

**Medizinische Biophysik II.**

2022/23 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

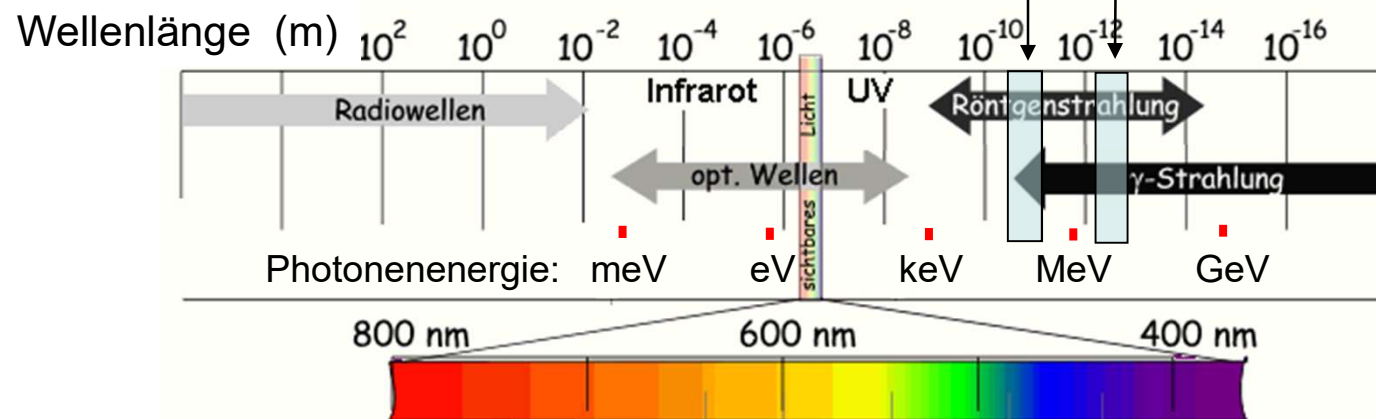
#### 3. Kontrast des Röntgenbildes

#### 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.)



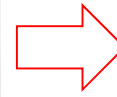
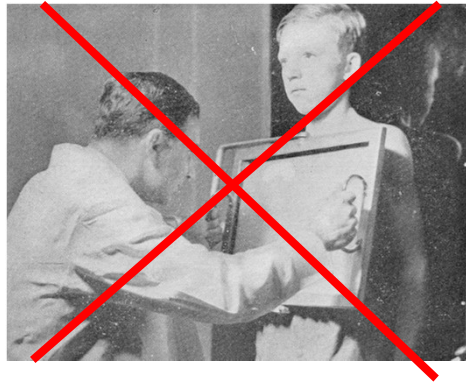
- Wirkungen:

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

- Entstehung: in der Elektronenhülle

- Typen

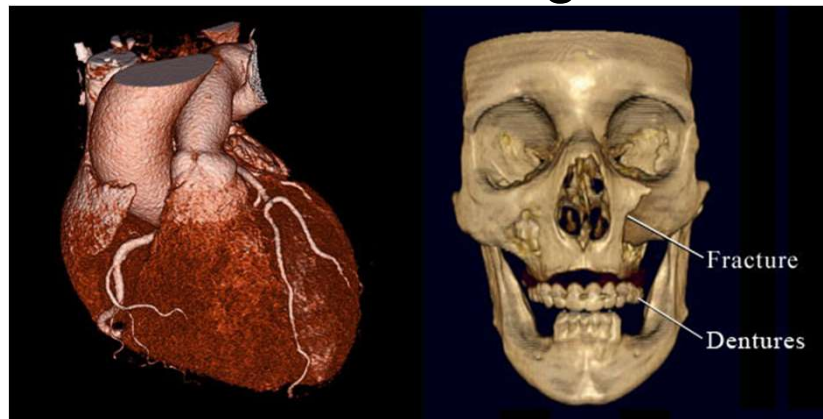
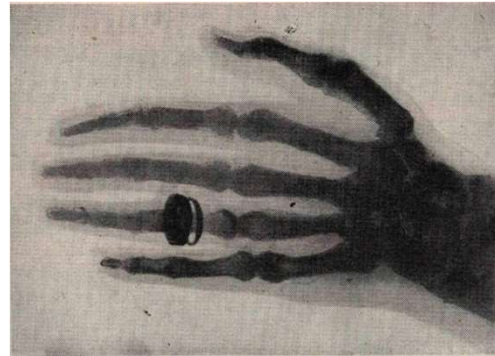
- Bremsstrahlung
- charakteristische Strahlung





## 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

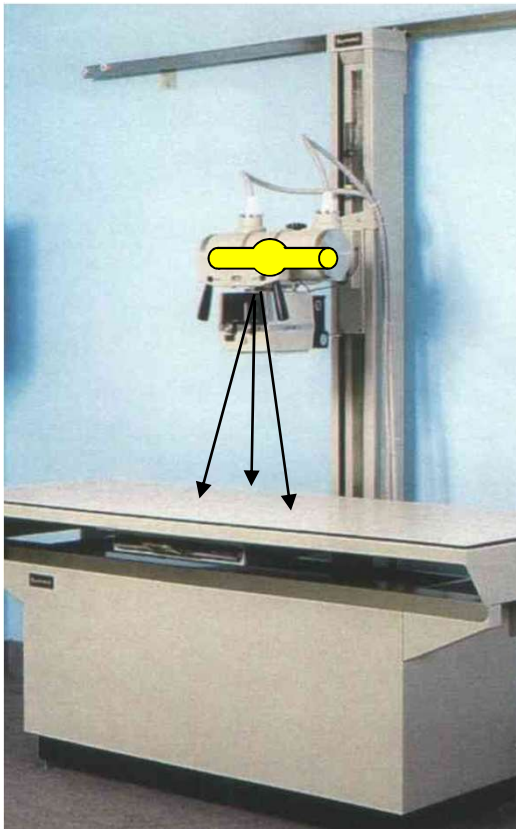
Röntgenstrahlung Entsteht wenn  
hochenergetische (beschleunigte)  
geladene Teilchen ihre Energie abgeben.

