

Medizinische Biophysik II.

2024/25 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) Photonenenergabhängigkeit...

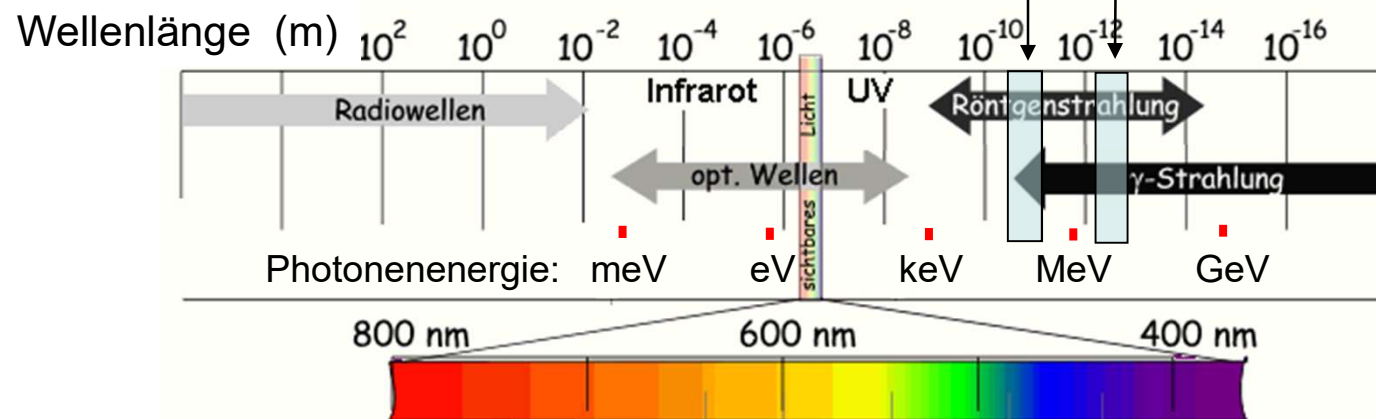
3. Kontrast des Röntgenbildes

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.)



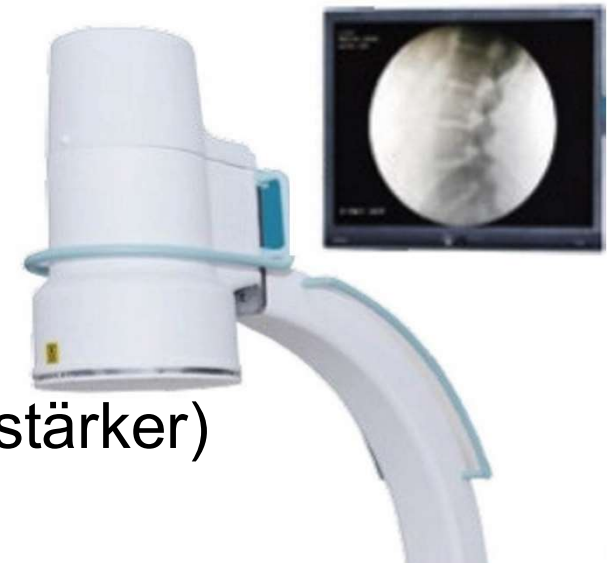
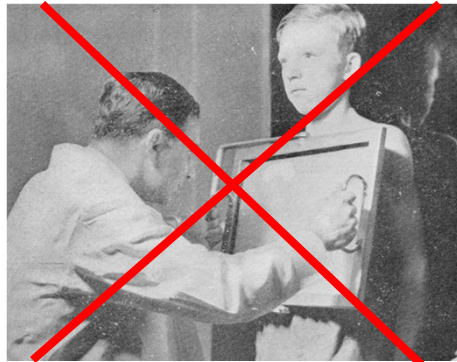
- **Wirkungen:**

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

- **Entstehung: in der Elektronenhülle**

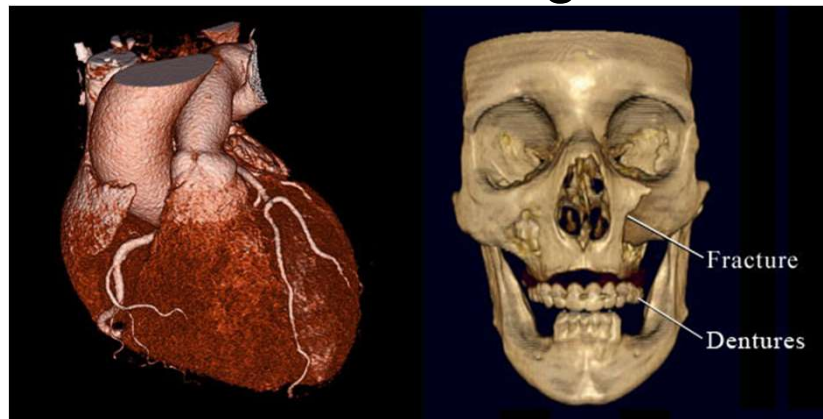
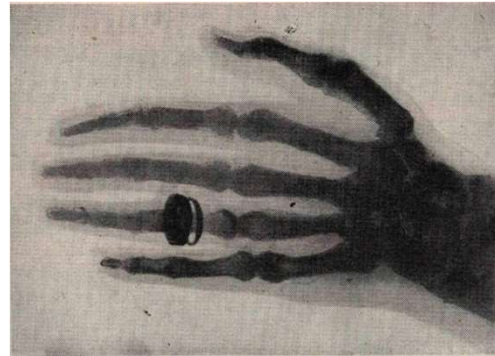
- **Typen**

- 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

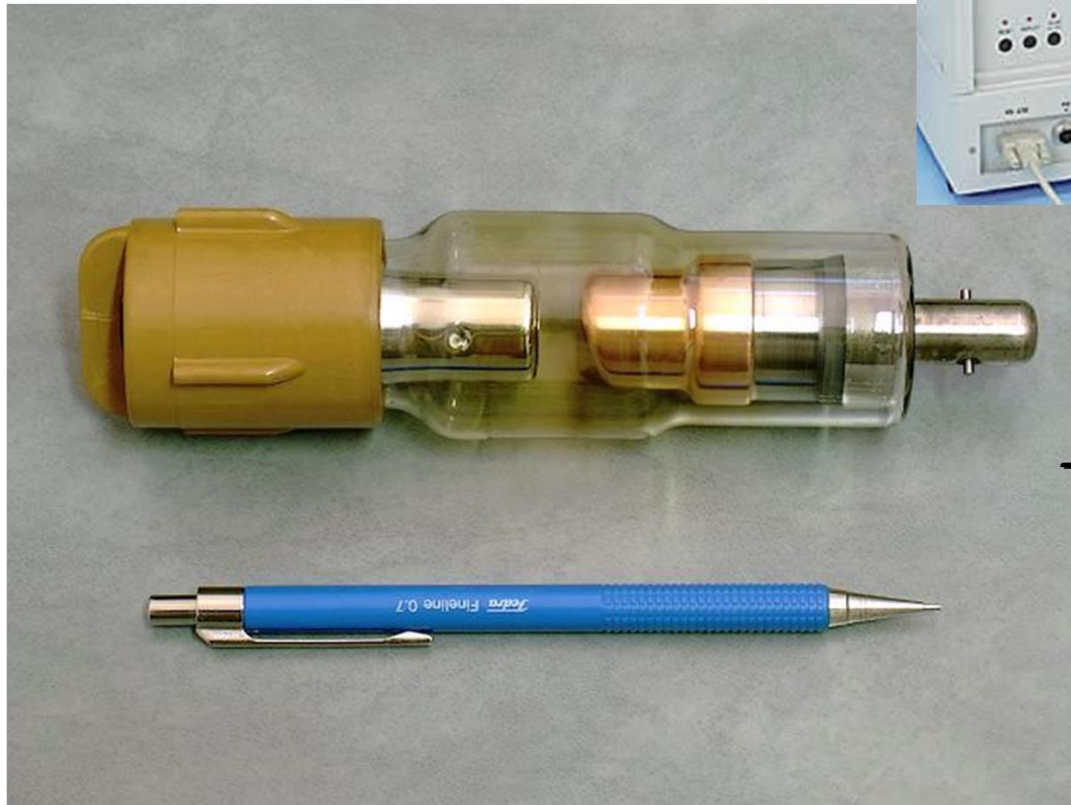
E_{kin}

Röntgenröhre (Diagnostik)

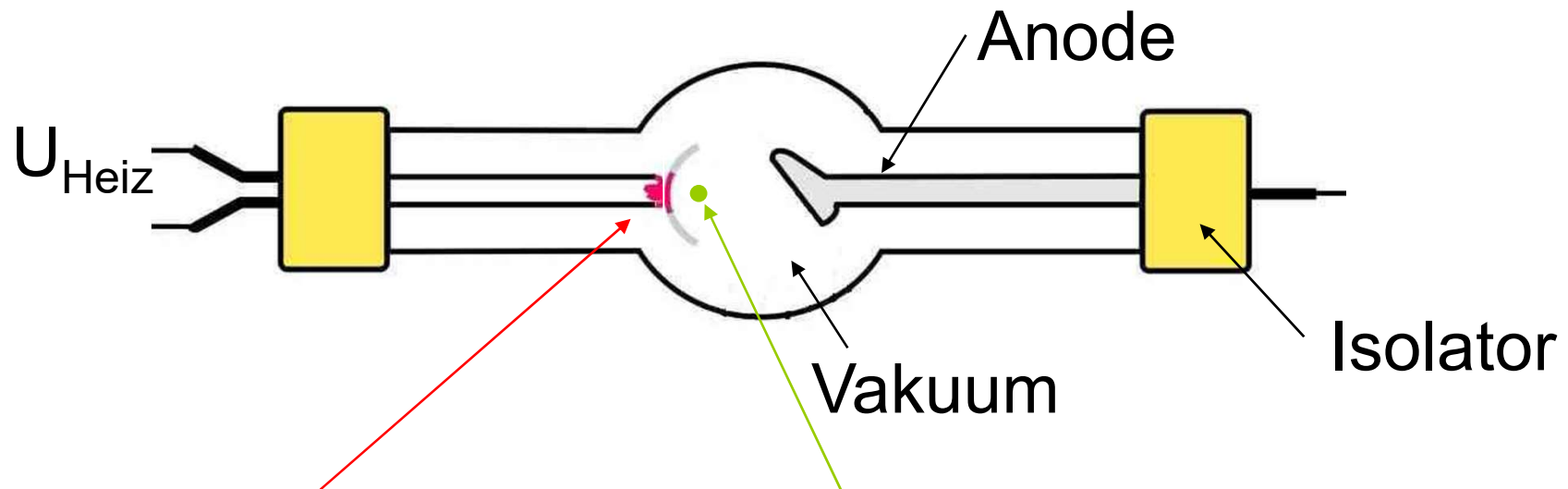


Teilchenbeschleuniger (Therapie)





