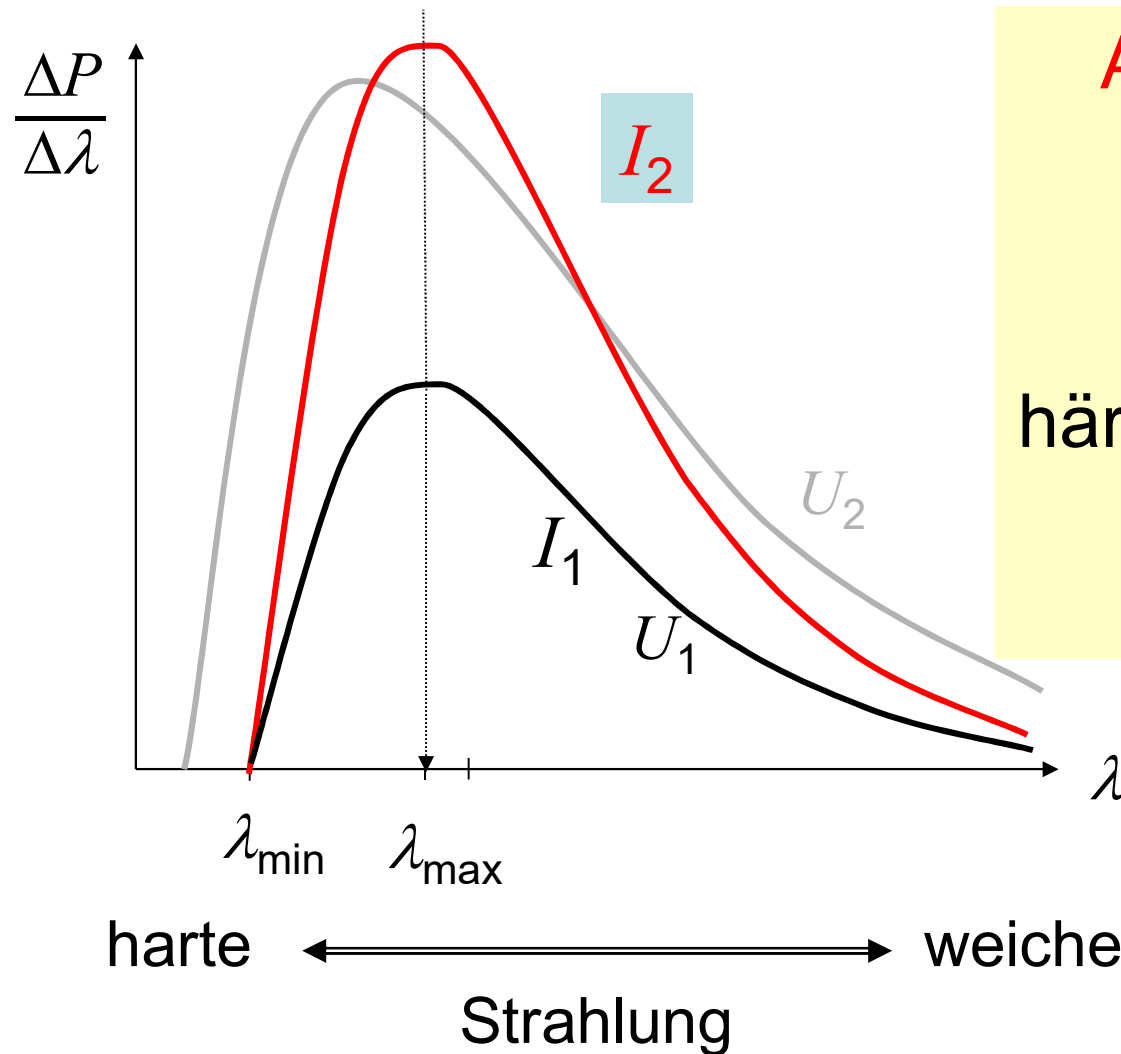
$$\lambda_{\min} = \frac{1240 \text{ kV} \cdot \text{pm}}{U}$$