Elektronen  $E_{\text{kin}}$

Röntgenröhre (Diagnostik)  
Teilchenbeschleuniger (Therapie)

## Geräte zur Erzeugung der Röntgenstrahlung:

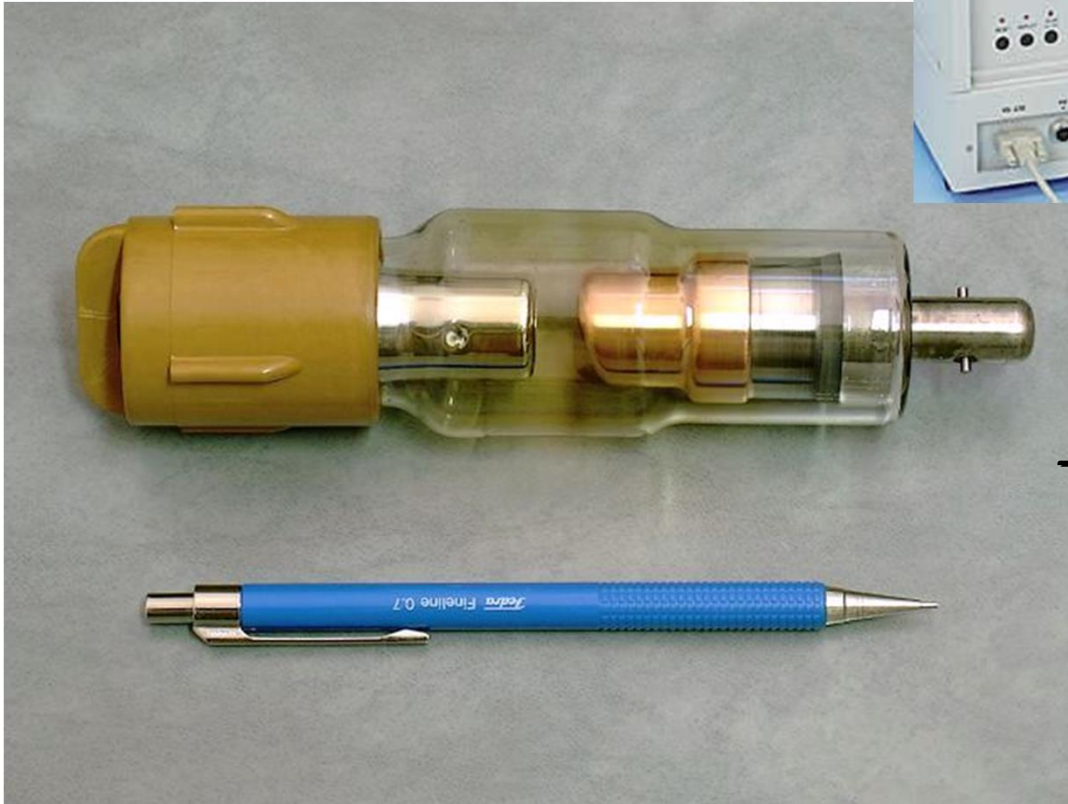
### Röntgenröhre



### Teilchenbeschleuniger



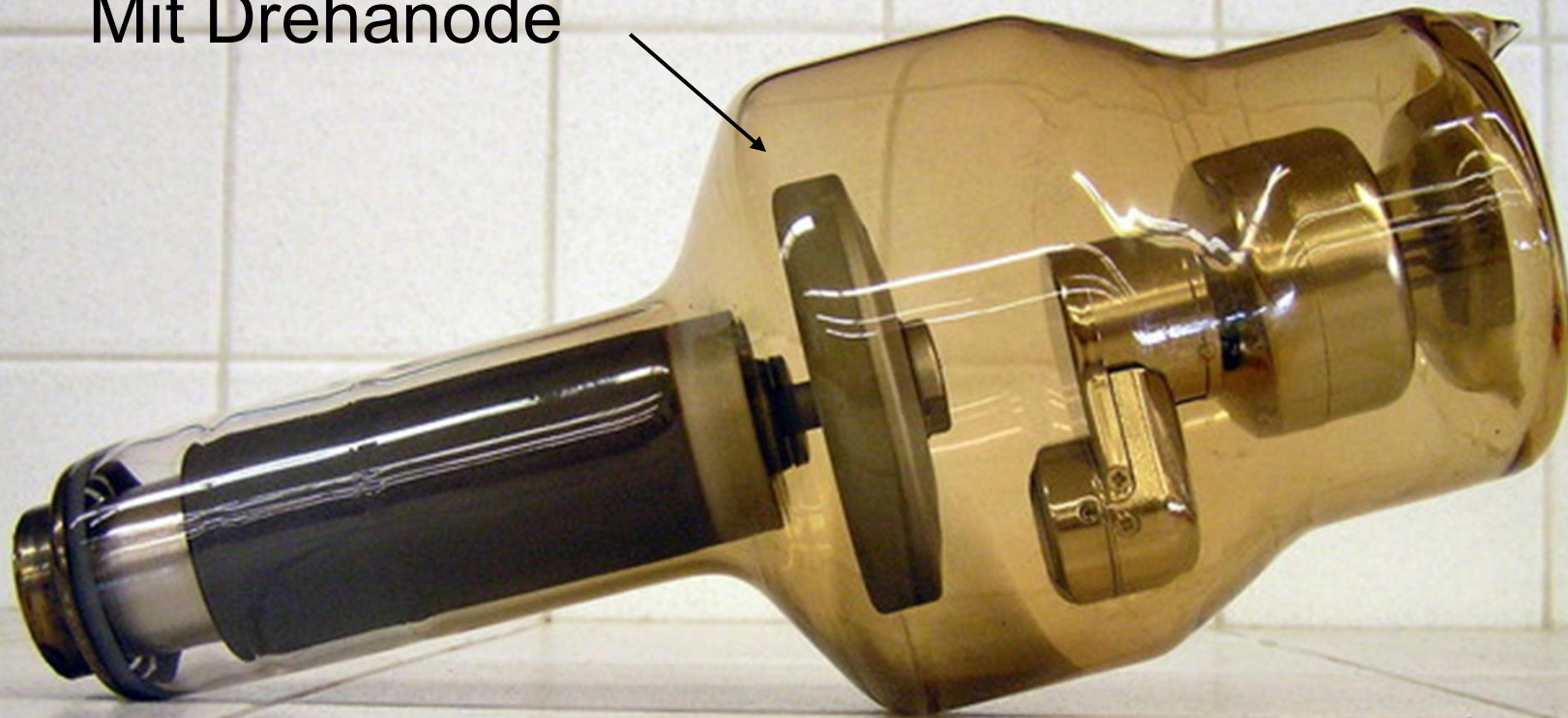




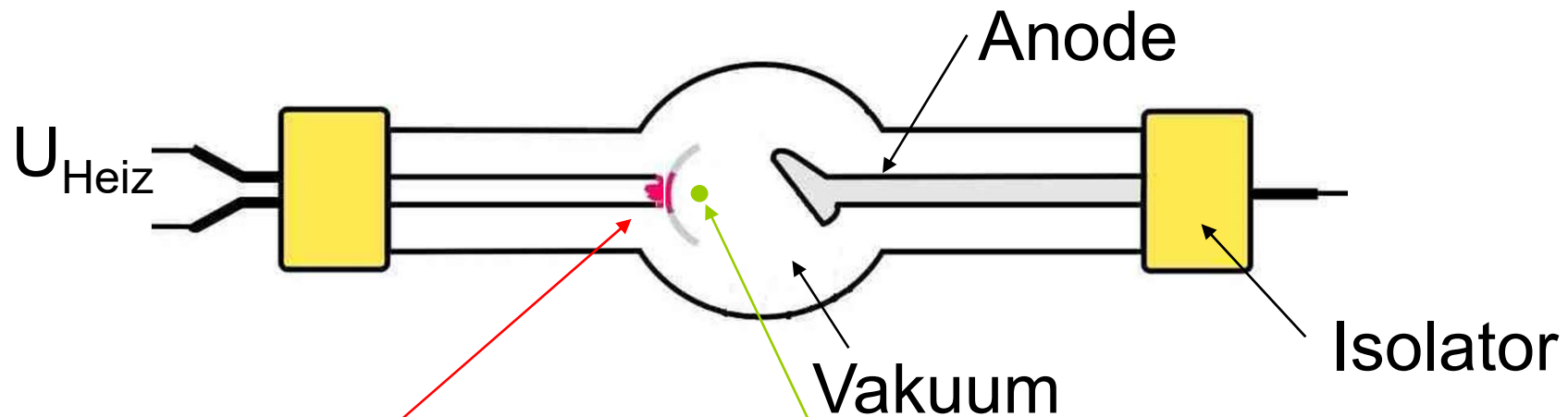




Mit Drehanode



# 1. Die Röntgenröhre

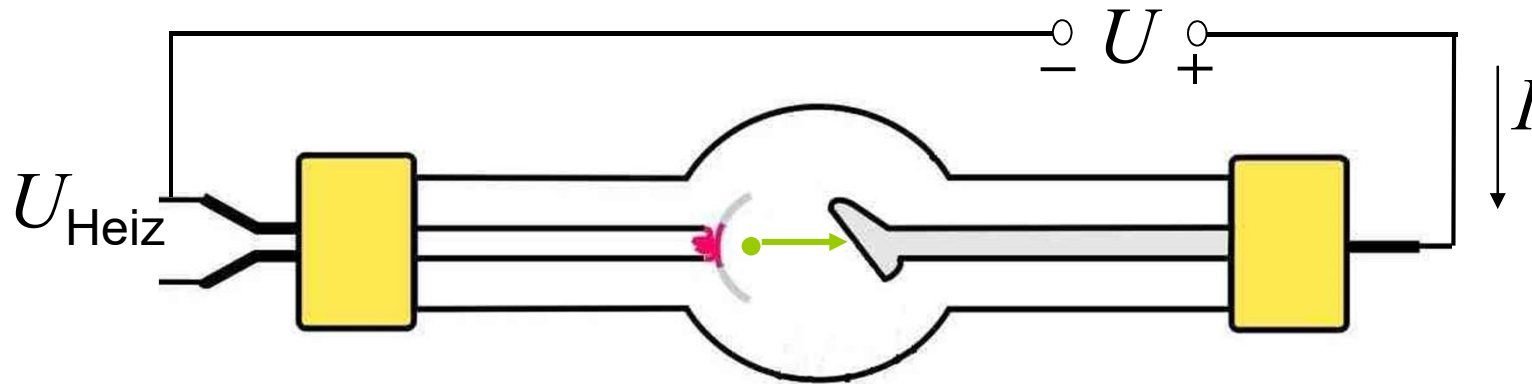


Heizkathode: Heizung (T Erhöhung)  $\Rightarrow$  Erhöhte thermische Energie  $\Rightarrow$  **Elektronen** treten aus der Kathode aus.