1. Die Röntgenröhre

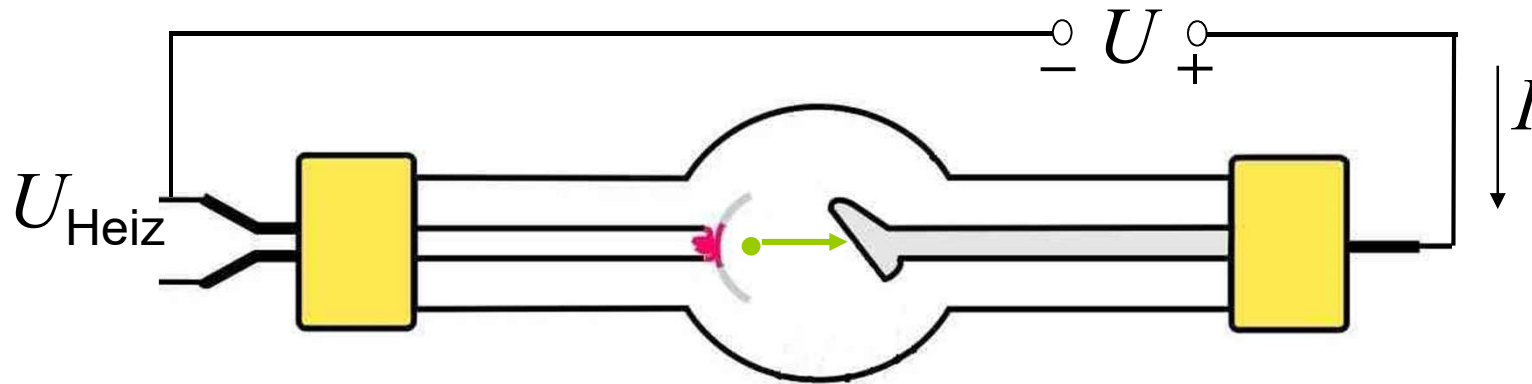


Heizkathode: Heizung (T Erhöhung) \Rightarrow Erhöhte thermische Energie \Rightarrow **Elektronen** treten aus der Kathode aus.

(Glühelektrischer Effekt)



Die Röntgenröhre



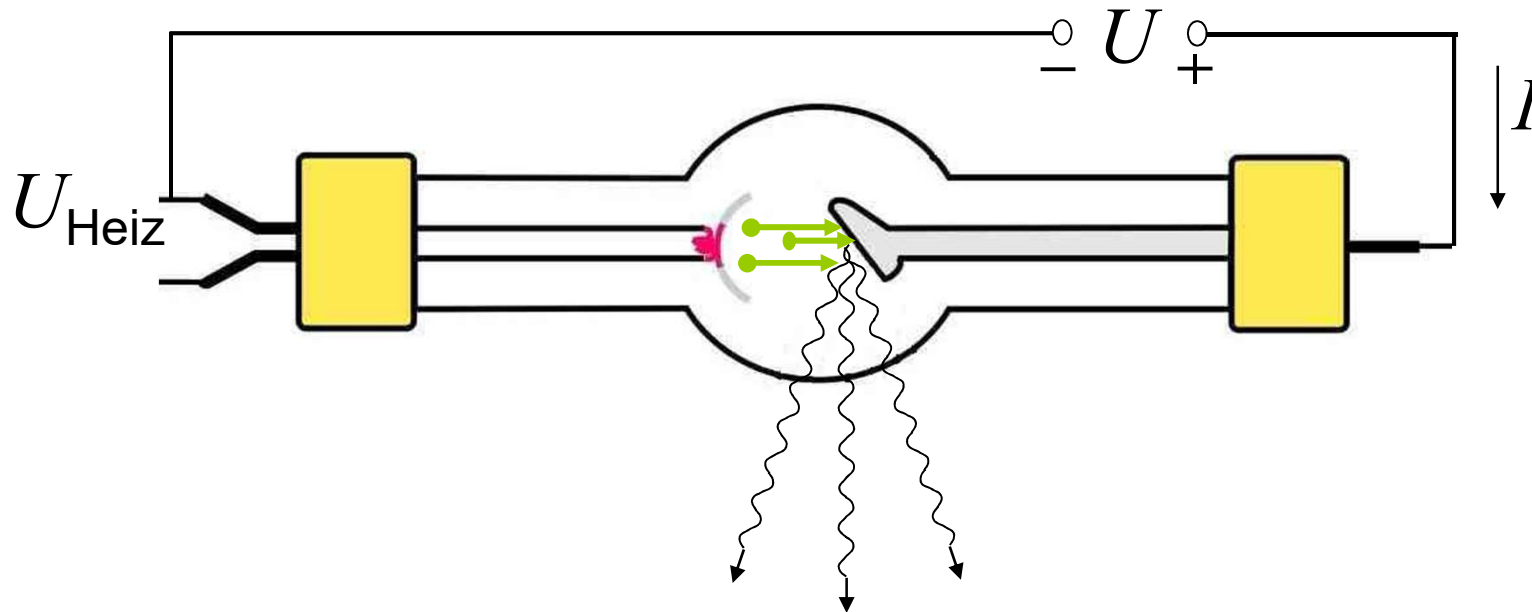
Anodenspannung(U) (typisch 30-200 kV):
beschleunigt die Elektronen

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

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.)

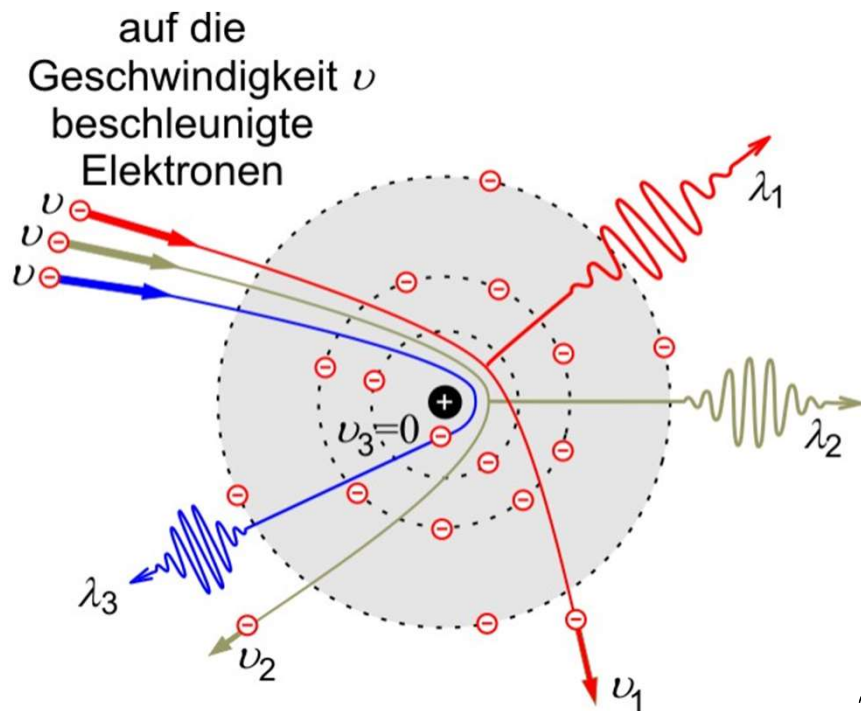
2. Bremsstrahlung

a) Duane-Hunt Gesetz

Kinetische Energie

⇒ Photonenenergie (Rtg)

⇒ Thermische Energie



$$E_{\text{kin}} \geq hf$$

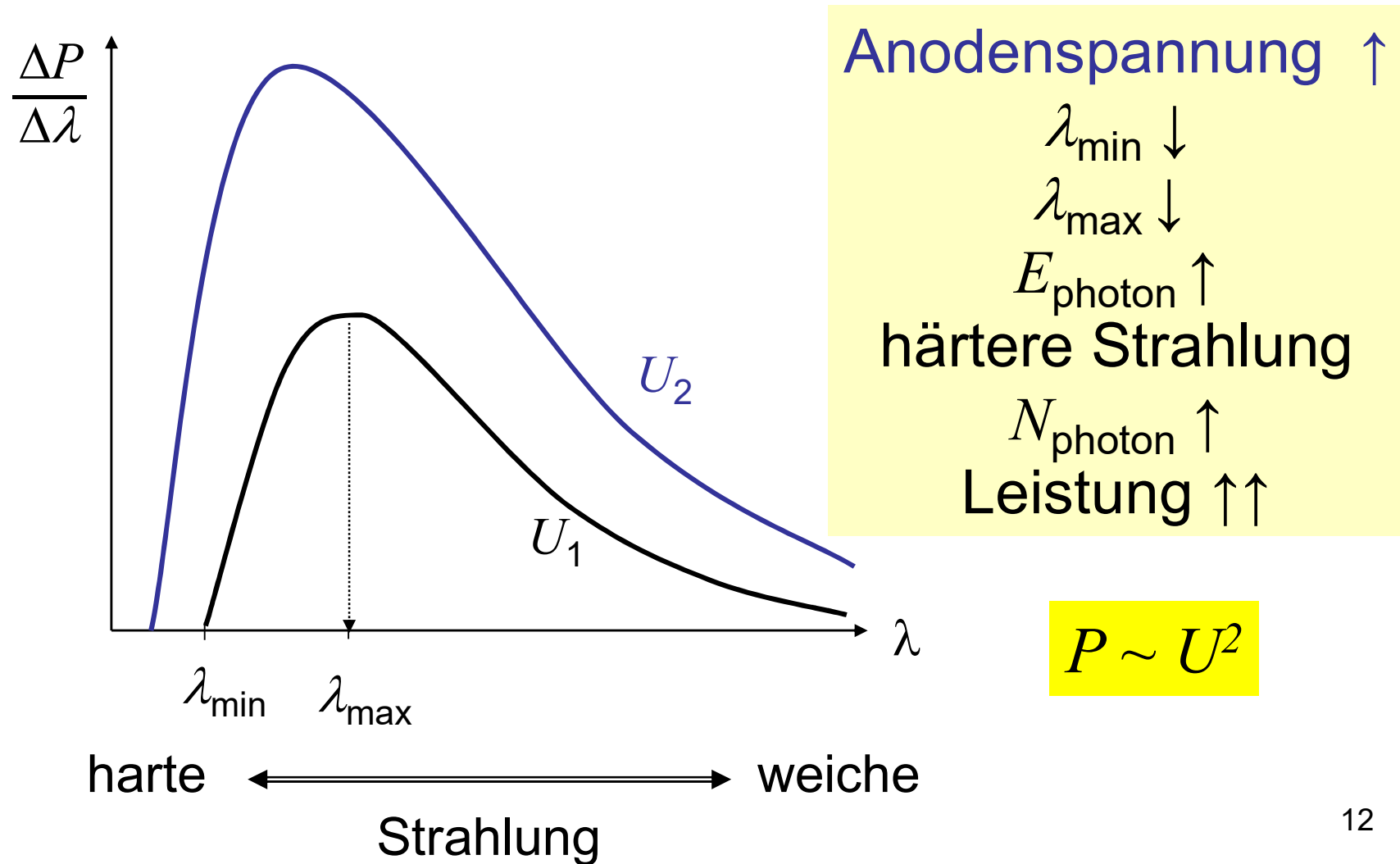
$$Ue = E_{\text{kin}} \geq hf = h \frac{c}{\lambda}$$