nicht SI
aber praktische
Einheit

b) Emissionsspektrum der Bremsstrahlung



Emissionsspektrum der Bremsstrahlung



Anodenstrom \uparrow

$\lambda_{\min} \rightarrow$

$\lambda_{\max} \rightarrow$

$E_{\text{photon}} \rightarrow$

härte d. Strahlung \rightarrow

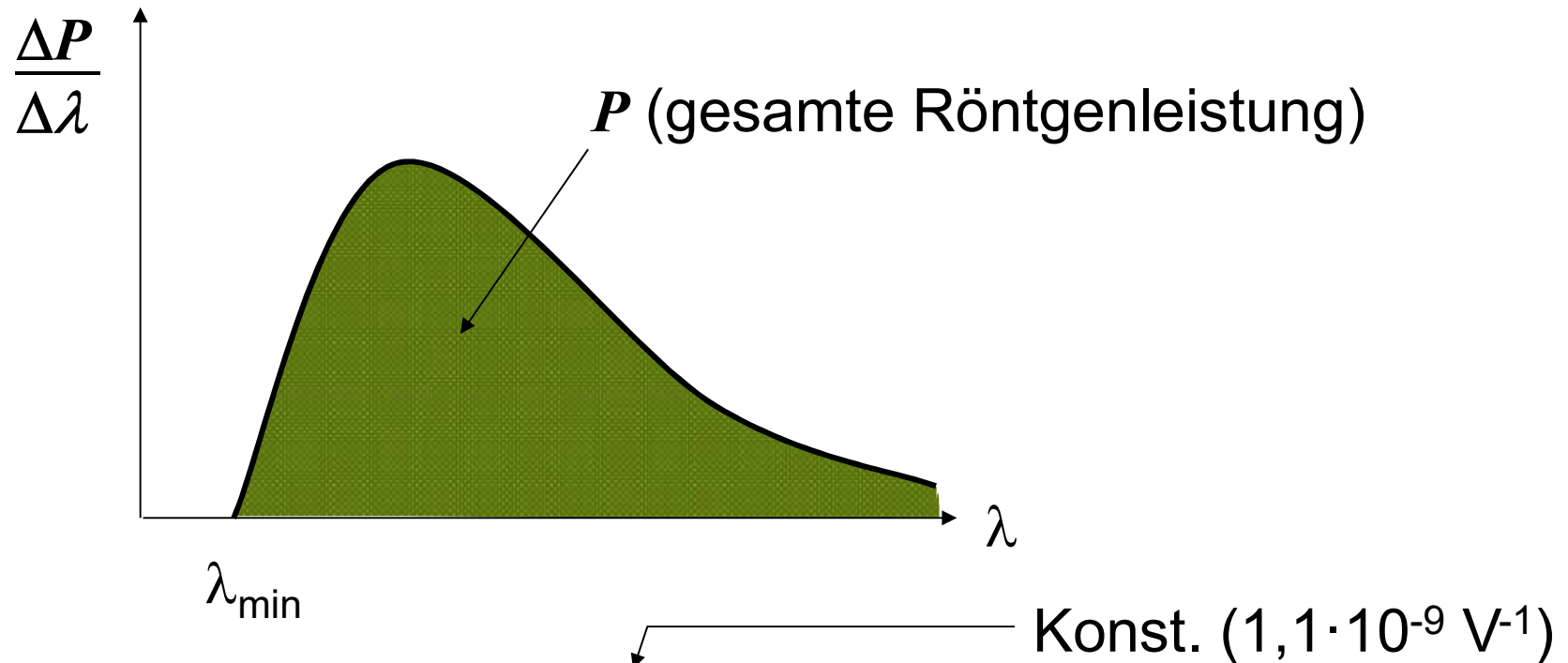
$N_{\text{photon}} \uparrow$

Leistung \uparrow

$$P \sim I$$

~~Ohm~~

c) Leistung der Röntgenstrahlung



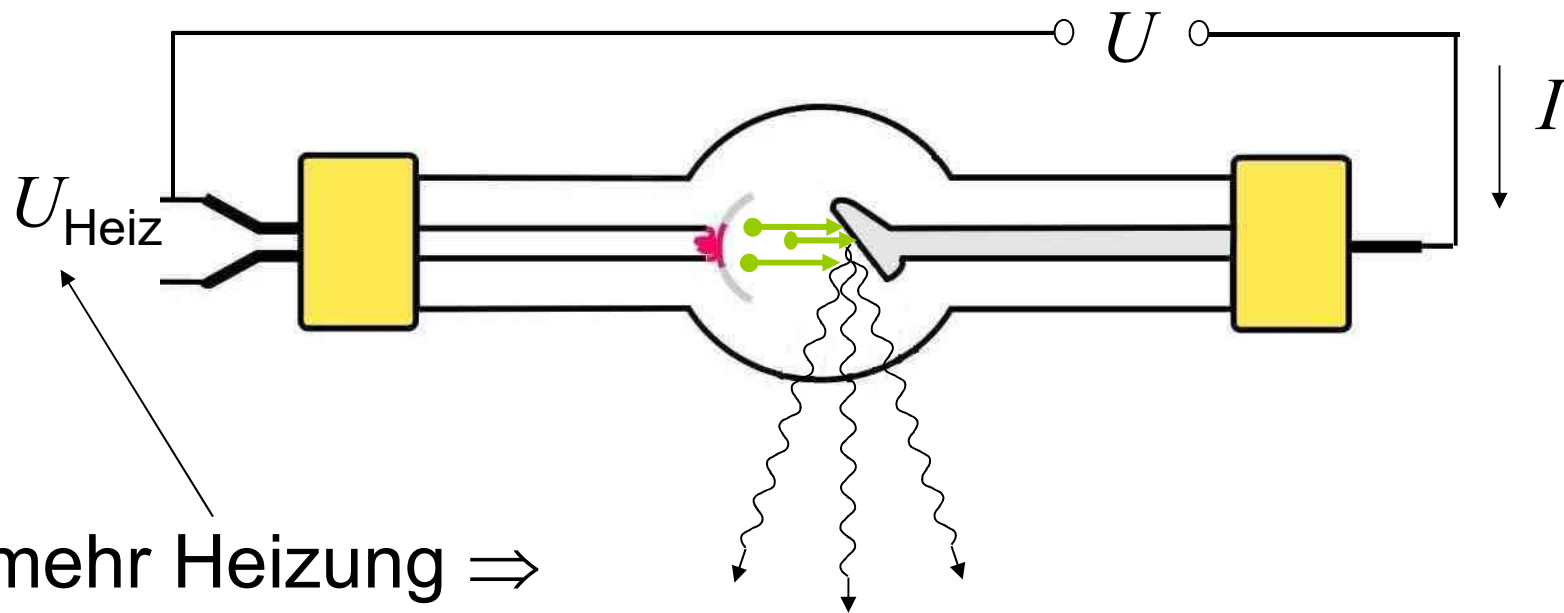
$$P = c_{\text{Rtg}} \cdot U^2 \cdot I \cdot Z$$

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

Anodenspannung Anodenstromstärke Ordnungszahl
des Anodenmaterials

Leistung der Röntgenstrahlung

Regulierung der Anodenstromstärke



mehr Heizung \Rightarrow

mehr Elektronen treten aus \Rightarrow

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

d) 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 η : 1% **99% Wärme!**

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

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

Auch Kühlung der Anode ist notwendig!

Drehanode-Röntgenröhre

Hohe Rtg-Leistung
ist erreichbar !

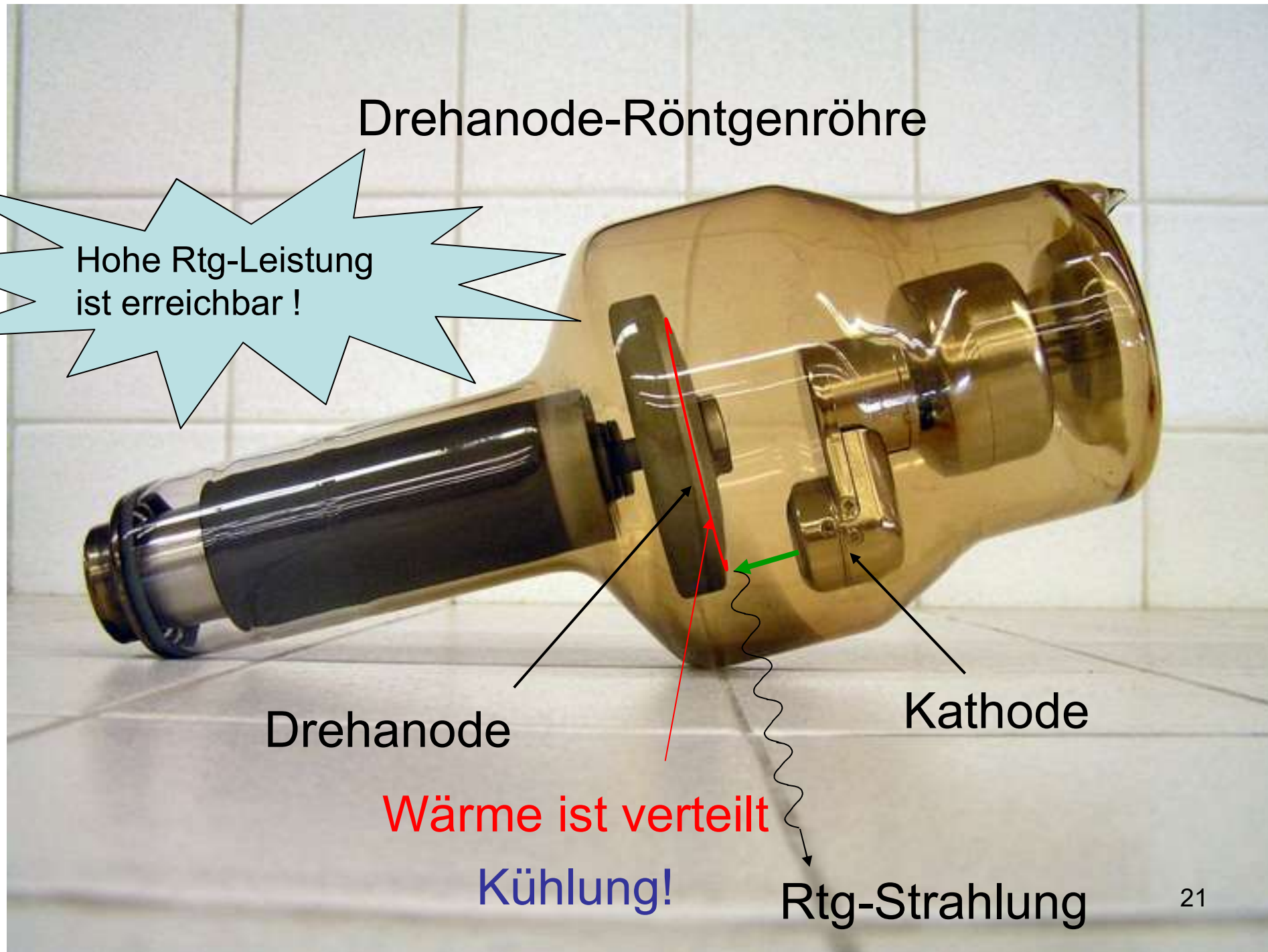
Drehanode

Kathode

Wärme ist verteilt

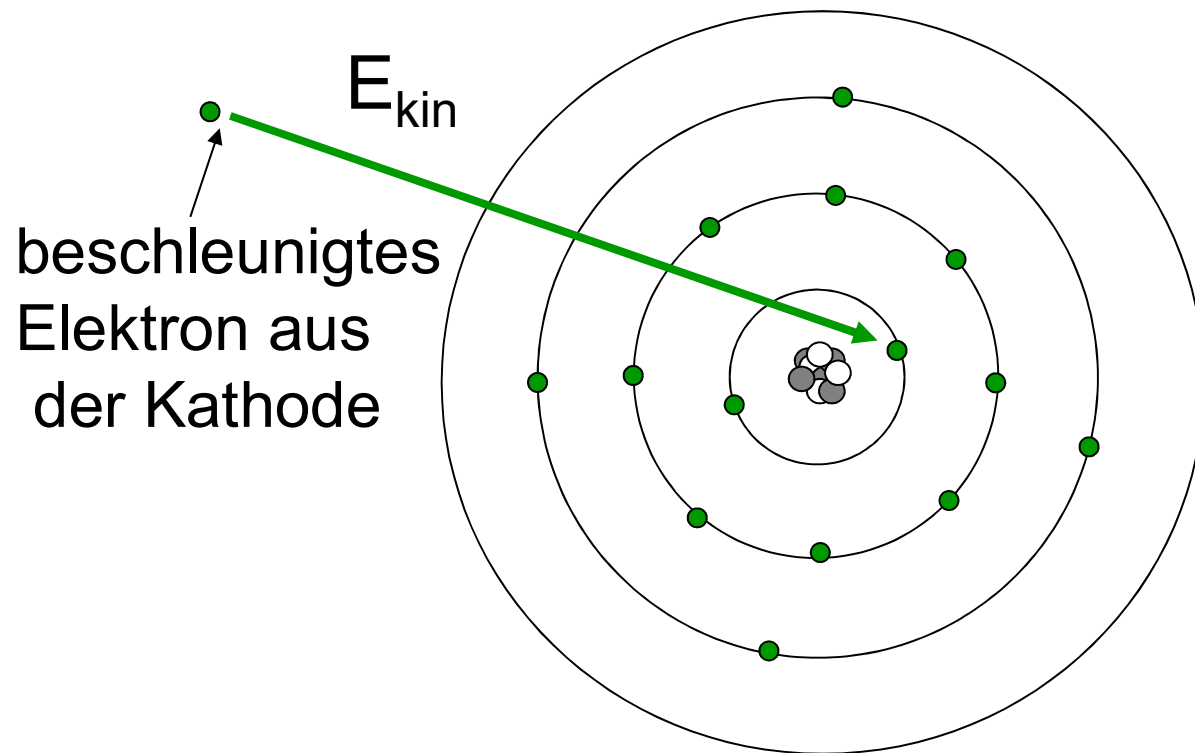
Kühlung!