(Glühelektrischer Effekt)



# Die Röntgenröhre



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

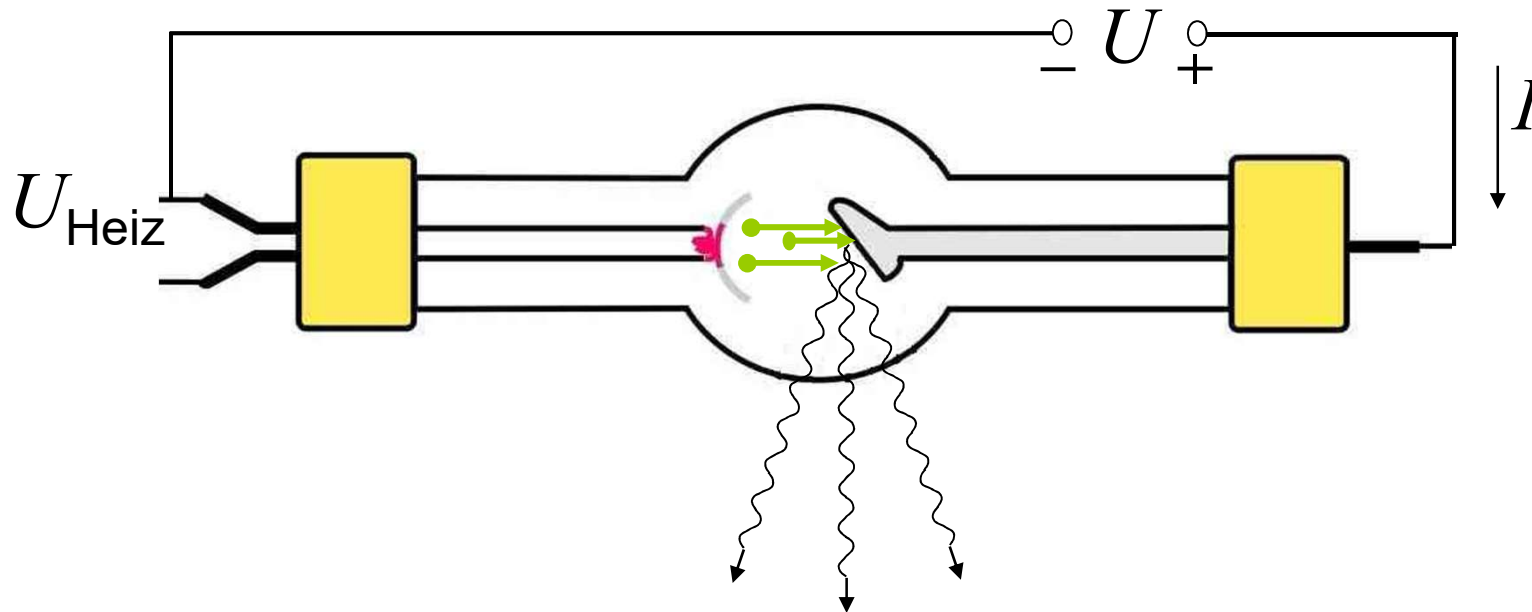
$$U \cdot e = E_{\text{kin}}$$

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

kinetische Energie  
des beschleunigten Elektrons



# Die Röntgenröhre



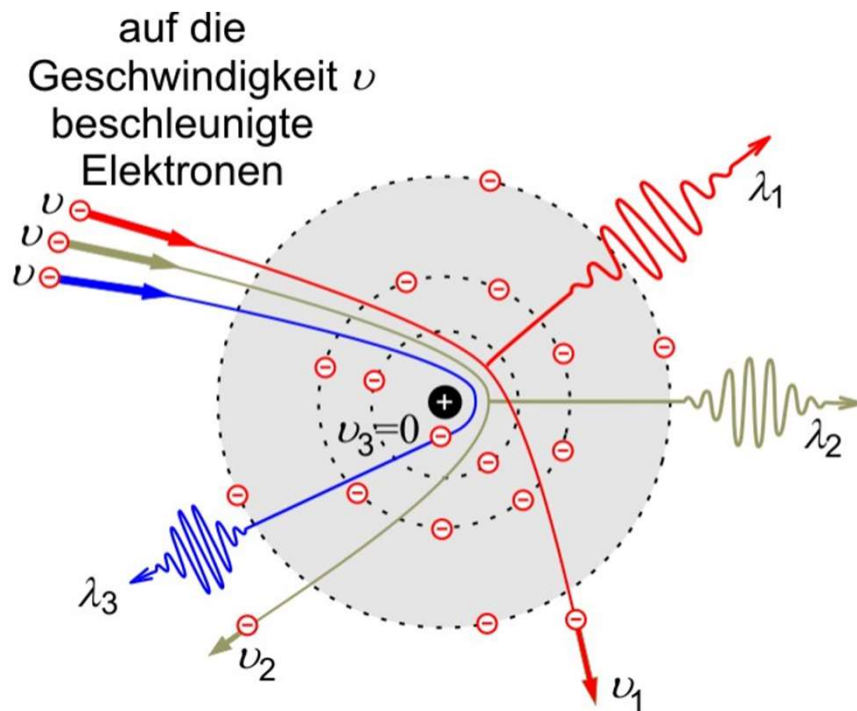
Röntgenstrahlung entsteht wenn die beschleunigten Elektronen auf die Anode prallen.