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

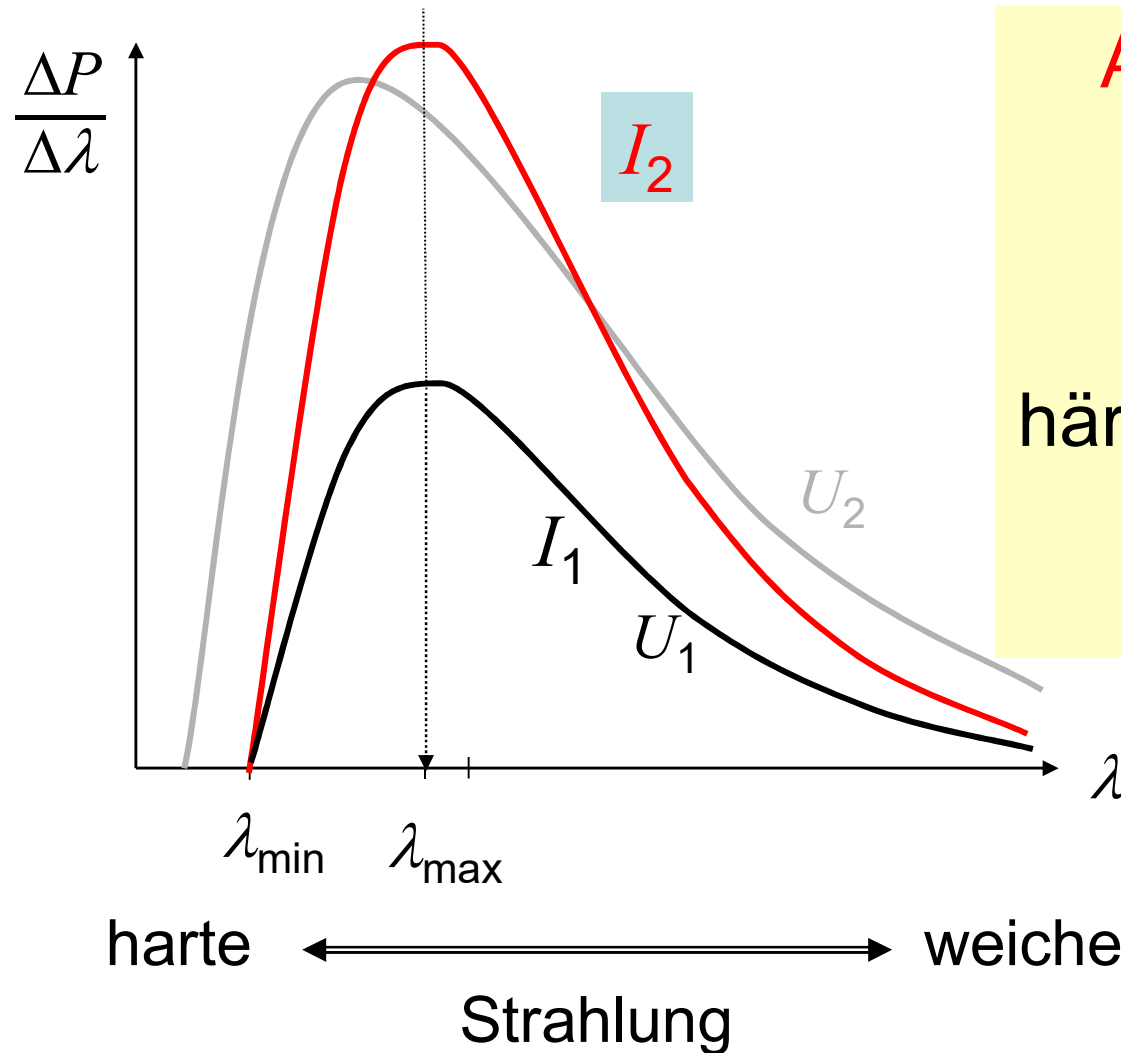
$$\lambda \geq \frac{hc}{Ue} = \lambda_{\text{min}} \quad \text{Konst.}$$

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

b) Emissionsspektrum der Bremsstrahlung



Emissionsspektrum der Bremsstrahlung



Anodenstrom \uparrow

$\lambda_{\min} \rightarrow$

$\lambda_{\max} \rightarrow$

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

härte d. Strahlung \rightarrow

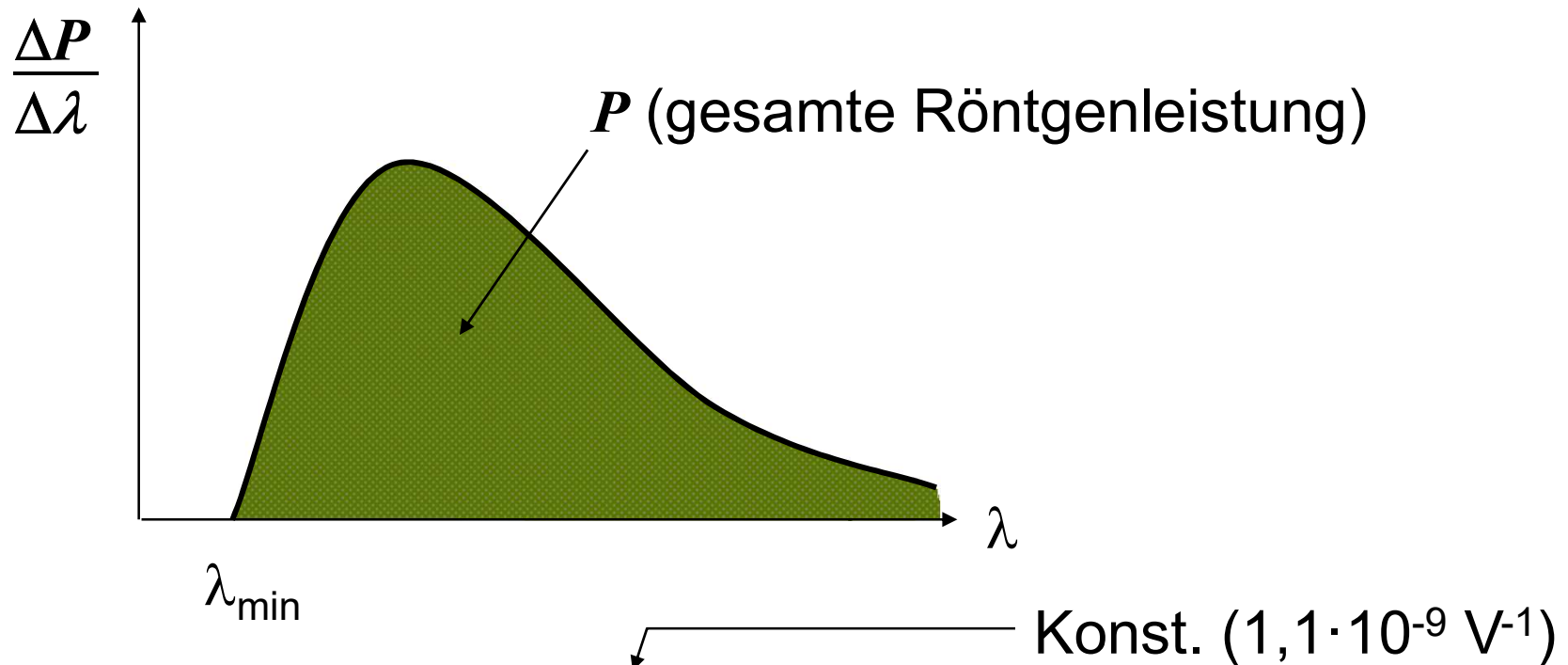
$N_{\text{photon}} \uparrow$

Leistung \uparrow

$$P \sim I$$

~~Ohm~~

c) Leistung der Röntgenstrahlung



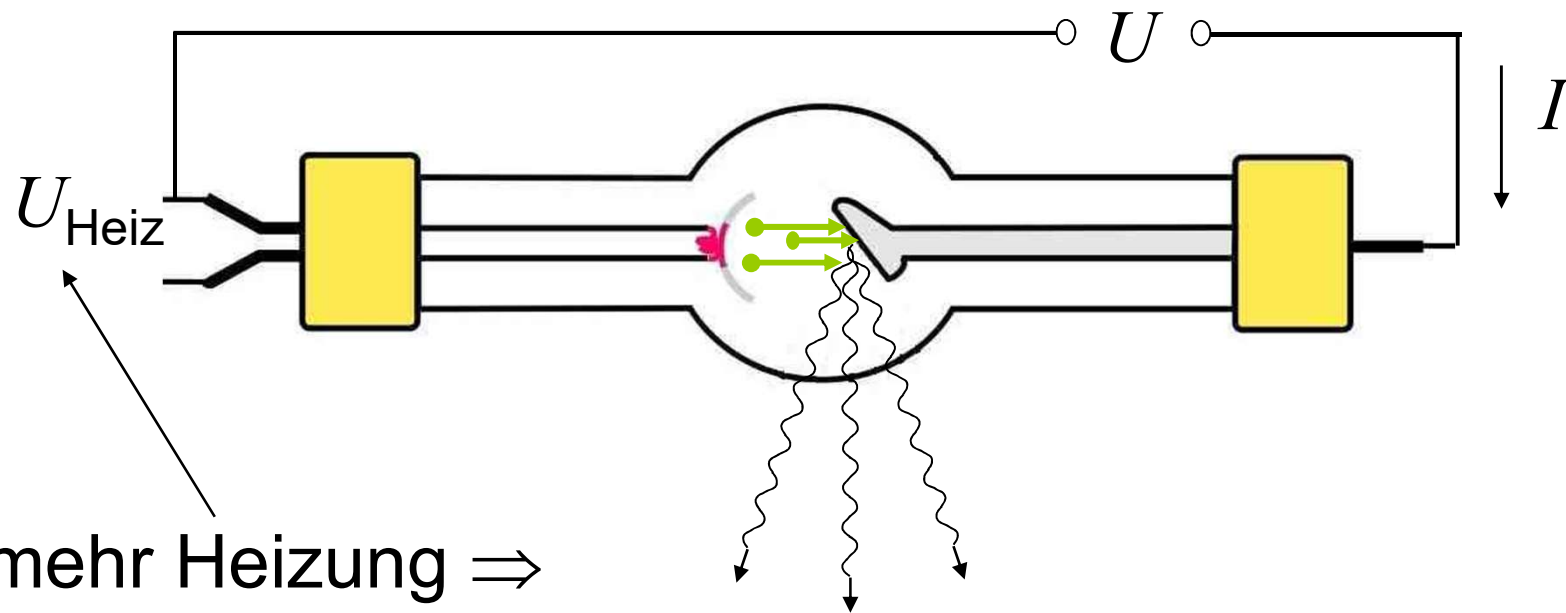
$$P = c_{\text{Rtg}} \cdot U^2 \cdot I \cdot Z$$

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 !