Rtg-Strahlung



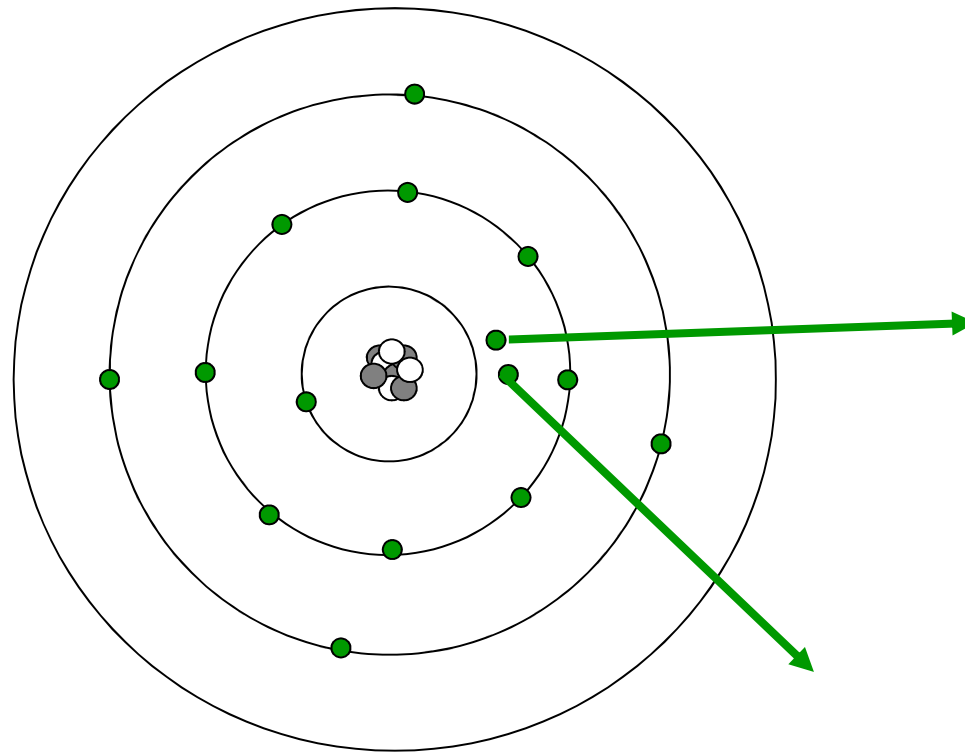
3. Charakteristische Röntgenstrahlung

a) Entstehung



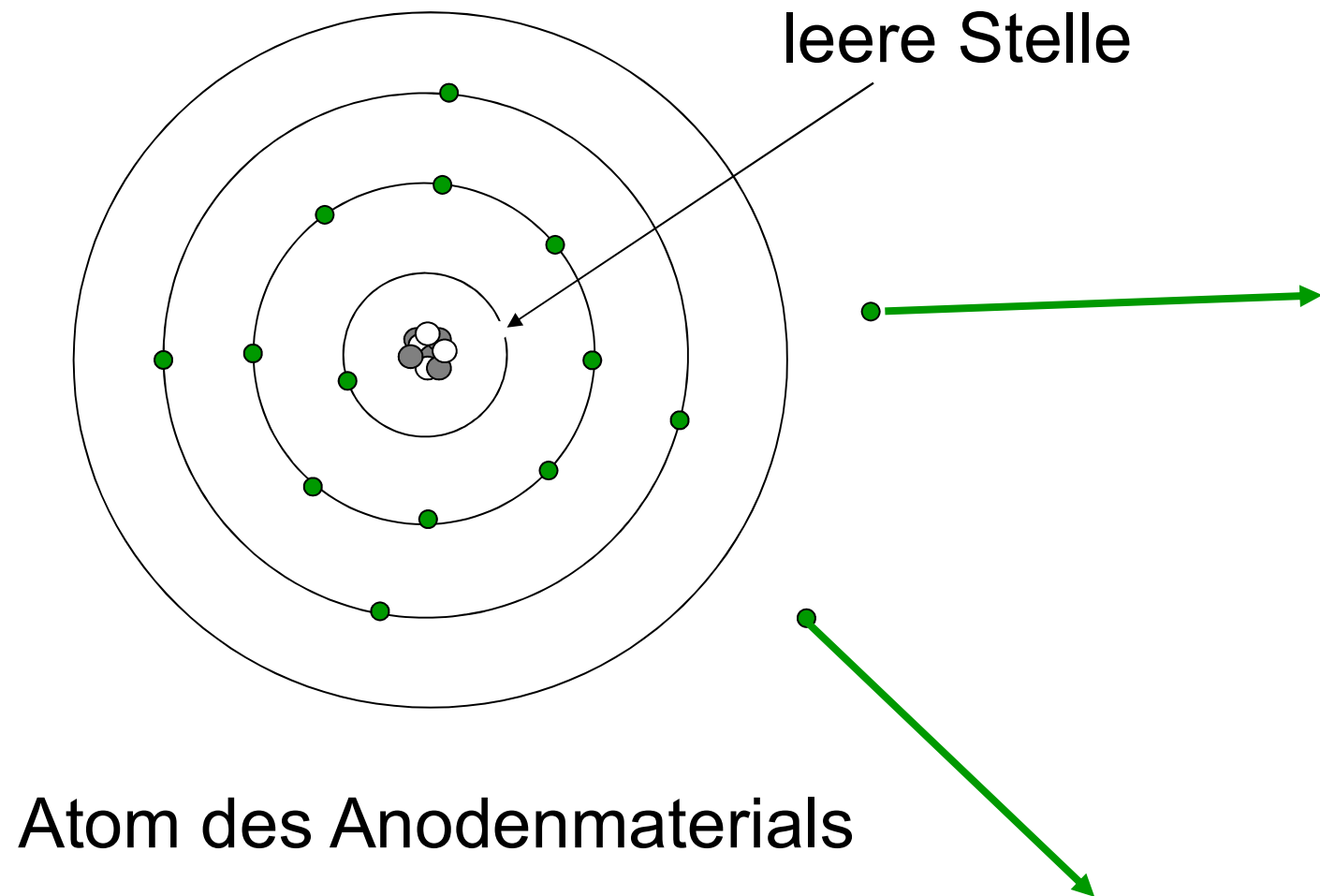
Atom des Anodenmaterials

Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung



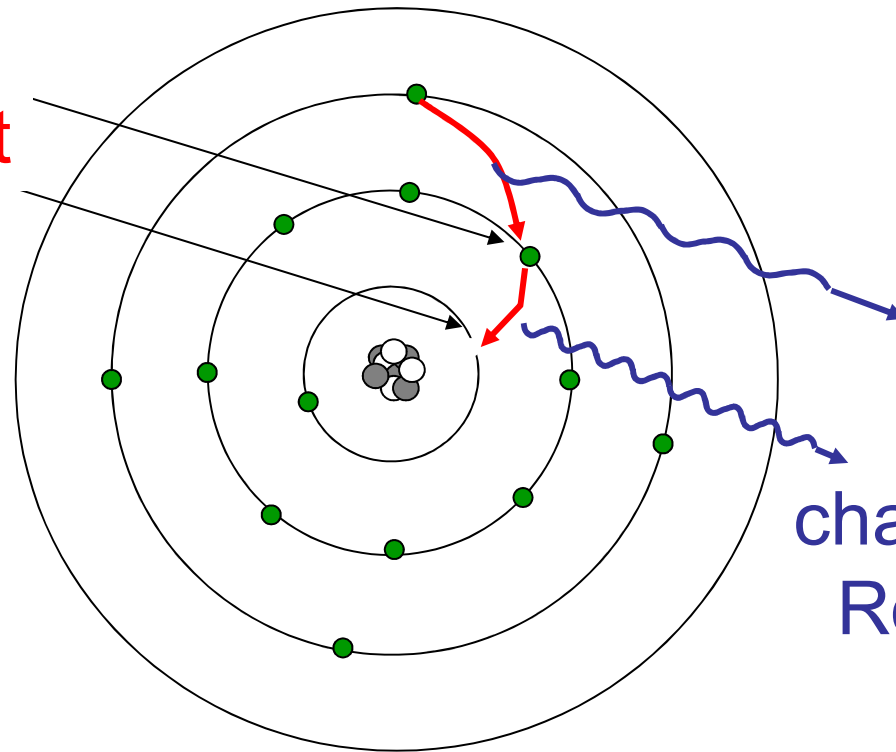
Atom des Anodenmaterials

Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung



Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung

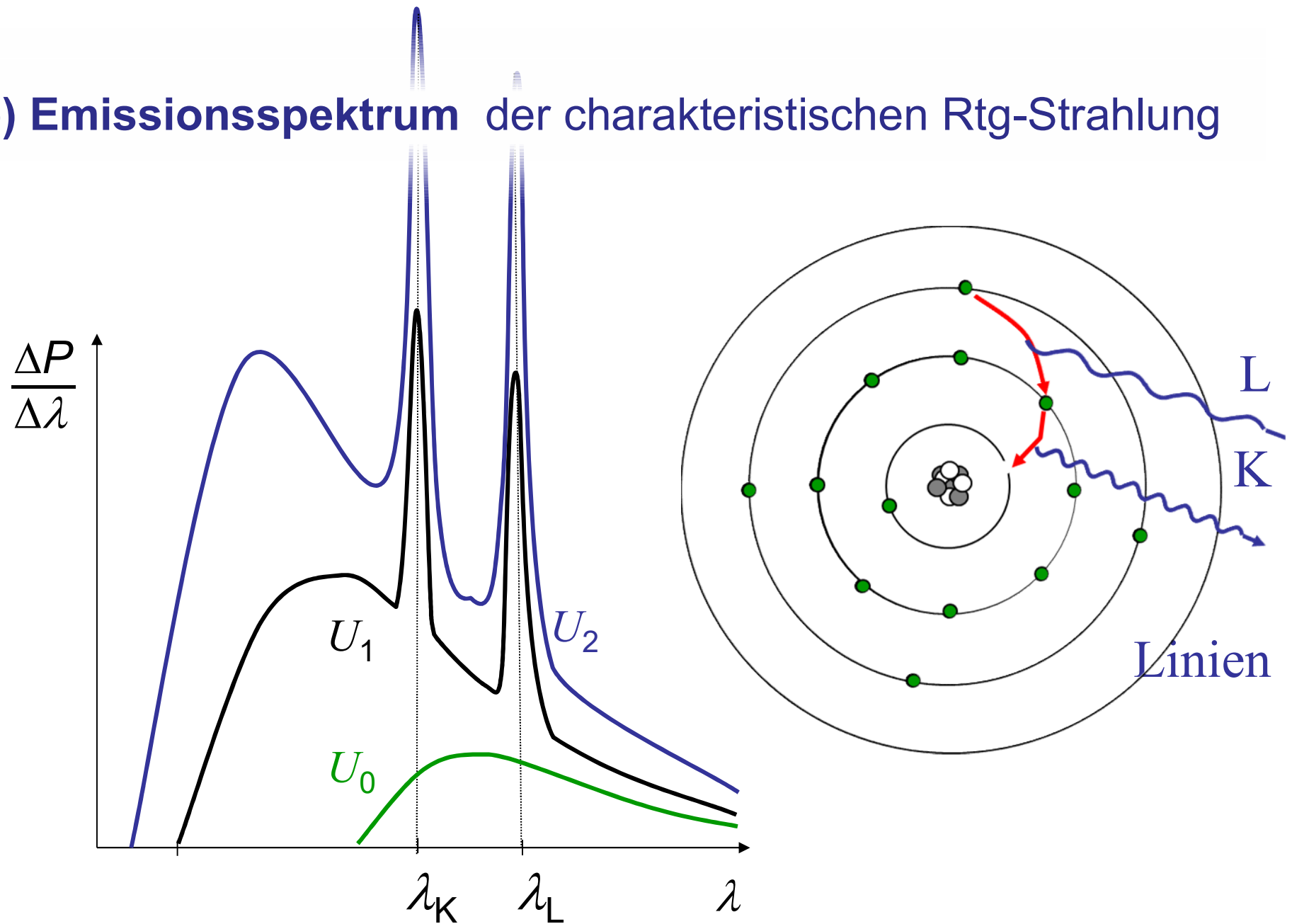
leere Stellen
werden gefüllt



charakteristisches
Röntgenphoton
 $hf = \Delta E$

Atom des Anodenmaterials

b) Emissionsspektrum der charakteristischen Rtg-Strahlung



c) Anwendung der charakteristischen Röntgenstrahlung

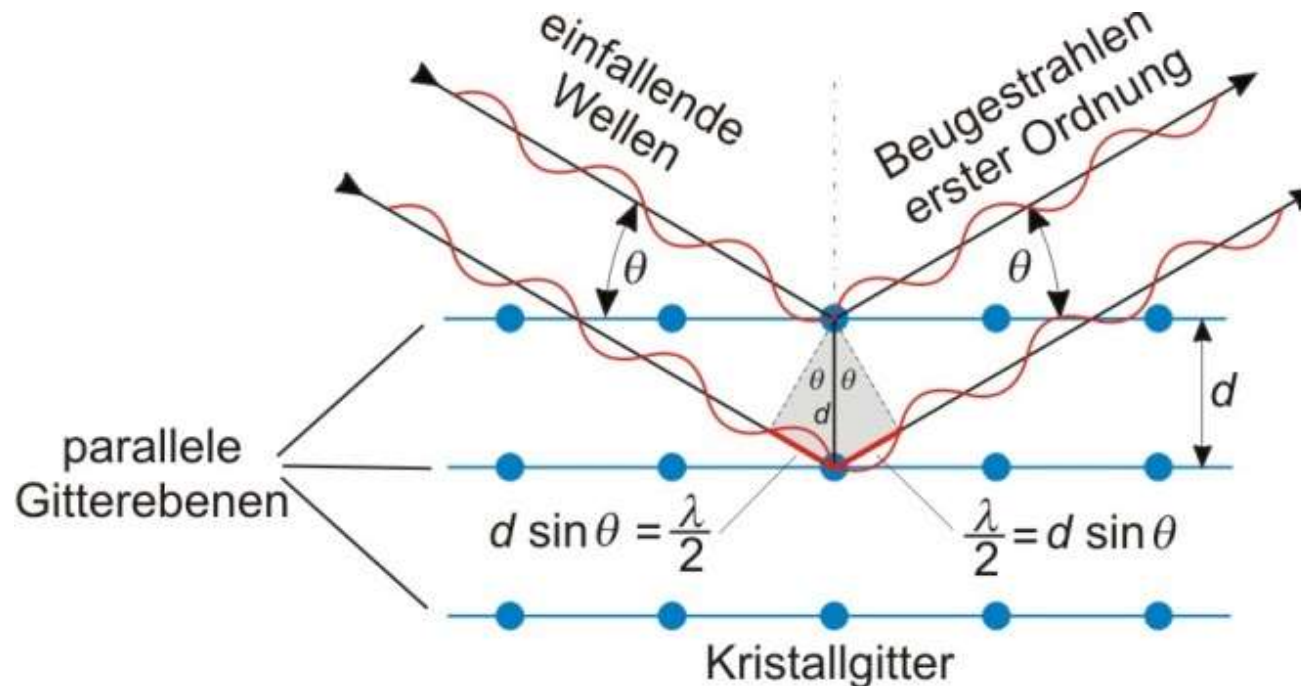
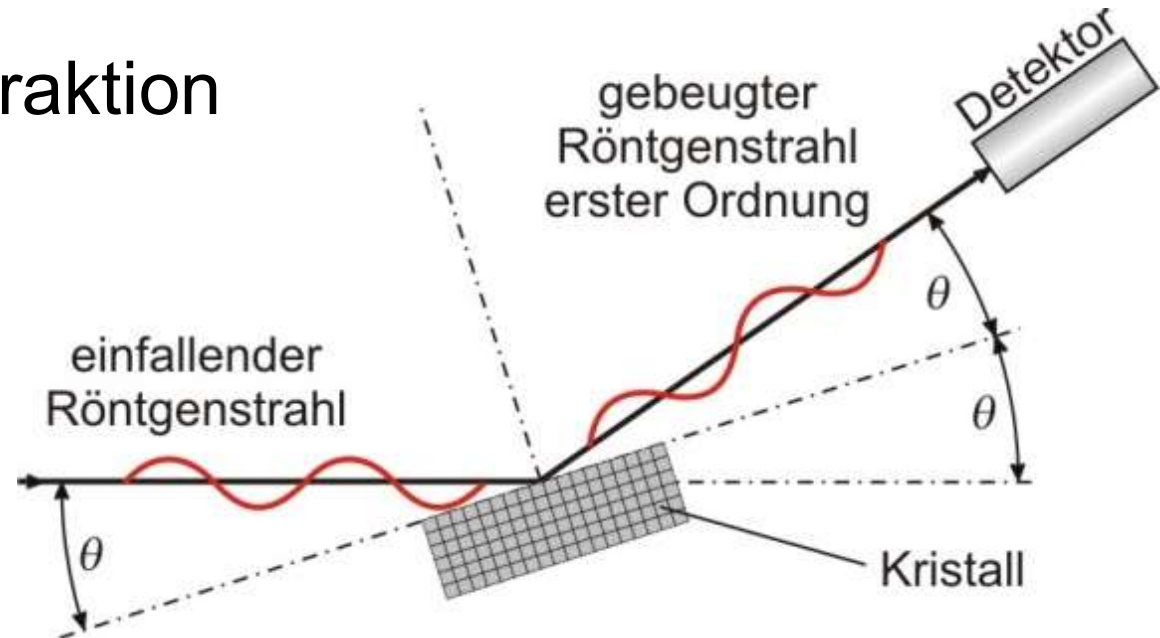
fast monochromatische Röntgenstrahlung

-Diagnostik (zB.: Mammographie)

-Strukturanalyse der Materie (Röntgenbeugung)