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

## 2. Bremsstrahlung

### a) Duane-Hunt Gesetz

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



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

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

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

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

## Duane-Hunt Gesetz

Grenzwellenlänge:

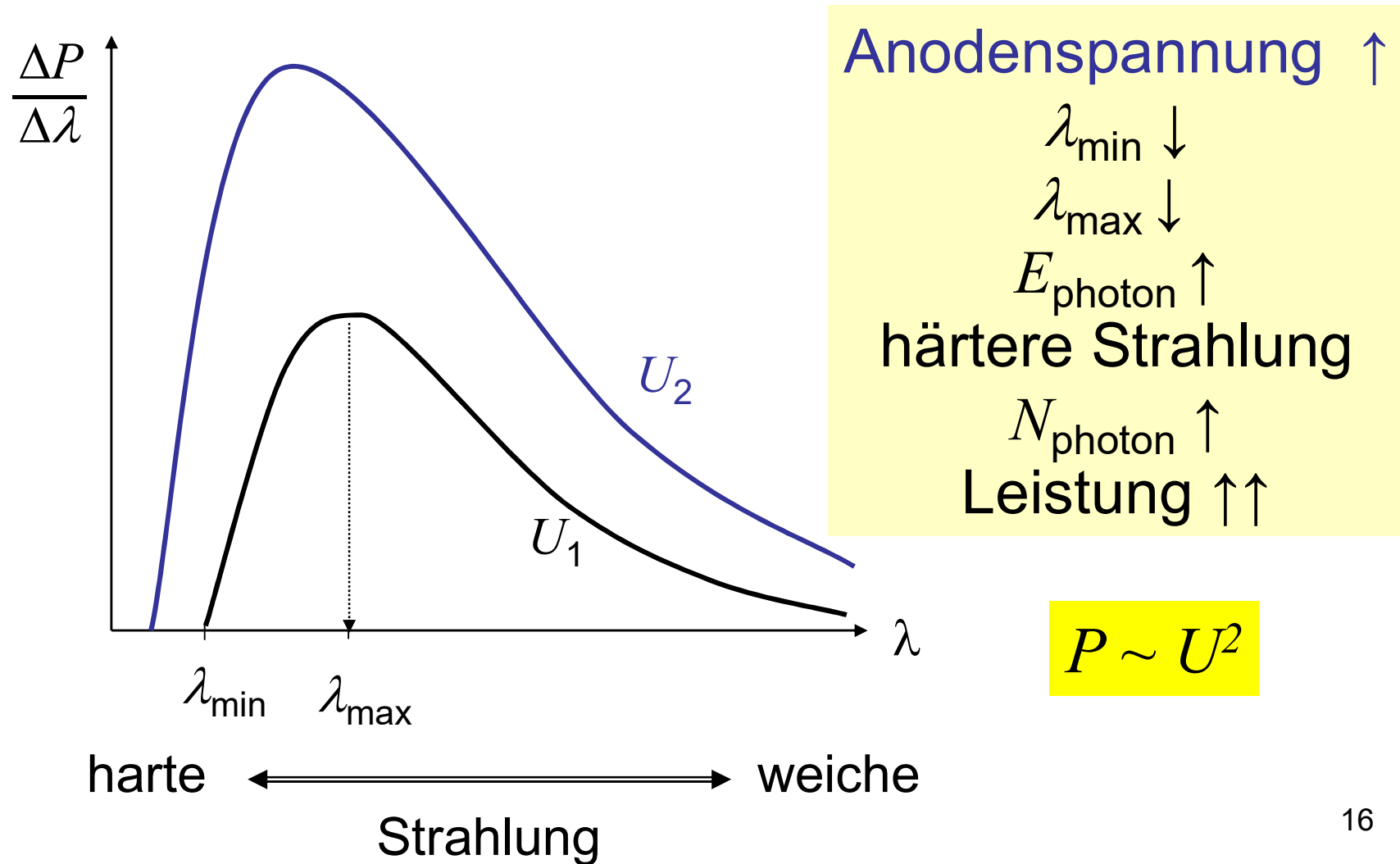
$$\lambda \geq \frac{hc}{U_e} = \lambda_{\min}$$

Konst.