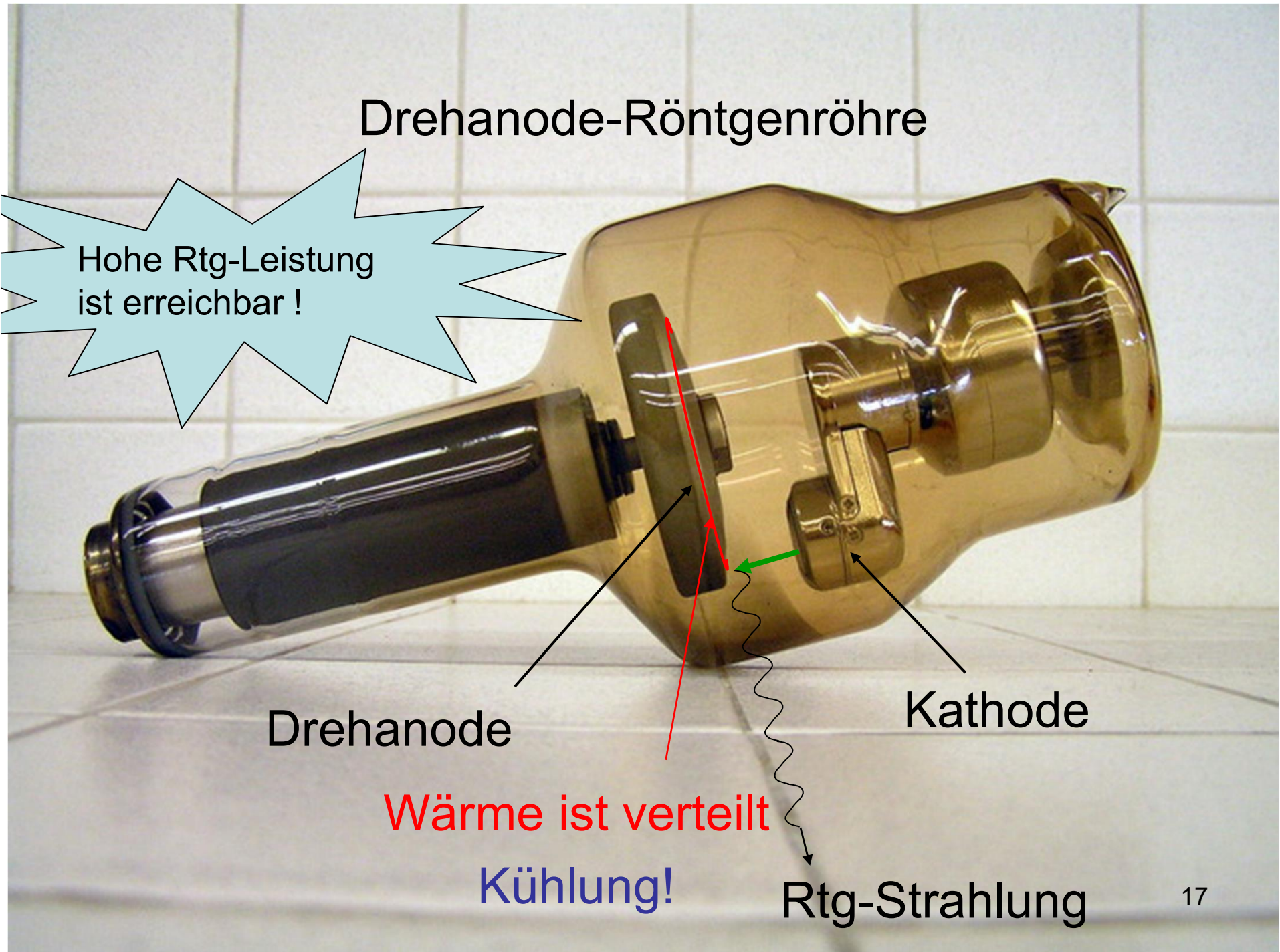
Drehanode

Kathode

Wärme ist verteilt

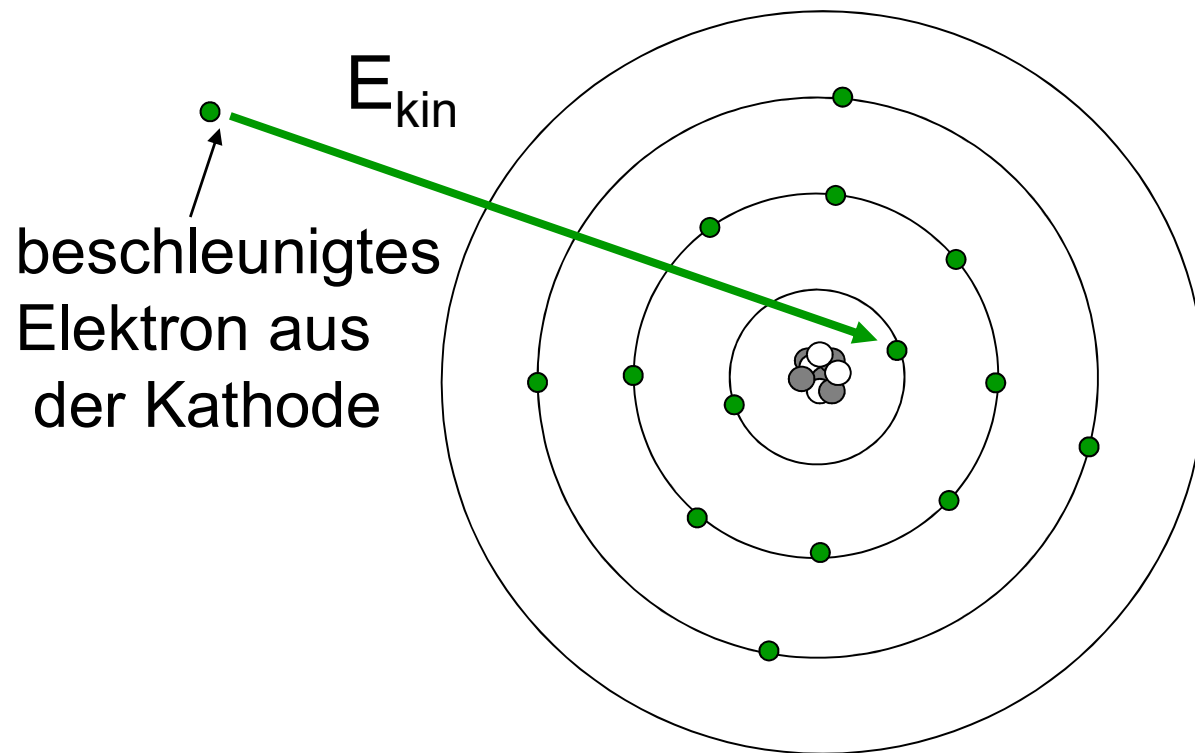
Kühlung!