Umweg: Röntgendiffraktion

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

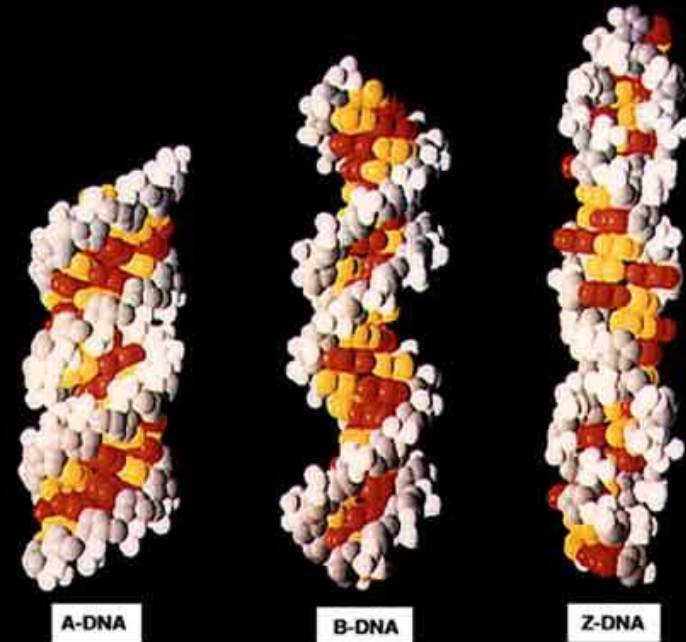
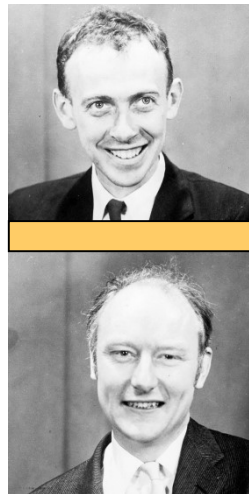
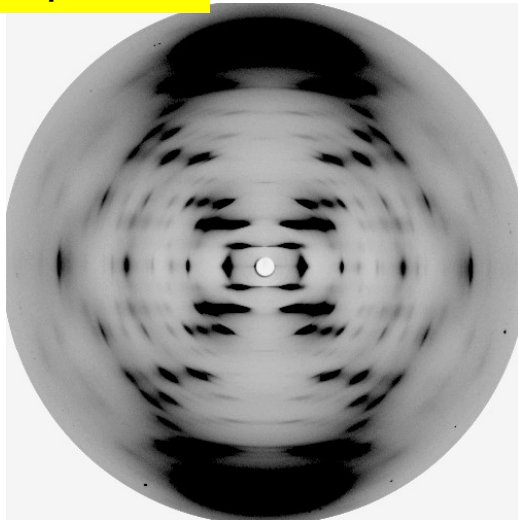


Bragg-Gleichung:

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

Beispiele:

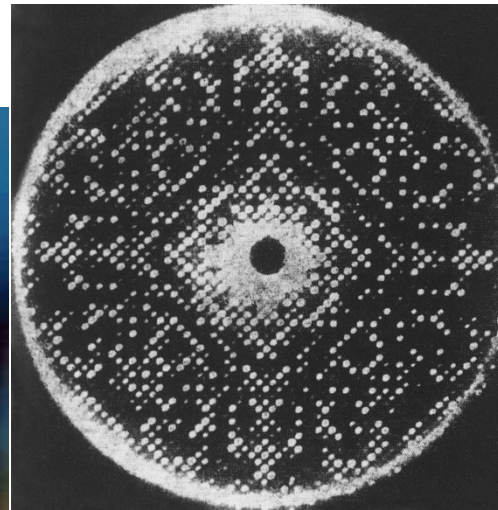
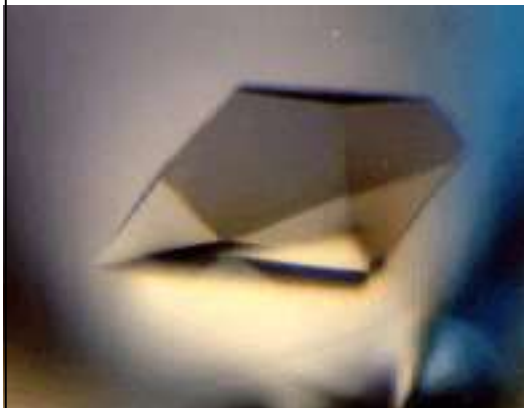
DNA



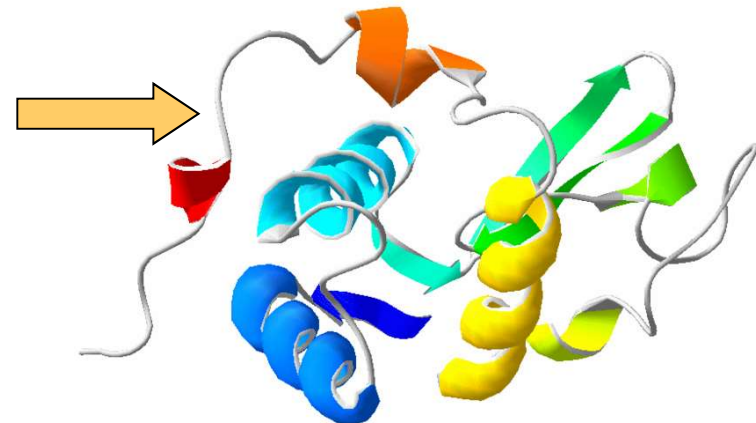
Proteine z.B.:
Lysozyme

Diffractionsbild

Protein-Kristall



Dreidimensionale Struktur



PDB Database: dreidimensionale Makromolekülstrukturen meistens mit Hilfe der Röntgendiffraktion bestimmt

https://www.rcsb.org

RCSB PDB Deposit Search Visualize Analyze Download Learn About Documentation Careers COVID-19 MyPDB Contact us

RCSB PDB PROTEIN DATA BANK

215,684 Structures from the PDB
1,068,577 Computed Structure Models (CSM)

3D Structures ? Enter search term(s), Entry ID(s), or sequence Include CSM ?

Advanced Search | Browse Annotations Help

PDB-101 wwPDB EMDDataResource NAKB wwPDB Foundation PDB-Dev

Access Computed Structure Models (CSMs) of all available model organisms Learn more

Welcome

Deposit Search Visualize Analyze Download Learn

RCSB Protein Data Bank (RCSB PDB) enables breakthroughs in science and education by providing access and tools for exploration, visualization, and analysis of:

- Experimentally-determined 3D structures from the **Protein Data Bank (PDB)** archive
- Computed Structure Models (CSM)** from AlphaFold DB and ModelArchive

These data can be explored in context of external annotations providing a structural view of biology.