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

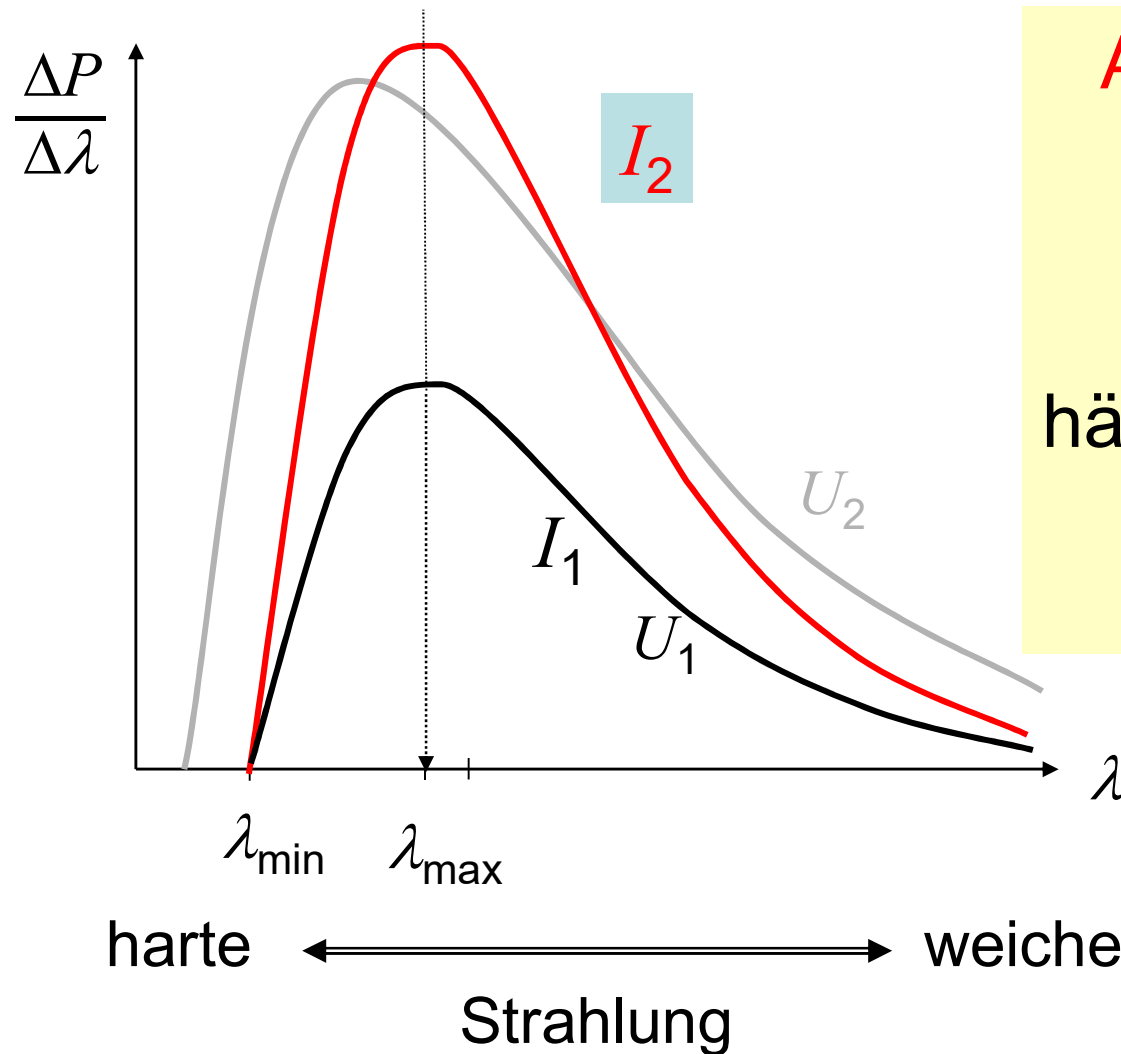
nicht SI  
aber praktische  
Einheit

## b) Emissionsspektrum der Bremsstrahlung





# Emissionsspektrum der Bremsstrahlung



Anodenstrom  $\uparrow$

$\lambda_{\min}$  -

$\lambda_{\max}$  -

$E_{\text{photon}}$  -

härte d. Strahlung -

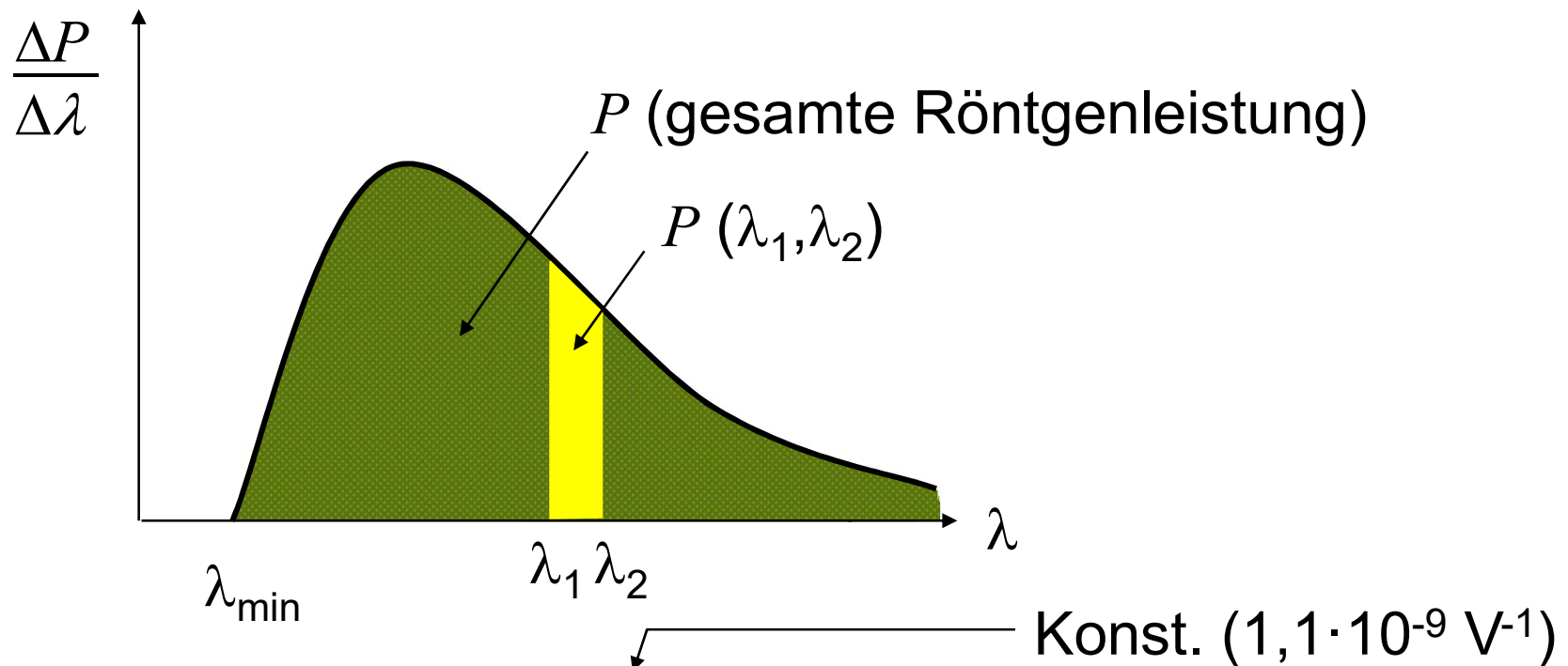