Rtg-Strahlung



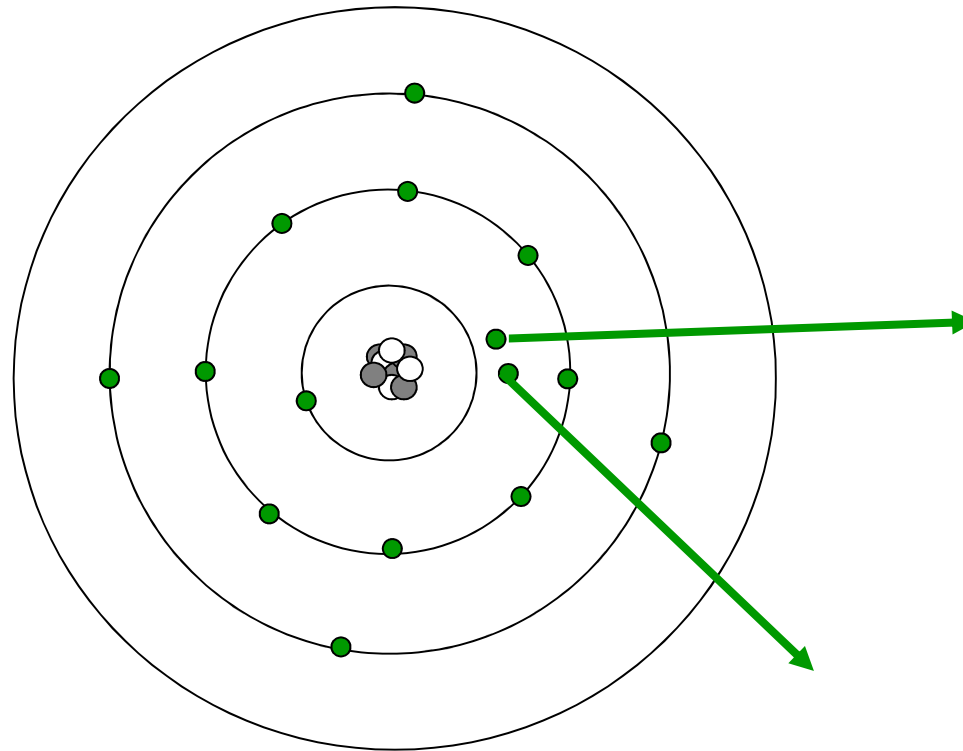
3. Charakteristische Röntgenstrahlung

a) Entstehung



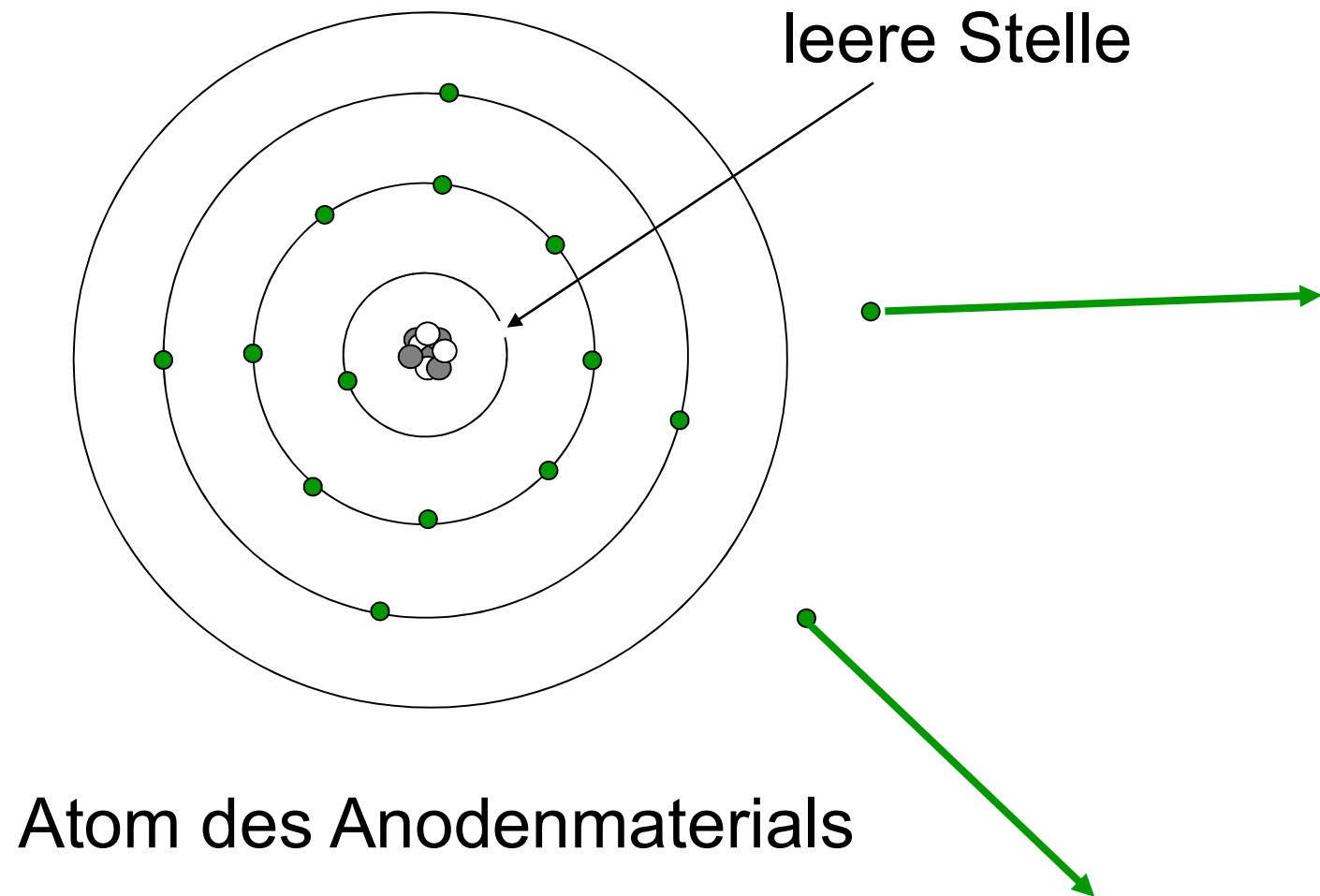
Atom des Anodenmaterials

Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung

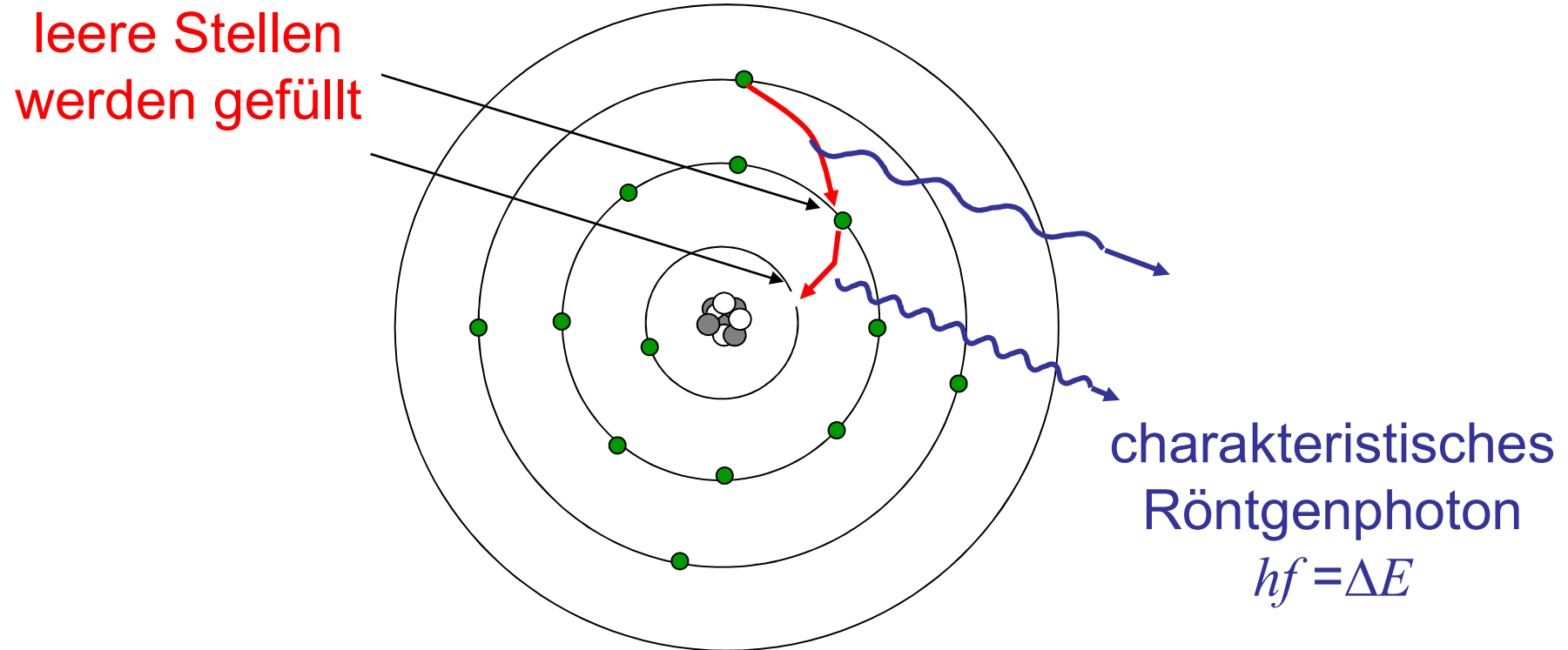


Atom des Anodenmaterials

Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung

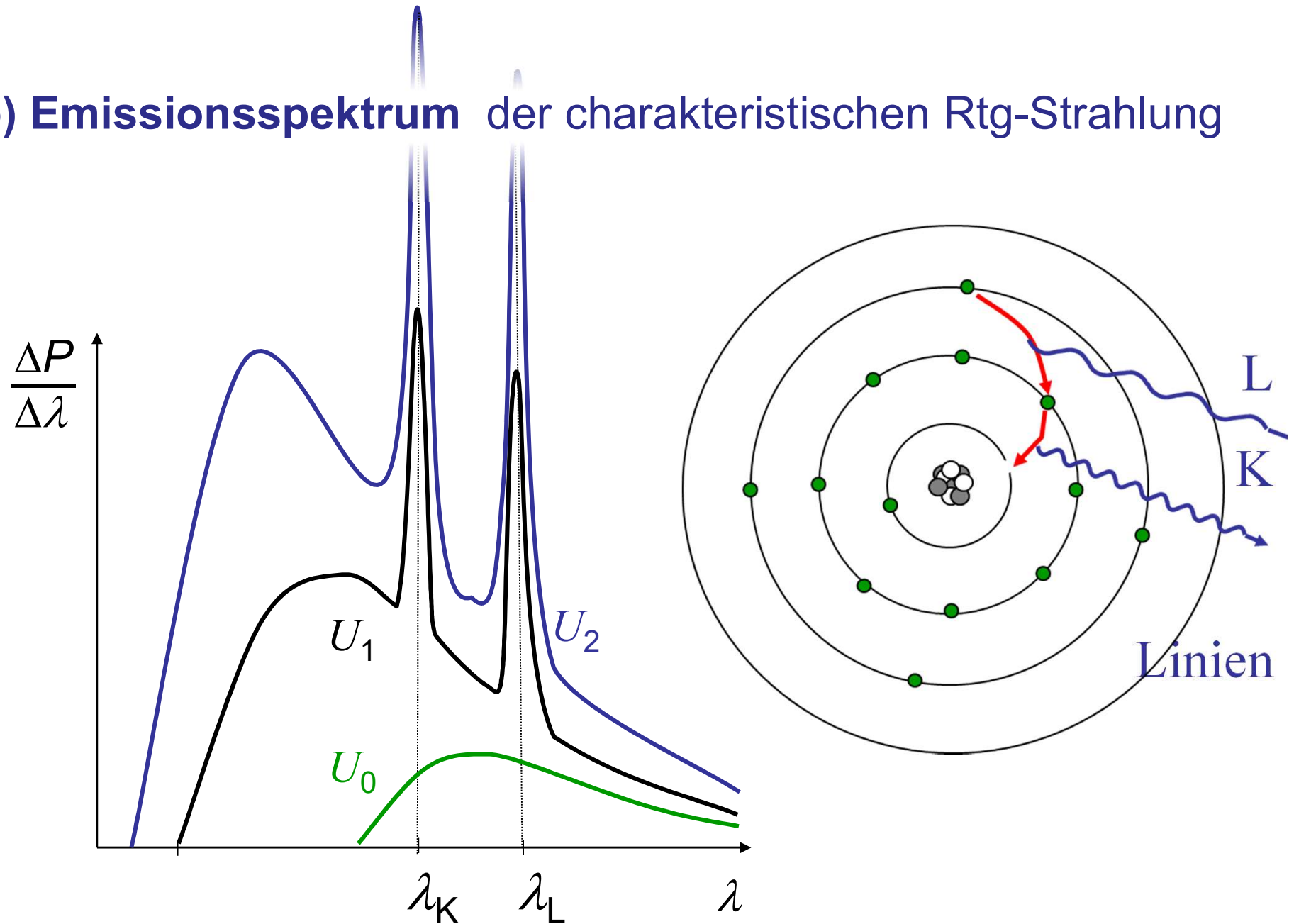


Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung



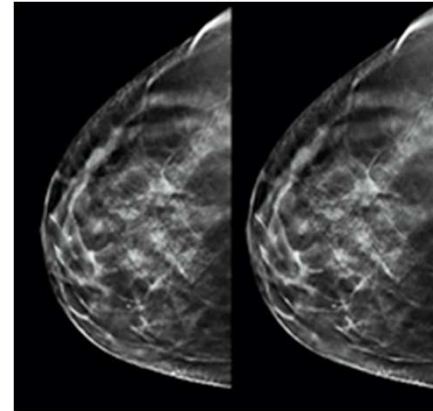
Atom des Anodenmaterials

b) Emissionsspektrum der charakteristischen Rtg-Strahlung



c) Anwendung der charakteristischen Röntgenstrahlung

Diagnostik: Mammographie



Strukturanalyse der Materie
mit Röntgendiffraktion

<https://www.rcsb.org/>

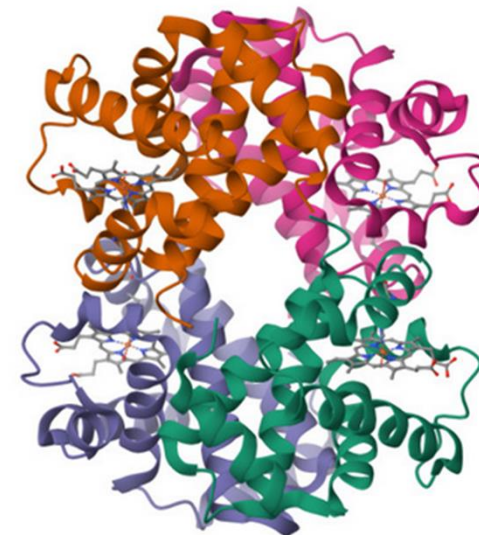
RCSB PDB Deposit Search Visualize Analyze Download

RCSB PDB PROTEIN DATA BANK

231,029 Structures from the PDB

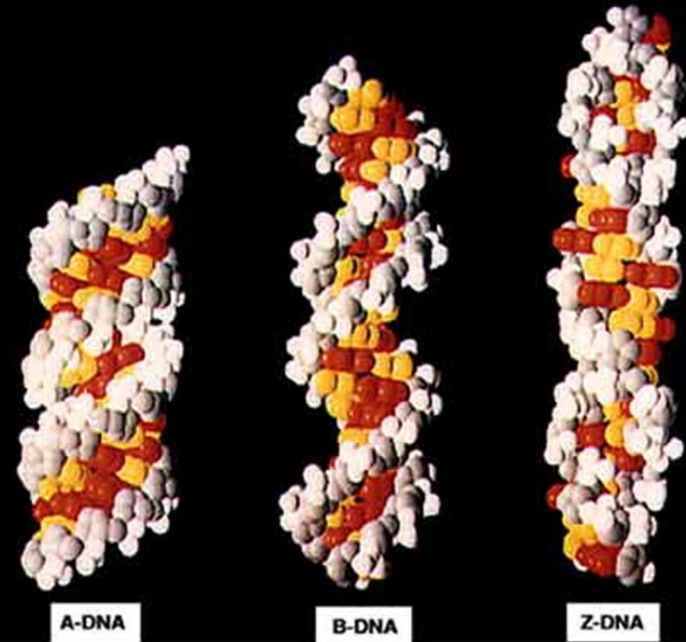