Explore NEW Features

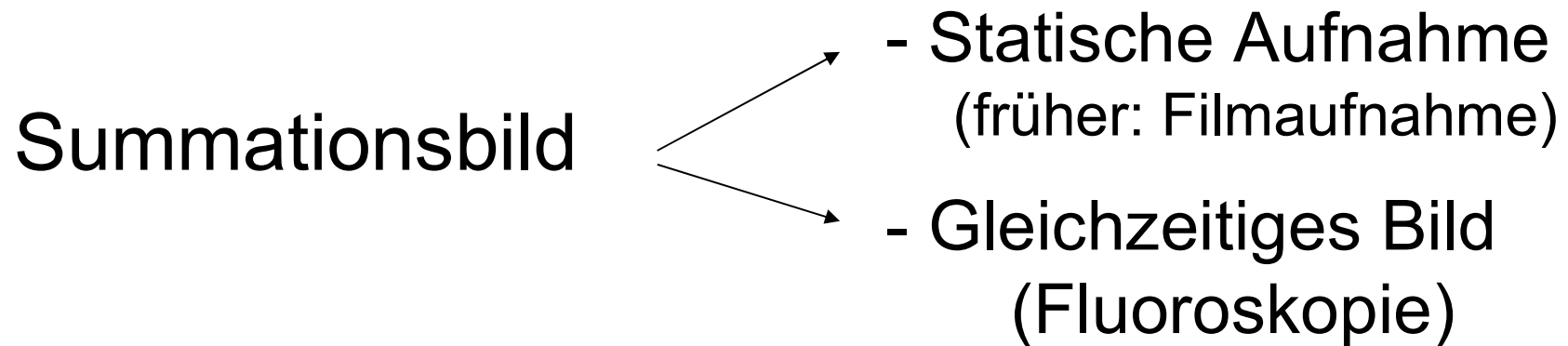
PDB-101 Training Resources

February Molecule of the Month

Nanowires

III. Physikalische Grundlagen der Röntgendiagnostik

Röntgendiagnostische Verfahren



Spezialitäten: Anwendung von Kontrastmitteln,
Digitalisierung, Substraktion

1. Schwächung der Röntgenstrahlung

a) Schwächungsgesetz

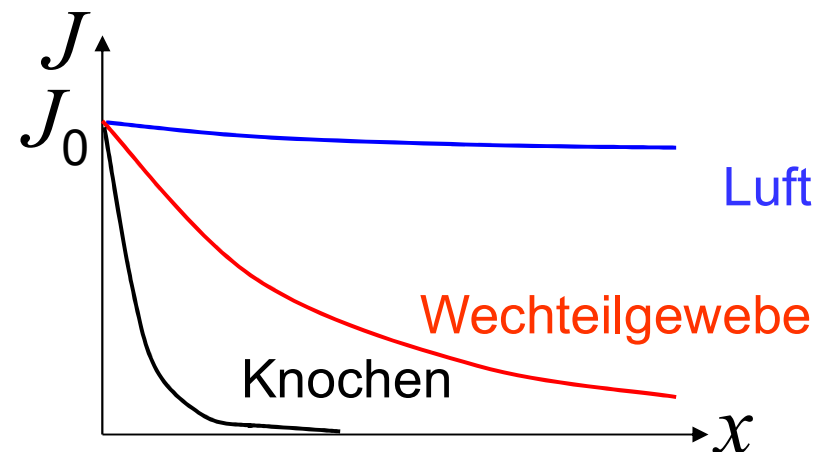
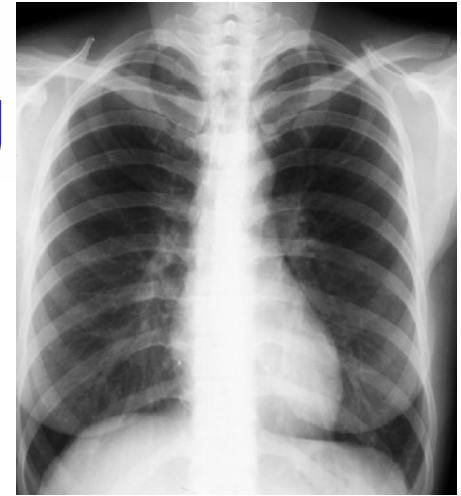
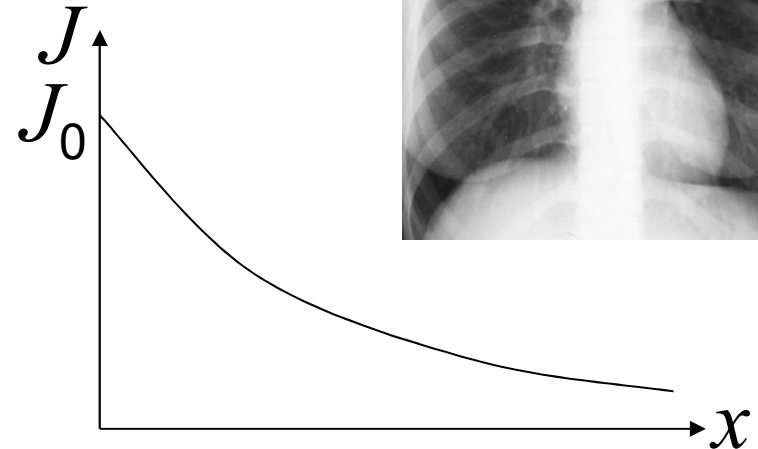
$$J = J_0 \cdot e^{-\mu x}$$

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

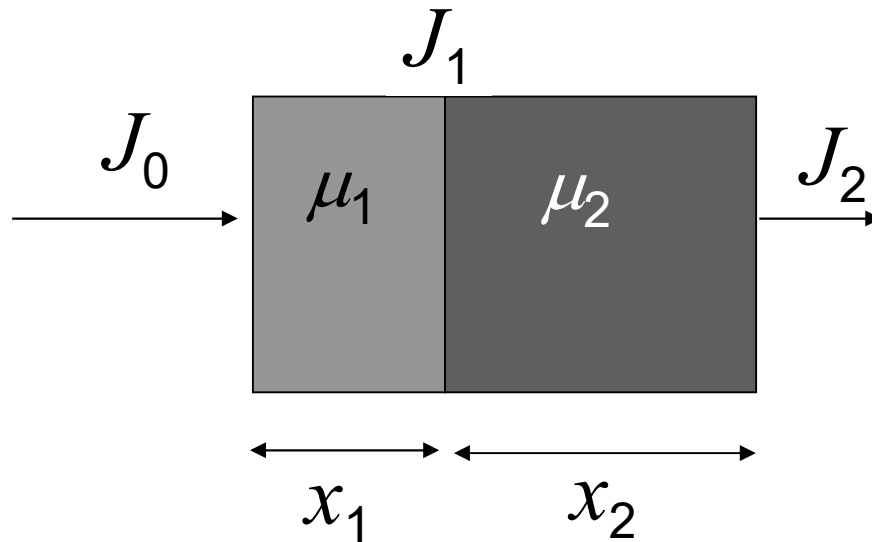
Z
 λ oder E_{photon}

Massen-
schwächungs-
koeffizient

Grundprinzip der Röntgenbild-
entstehung: Unterschiedliche
Strahlungsabsorption der
verschiedenen Gewebe.