$N_{\text{photon}}$   $\uparrow$

Leistung  $\uparrow$

$$P \sim I$$

~~Ohm~~

### c) Leistung der Röntgenstrahlung



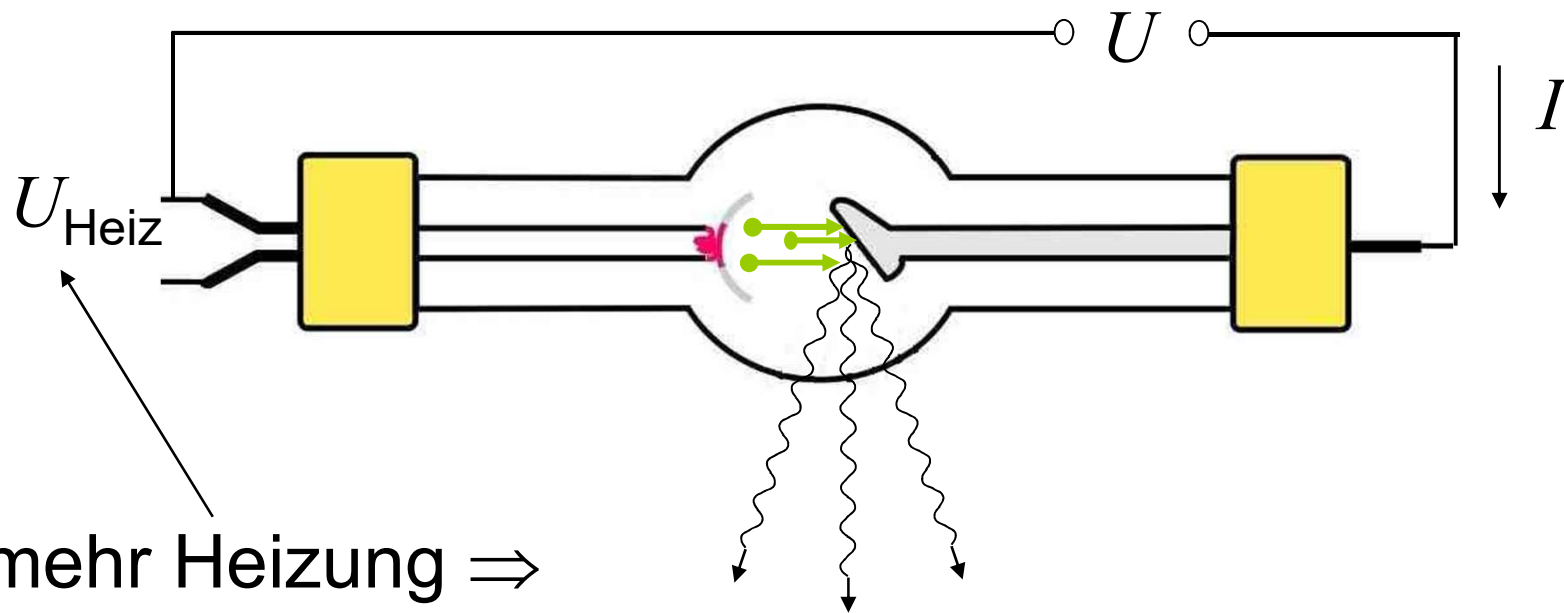
Konst. ( $1,1 \cdot 10^{-9} \text{ V}^{-1}$ )

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

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  $\eta$  : 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 !