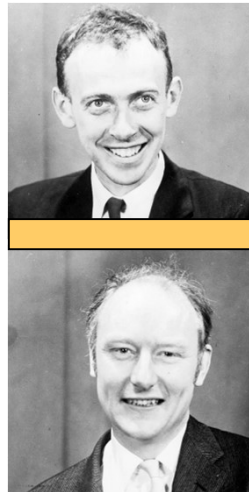
1,068,577 Computed Structure Models (CSM)

PDB-101 wwPDB EMDDataResource NAKB wwPDB Foundation



Beispiele:

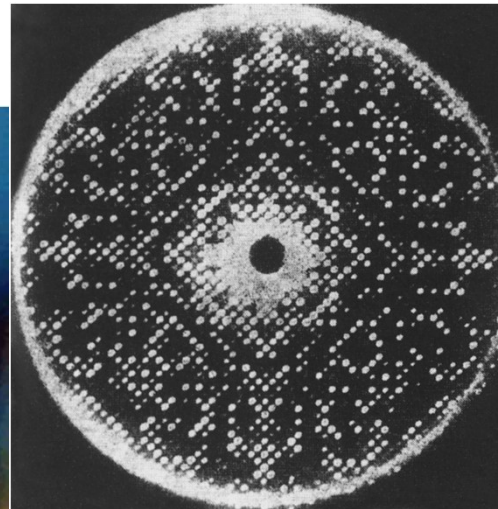
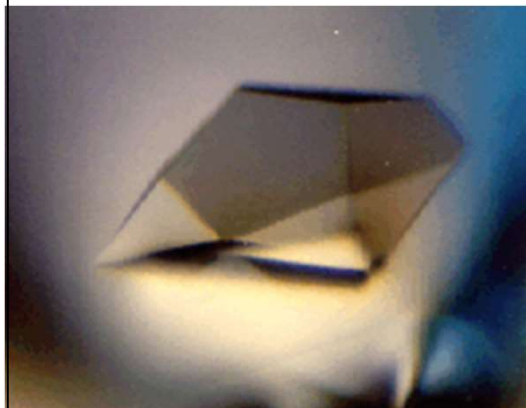
DNA



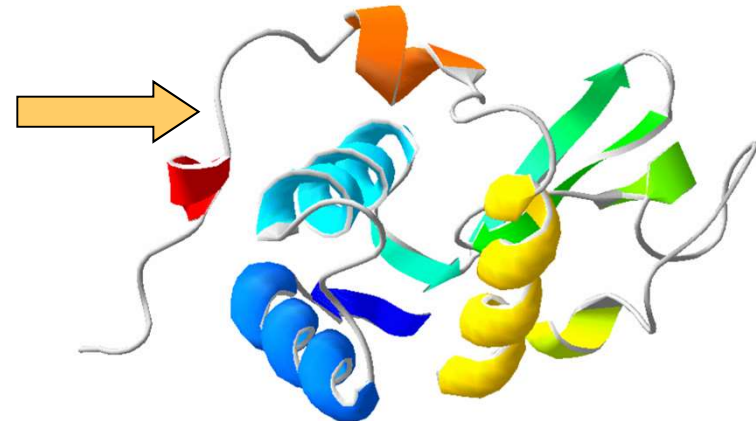
Proteine z.B.:
Lysozyme

Diffractionsbild

Protein-Kristall

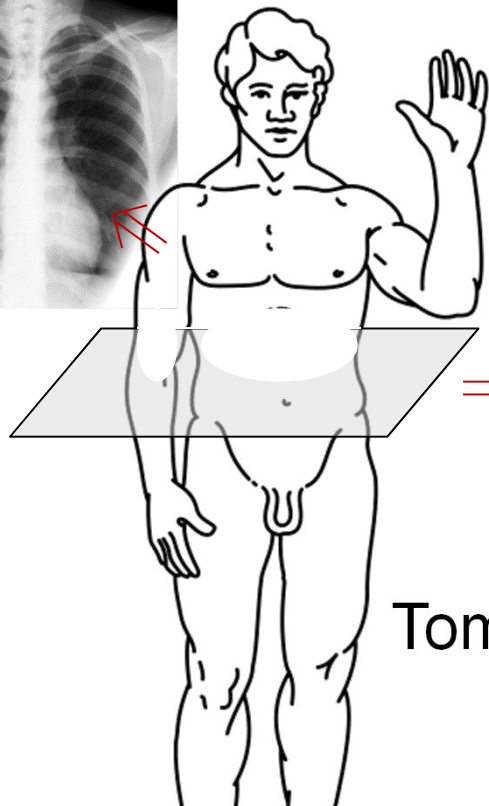
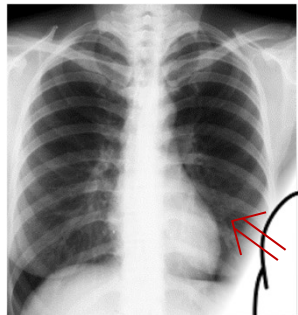


Dreidimensionale Struktur



III. Physikalische Grundlagen der Röntgendiagnostik

Röntgendiagnostische Verfahren



Summationsbild: - Statische Aufnahme
(früher: Filmaufnahme)
- Gleichzeitiges Bild
(Fluoroskopie)



Tomographisches Bild: -CT (Computed Tomography)
-Tomosynthese

Spezialitäten: Anwendung von Kontrastmitteln,
Digitalisierung, Subtraktion (DSA)

1. Schwächung der Röntgenstrahlung

a) Schwächungsgesetz

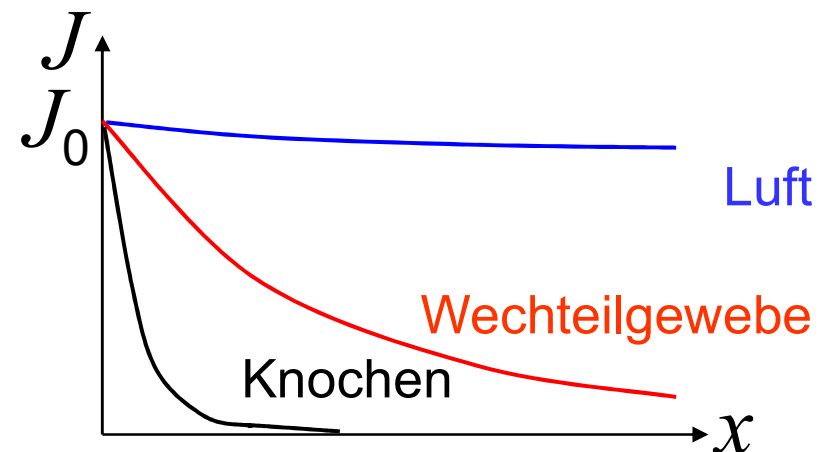
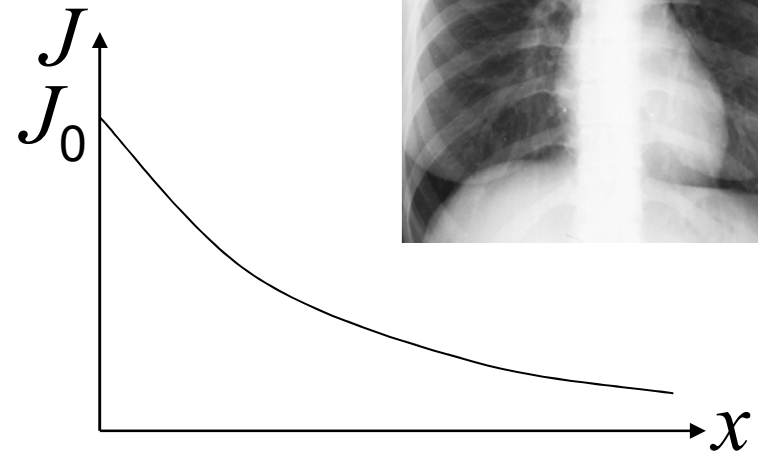
$$J = J_0 \cdot e^{-\mu x}$$