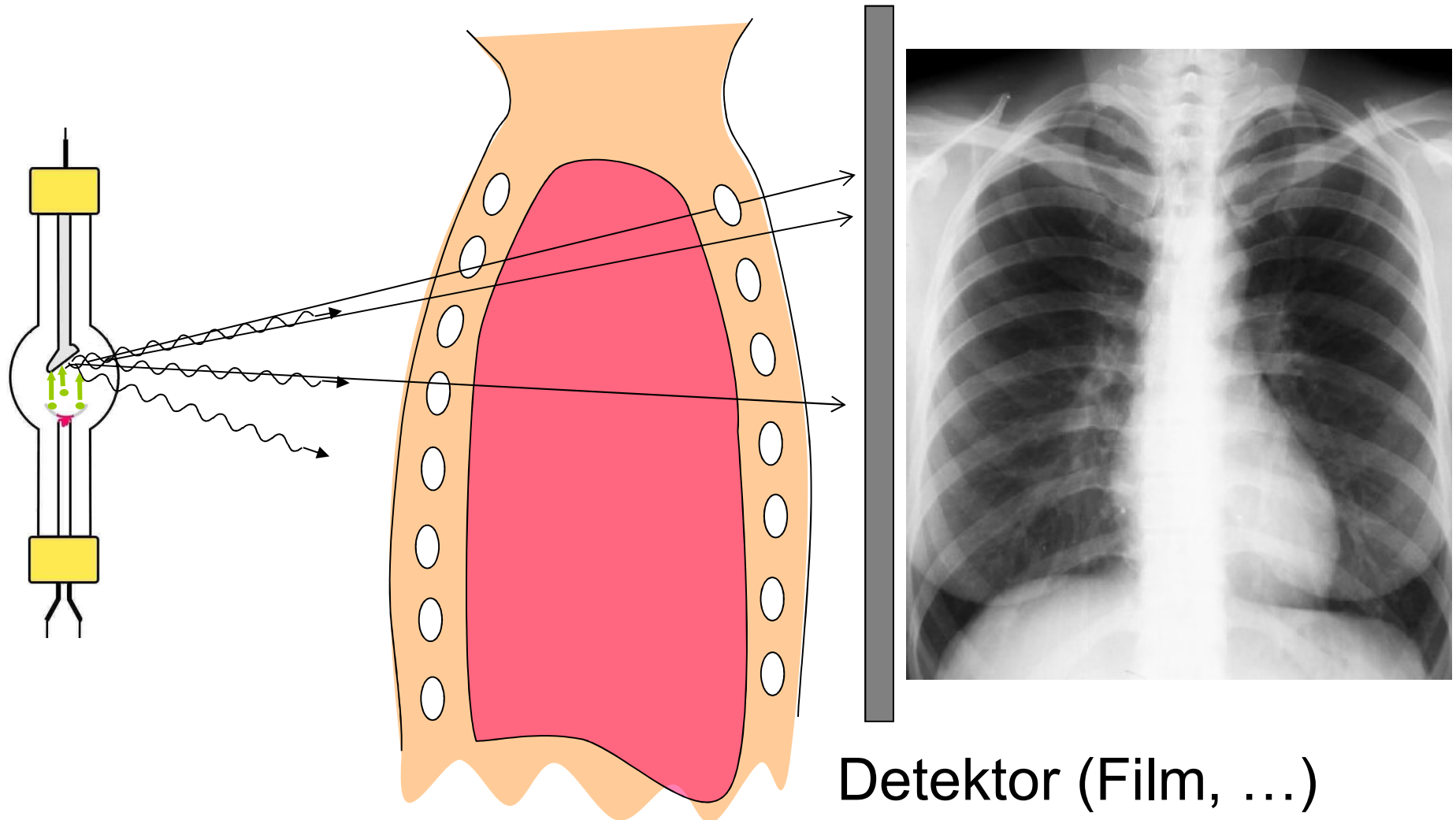
b) Absorption von inhomogenen Körper



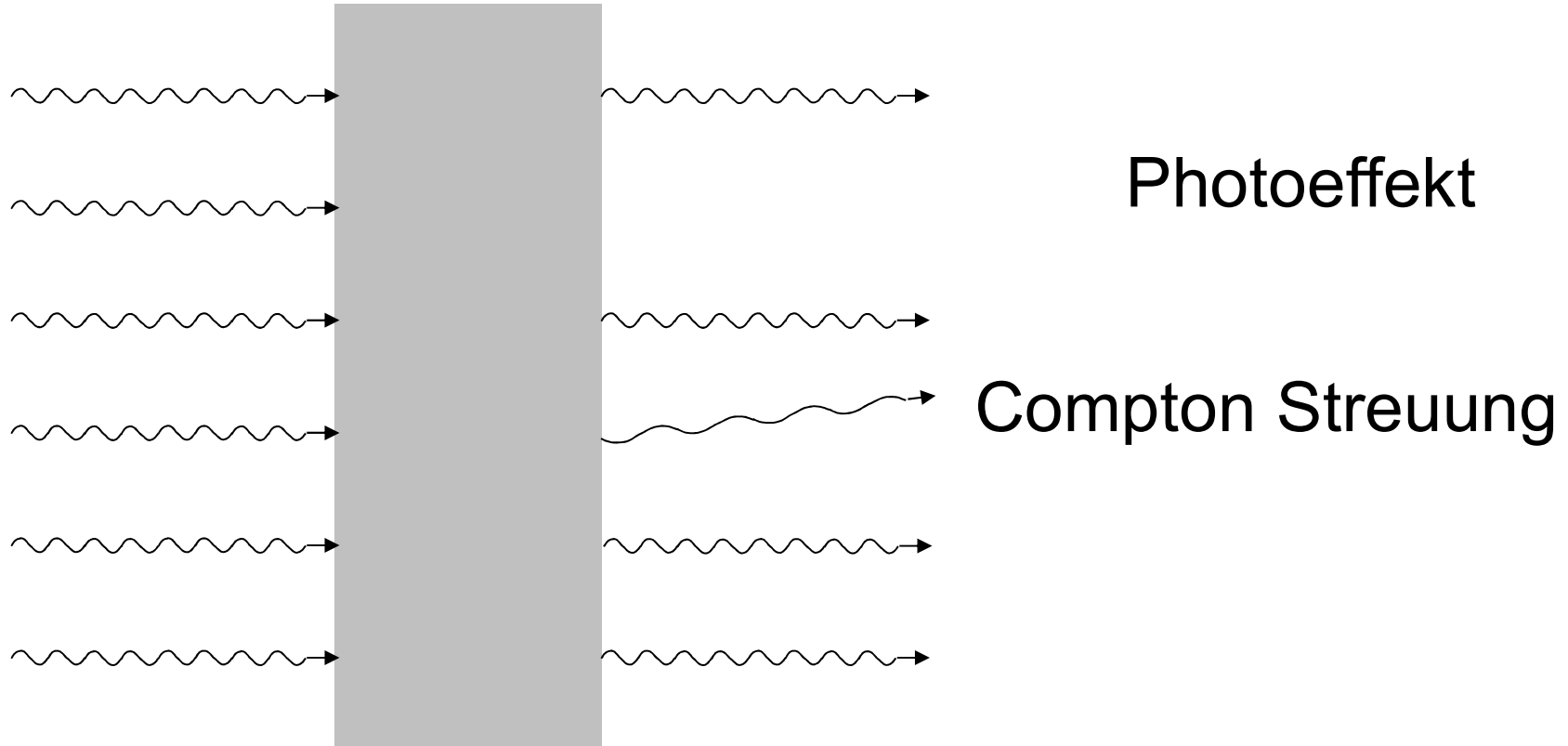
$\mu \cdot x$ Werte sind
addiert
(summiert)
Summationsbild

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

c) Grundprinzip der Summationsaufnahmen



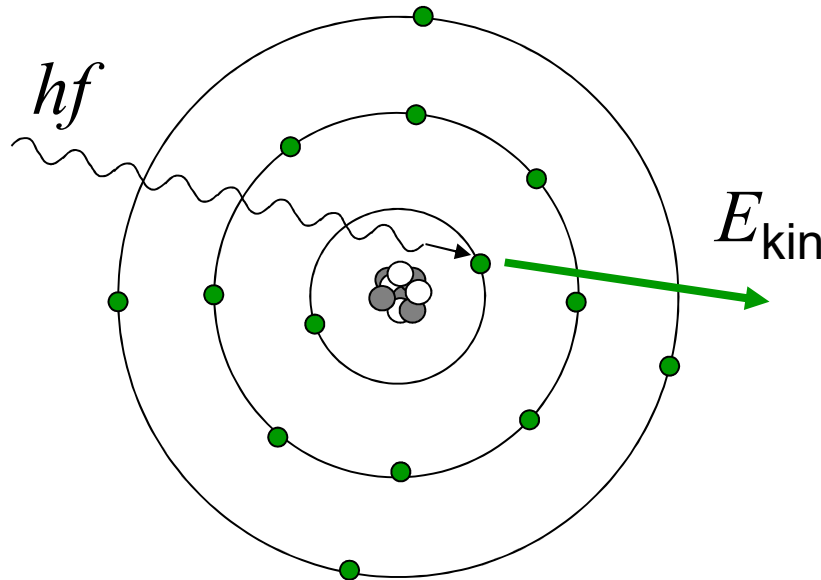
2. Teilprozesse der Schwächung der Röntgenstrahlung



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

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

a) 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 Unterschied

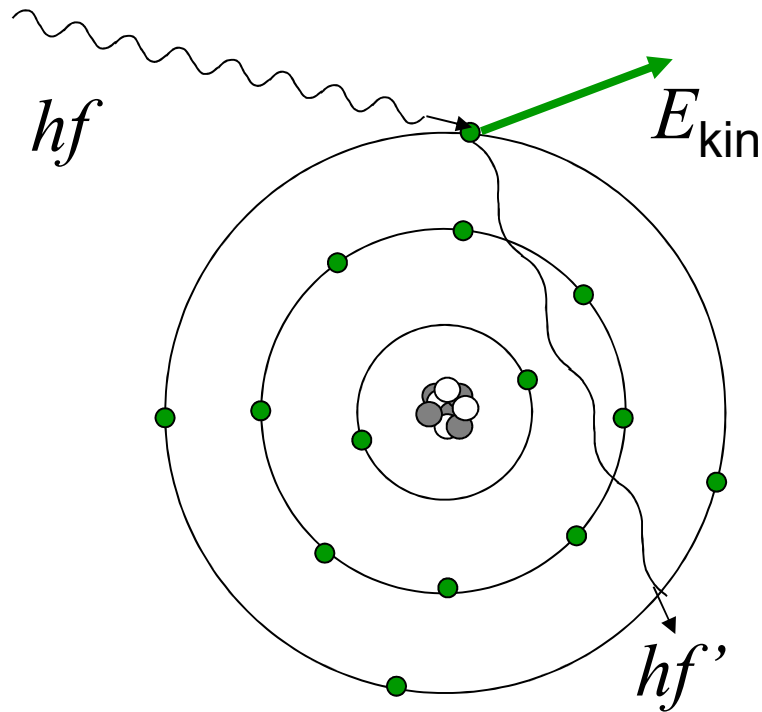
110%=1,1

$1,1^3=1,331$

33% τ_m Unterschied!

bei weicher Strahlung

b) Compton Streuung



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

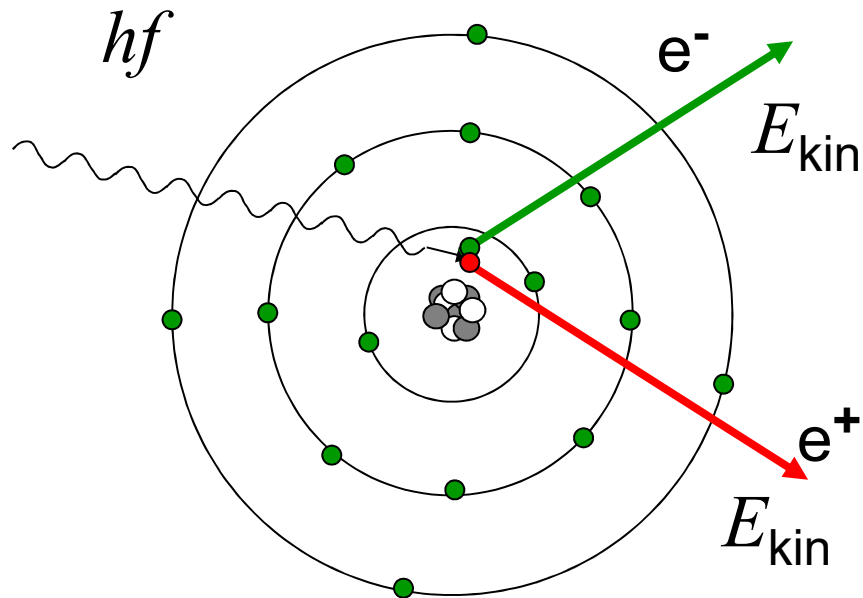
praktisch unabhängig von Z !

zB:

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

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

c) Paarbildung



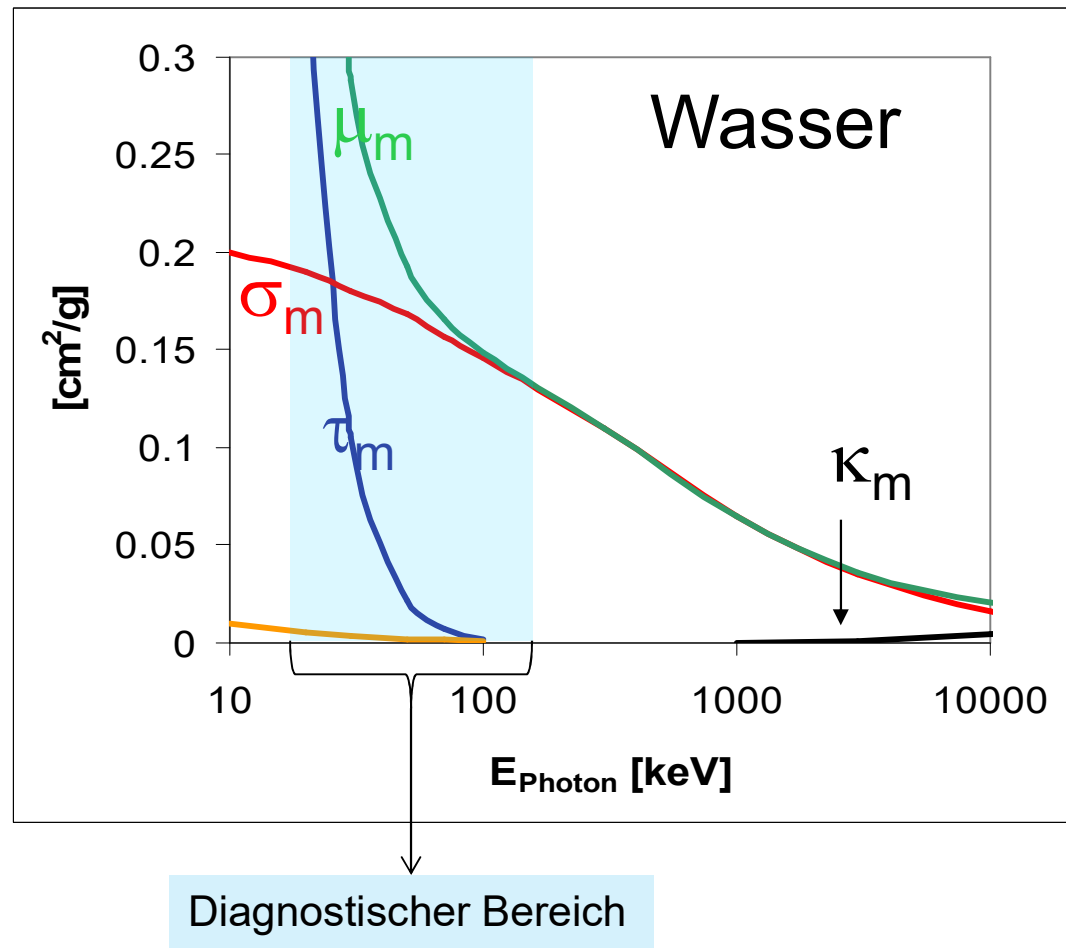
$$hf \geq 2 m_e c^2 \approx 1\text{MeV}$$

nur bei therap. Rtg.
und γ -Strahlung

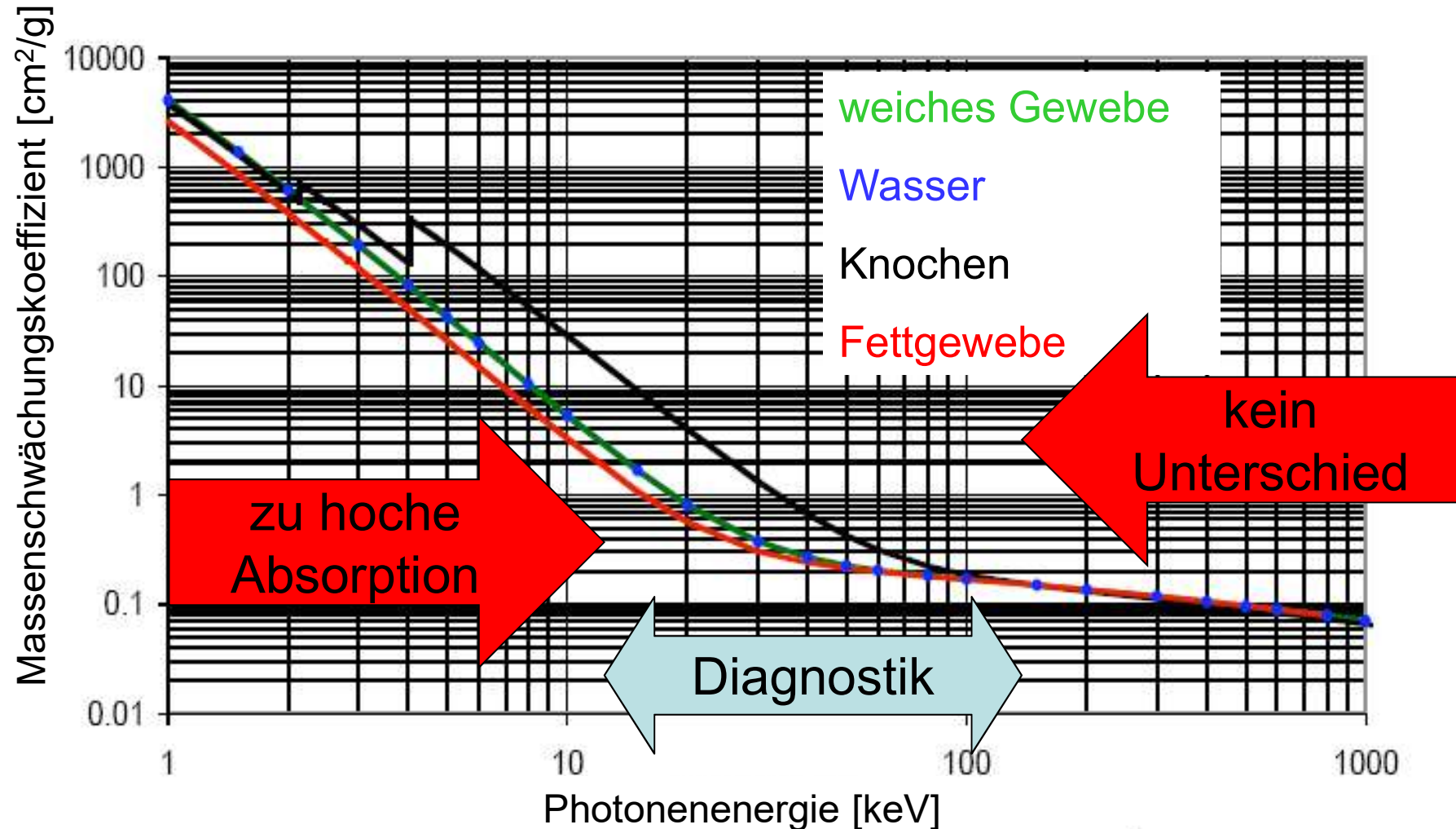
Bei diagn. Rtg kommt
nicht vor!

(wegen der geringen
Photonenenergie)

d) Photonenenergieabhängigkeit des Massenschwächungskoeffizienten



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 ($\sim Z^3$)**

e) 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

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

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

3. Kontrast des Röntgenbildes

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 des Röntgenbildes

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:

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

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

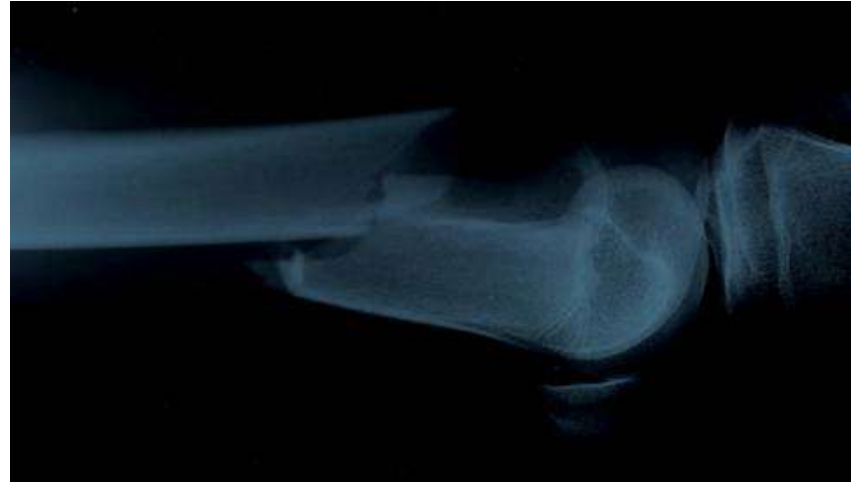
$$\mu = \mu_m \varrho$$

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

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

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

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



4. 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)

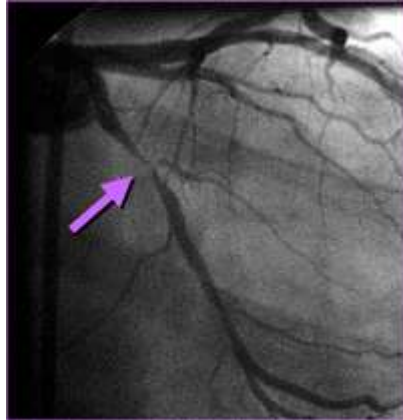
Blutgefäß
(Angiographie)

Barium (Z=56)

Magen, Darm
in Form von BaSO_4

Angiographie

Kontrastmittel in den Blutgefäße





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