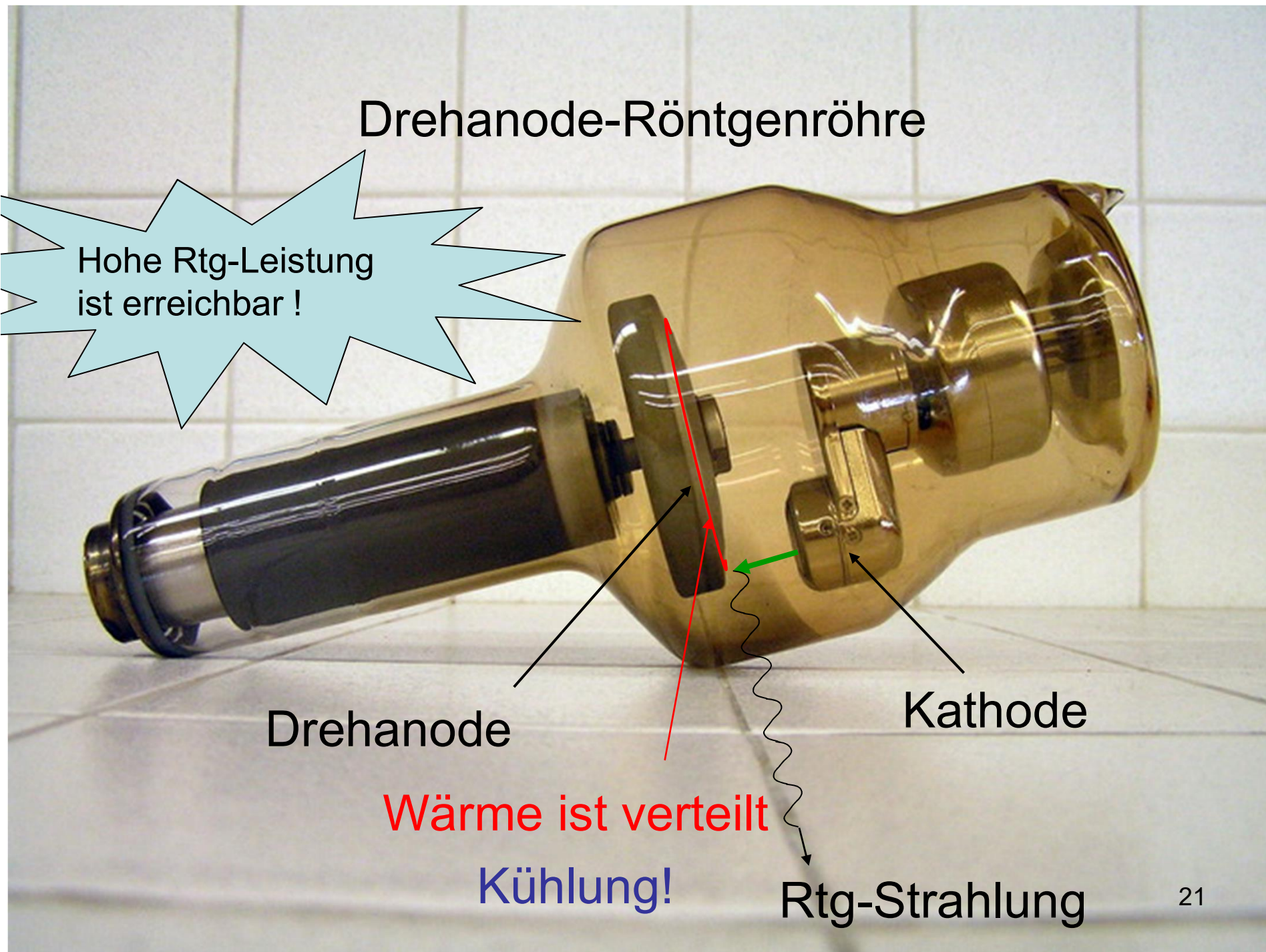
Drehanode

Kathode

Wärme ist verteilt

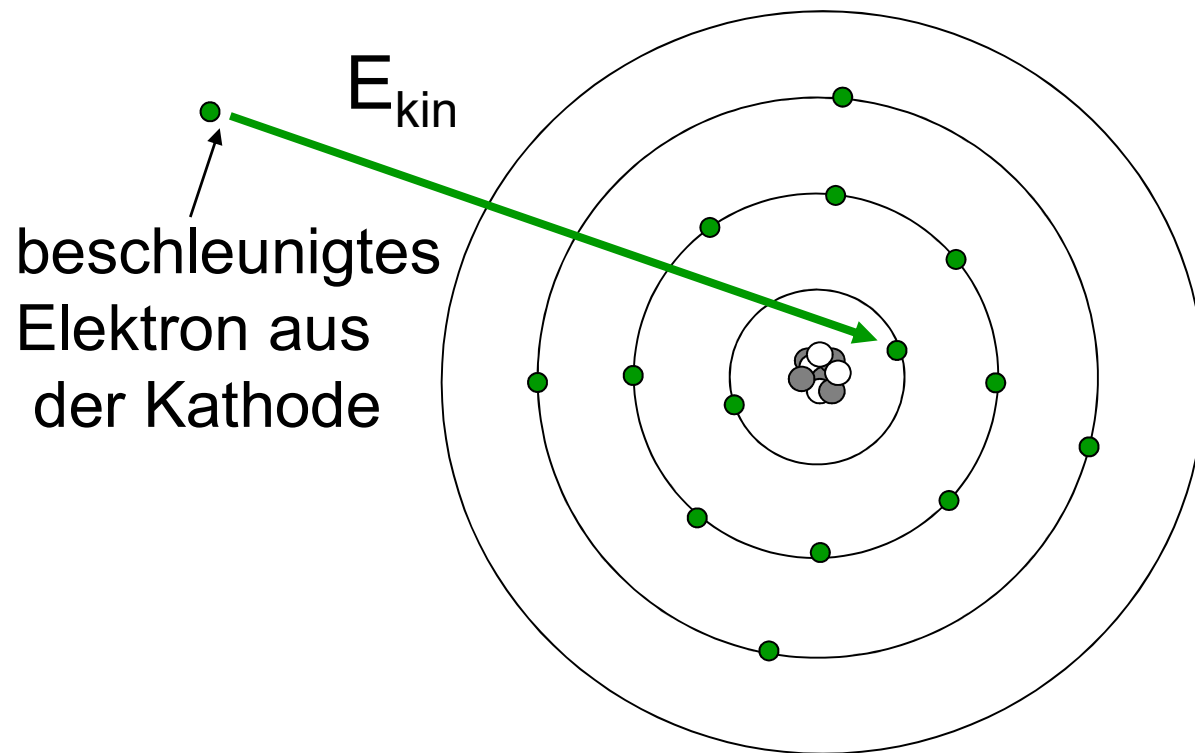
Kühlung!

Rtg-Strahlung



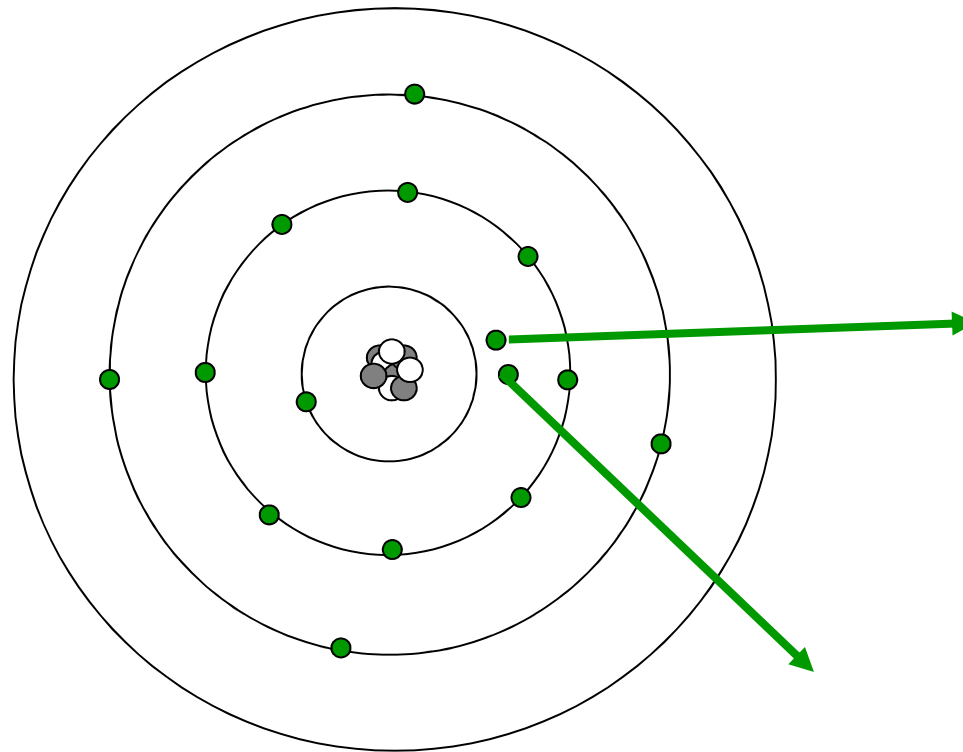
### 3. Charakteristische Röntgenstrahlung