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

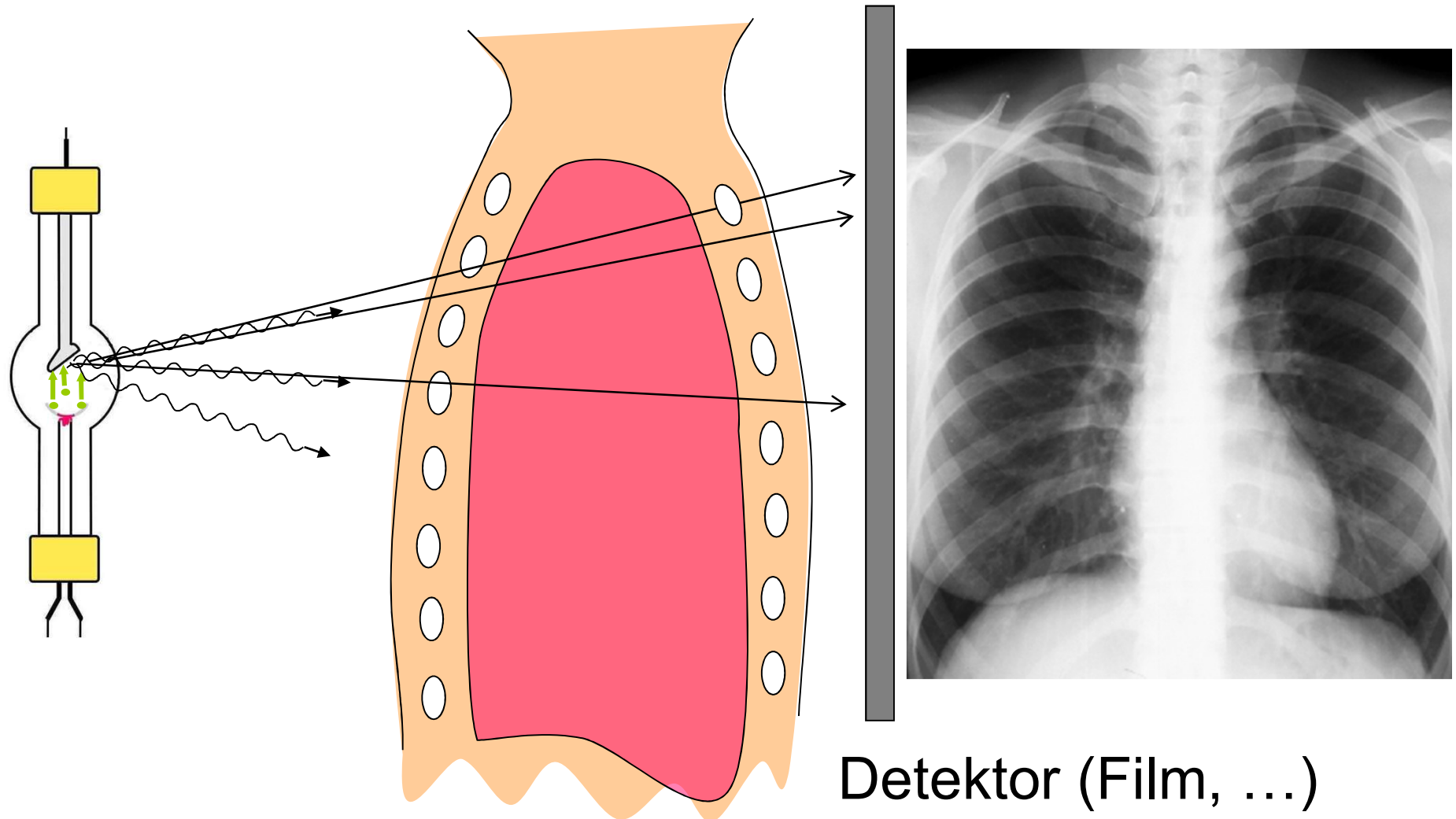
Z
 λ oder E_{photon}

Massen-
schwächungs-
koeffizient

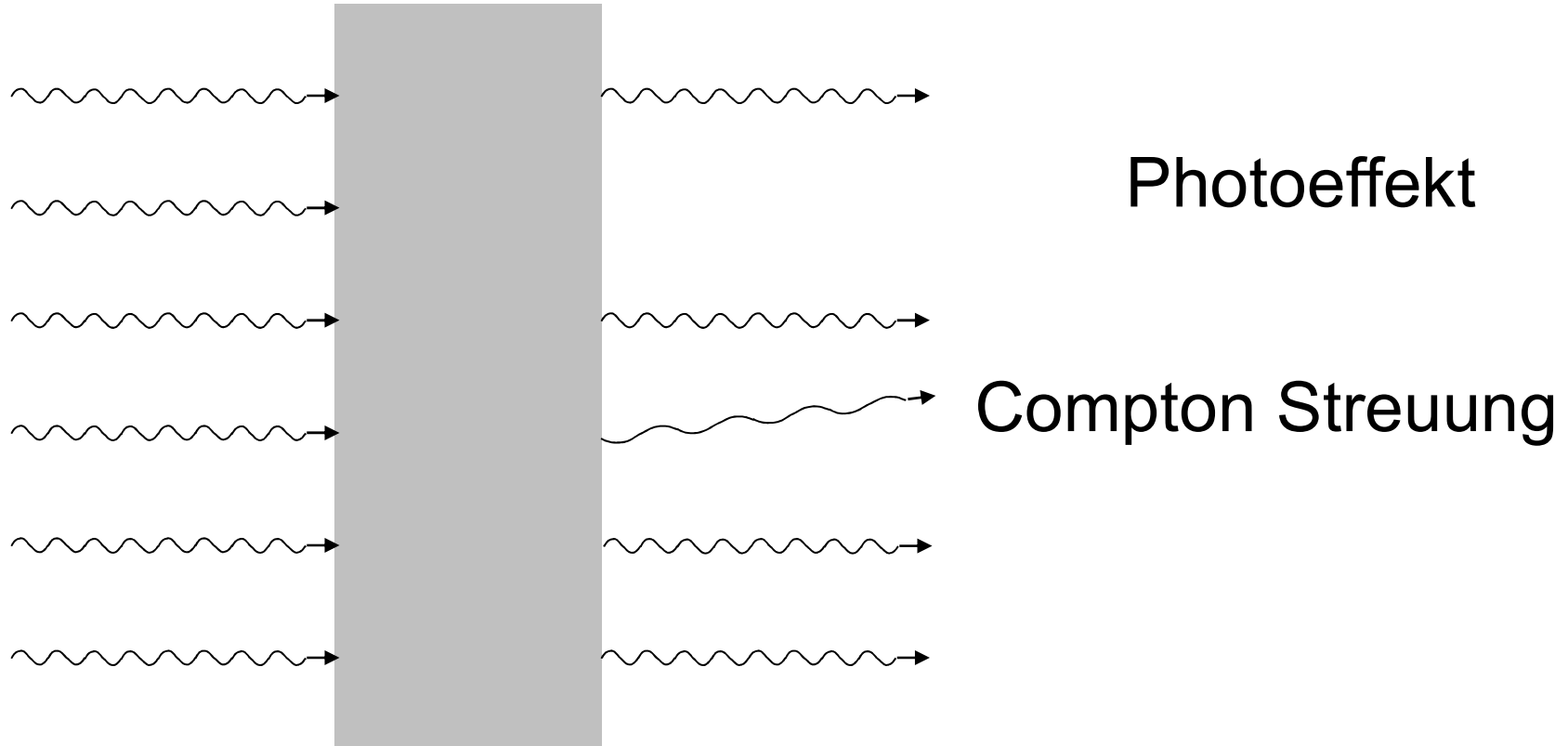
Grundprinzip der Röntgenbild-
entstehung: Unterschiedliche
Strahlungsabsorption der
verschiedenen Gewebe.



c) Grundprinzip der Summationsaufnahmen



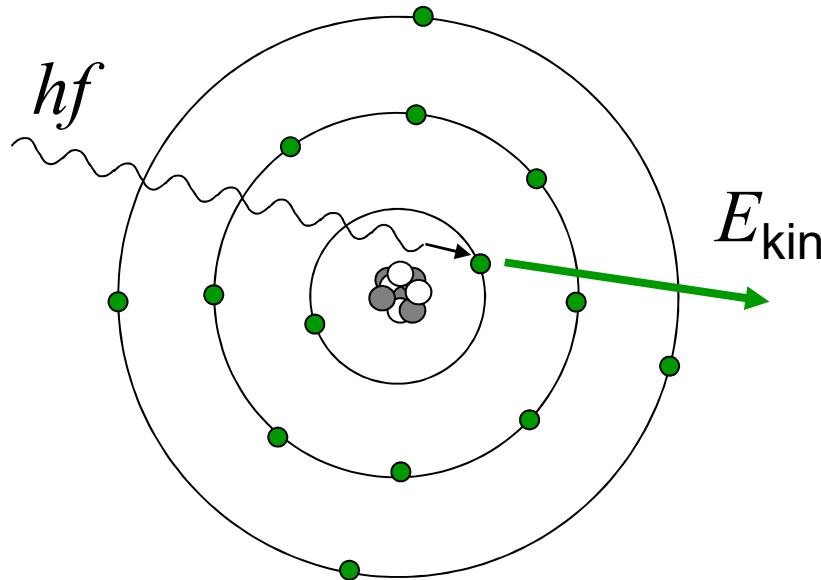
2. Teilprozesse der Schwächung der Röntgenstrahlung



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

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

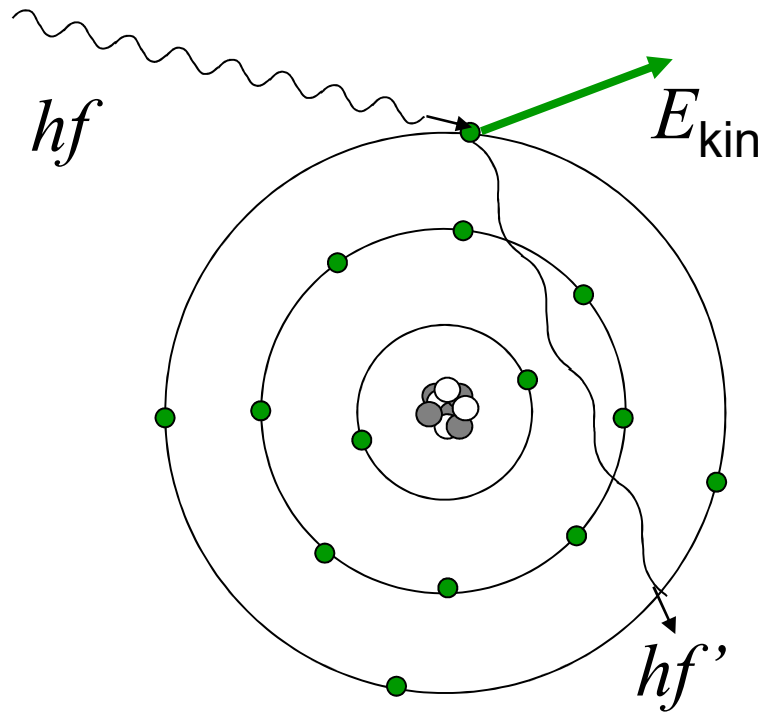
110%=1,1

$1,1^3=1,331$

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	

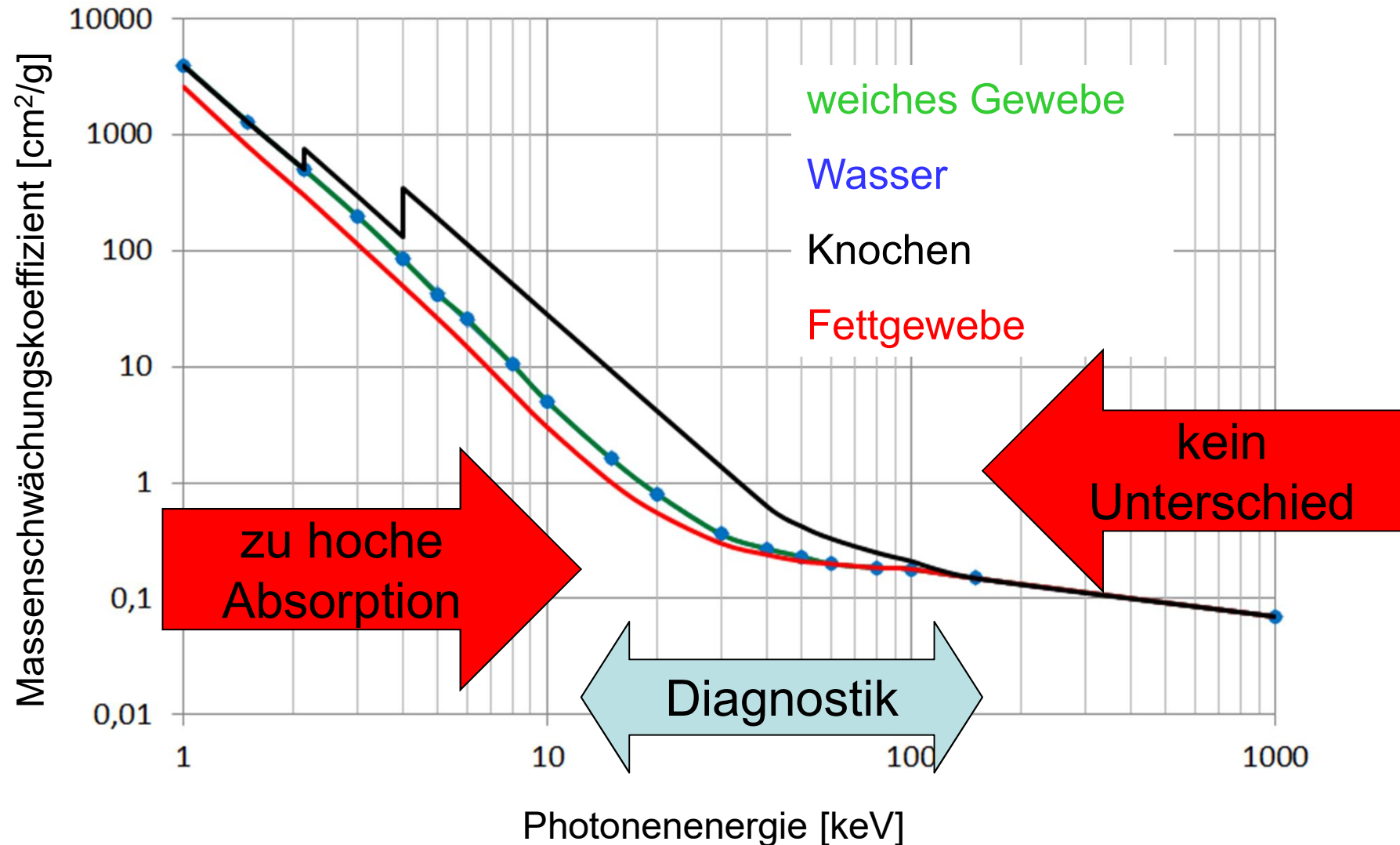
Schwache Wellenlängenabhängigkeit: $\sigma_m \sim \sqrt{\lambda}$

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 ($\sim Z^3$)**

c) Photonenenergieabhängigkeit des Massenschwächungskoeffizienten



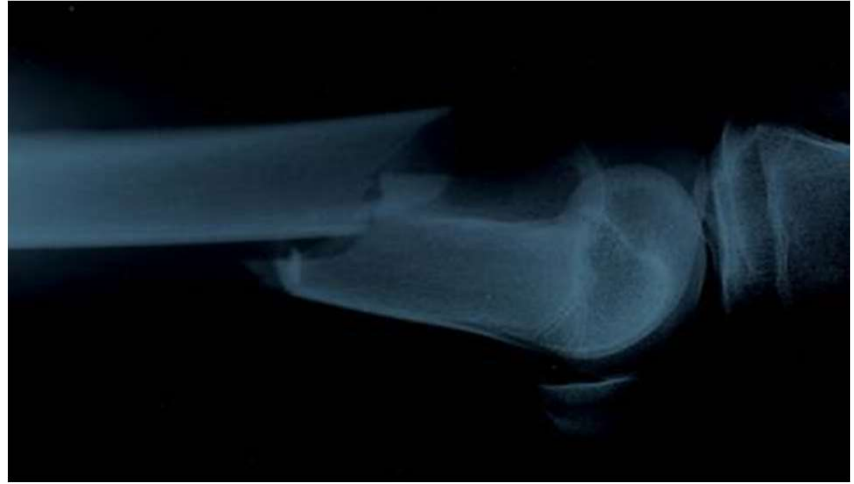
3. Kontrast des Röntgenbildes

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



4. Kontrastmittel

Positives Kontrastmittel:

mehr Absorption

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

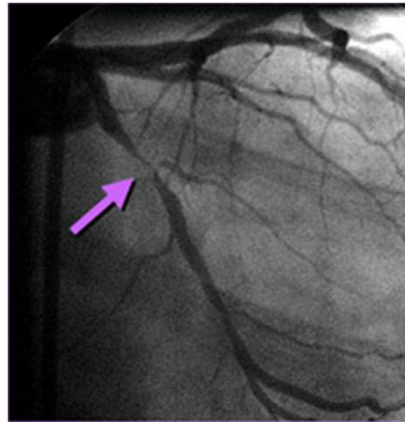
$$\tau_m = \text{const} \cdot \lambda^3 \cdot Z^3$$

Jod ($Z=53$) Blutgefäß
(Angiographie)

Barium ($Z=56$) Magen, Darm
nur in Form von BaSO_4 !

Angiographie

Kontrastmittel in den Blutgefäße





Negatives Kontrastmittel:

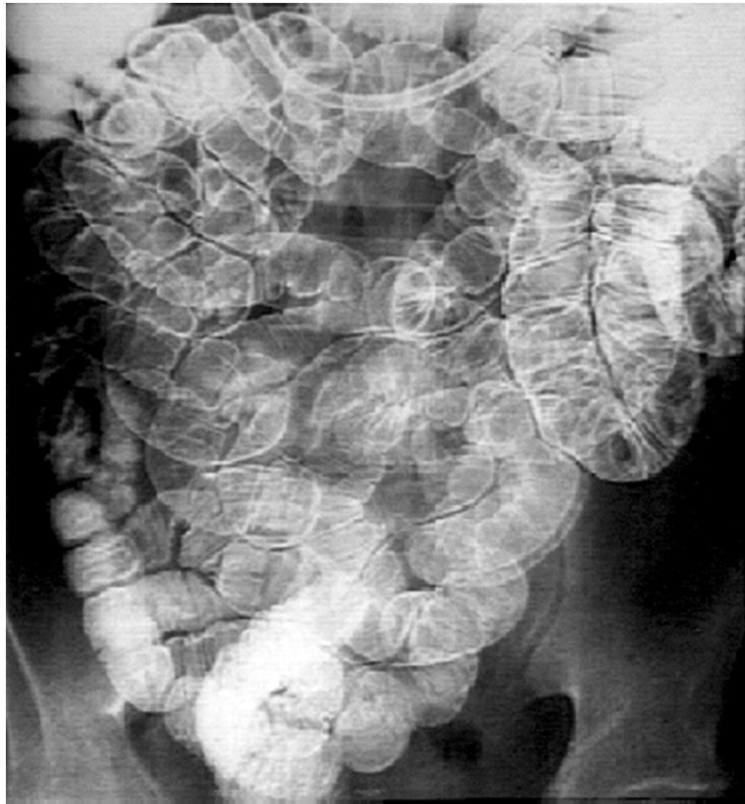
wenige Absorption $\mu \downarrow$ $\rho \downarrow$ $\mu_m - Z_{\text{eff}} -$

Luft, CO₂ (Gase) in Darm

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

BaSO₄ + Luft in Darm.

Doppelkontrastaufnahmen



Danke für Ihre Aufmerksamkeit!



Hausaufgaben:
2.86-88, 90-92