#### a) Entstehung



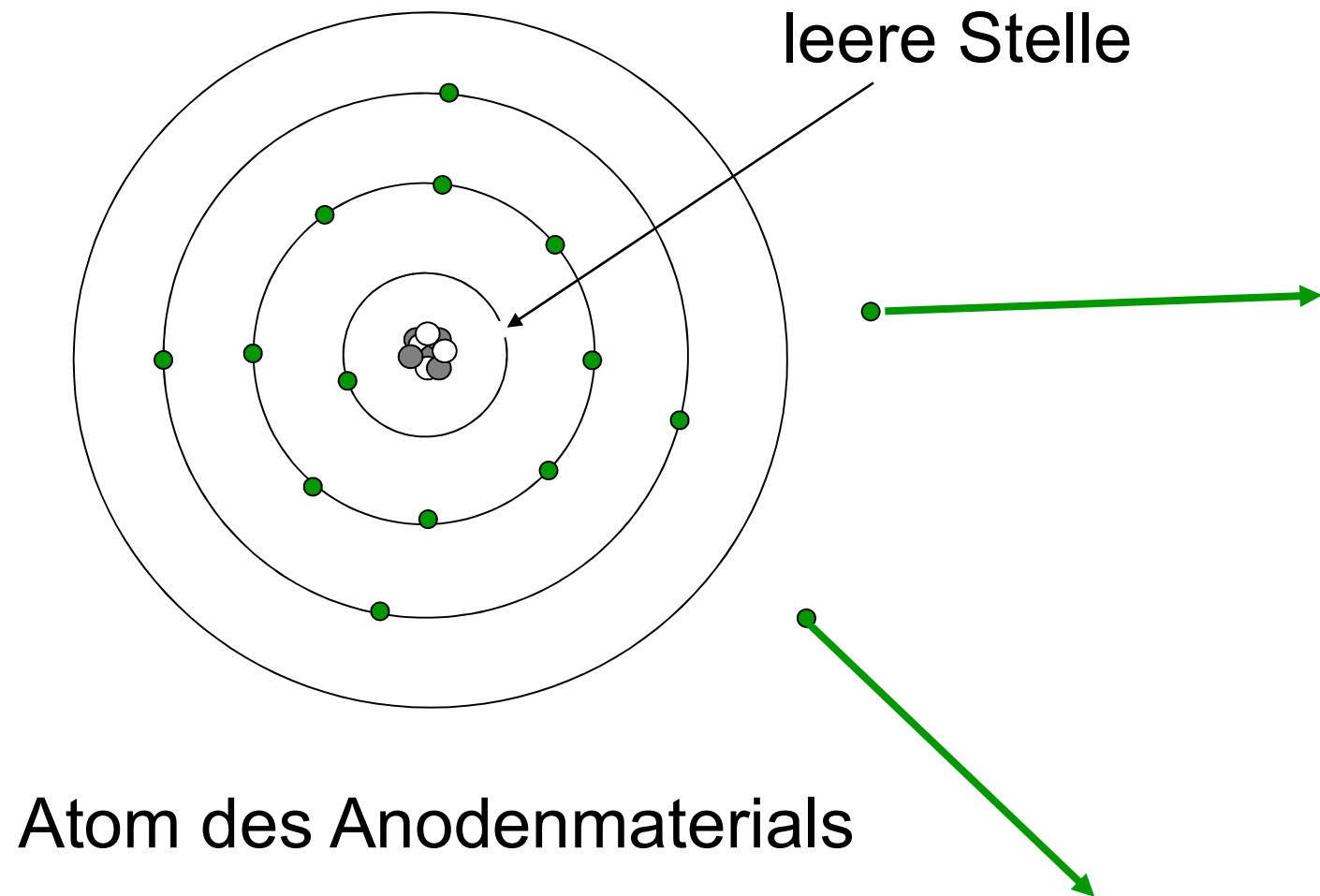
Atom des Anodenmaterials

## Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung



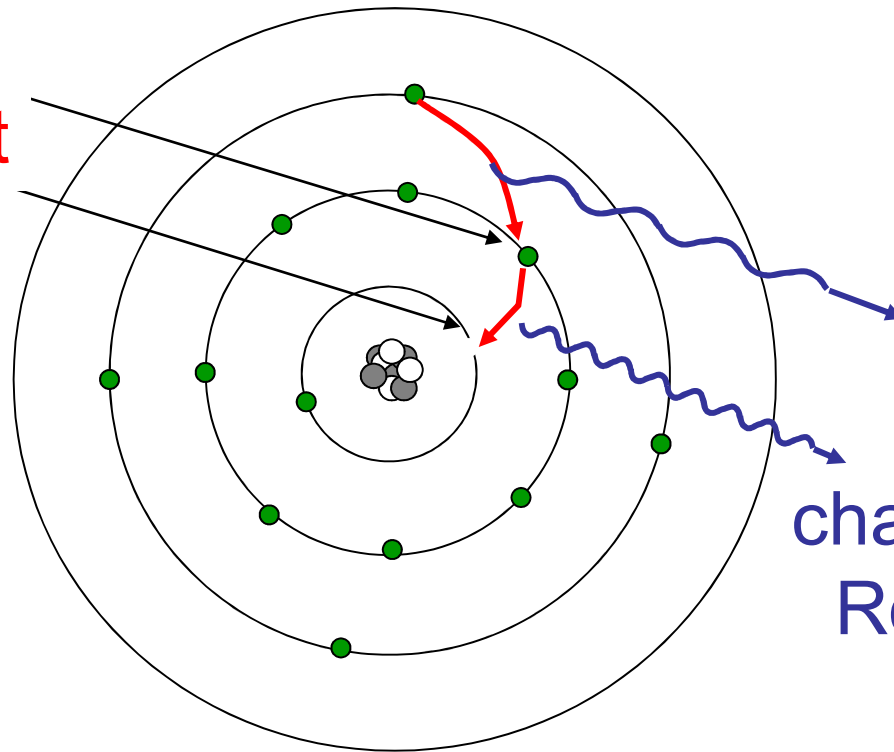
Atom des Anodenmaterials

## Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung



## Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung

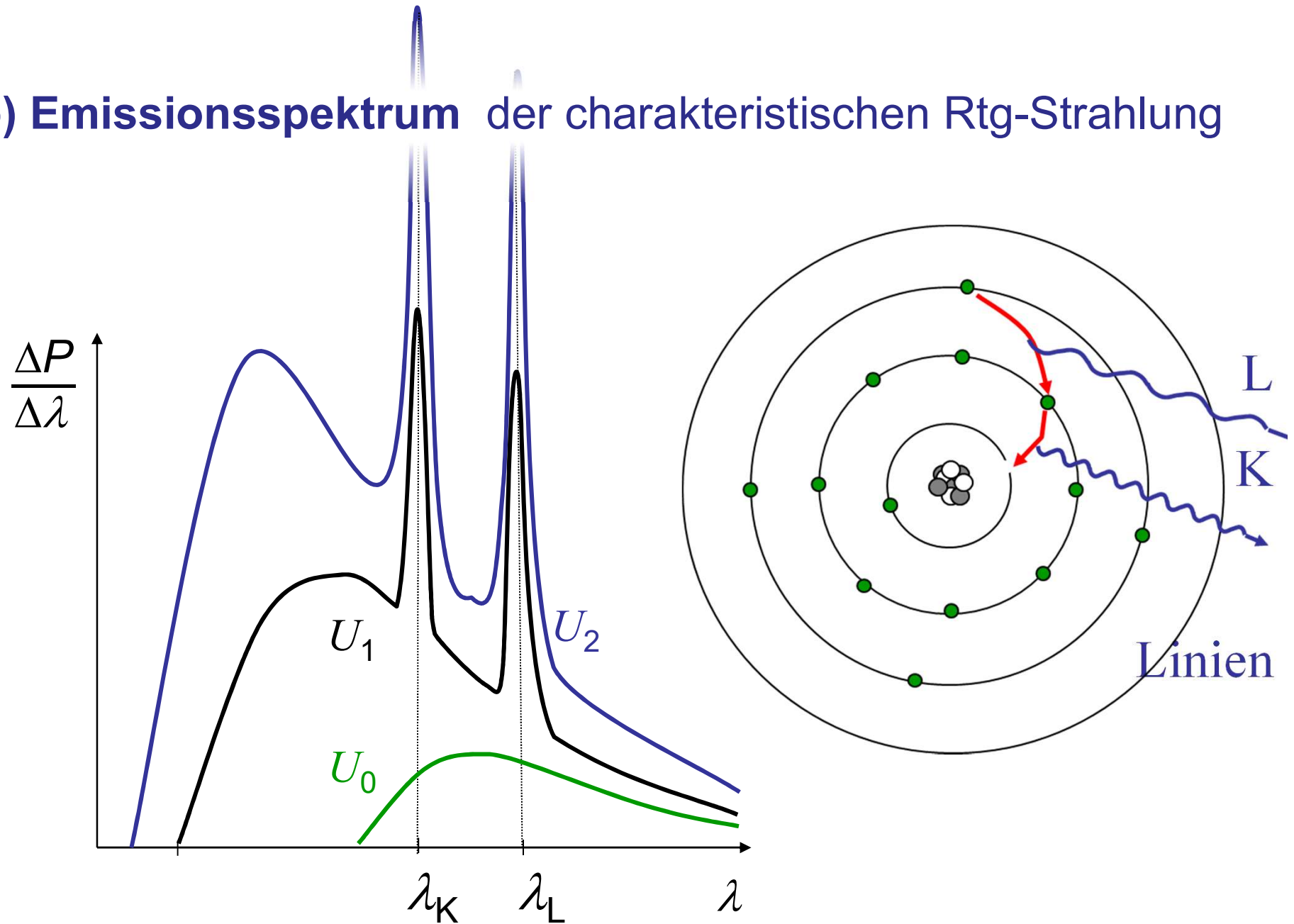
leere Stellen  
werden gefüllt



charakteristisches  
Röntgenphoton  
 $hf = \Delta E$

Atom des Anodenmaterials

## b) Emissionsspektrum der charakteristischen Rtg-Strahlung





### **c) Anwendung der charakteristischen Röntgenstrahlung**

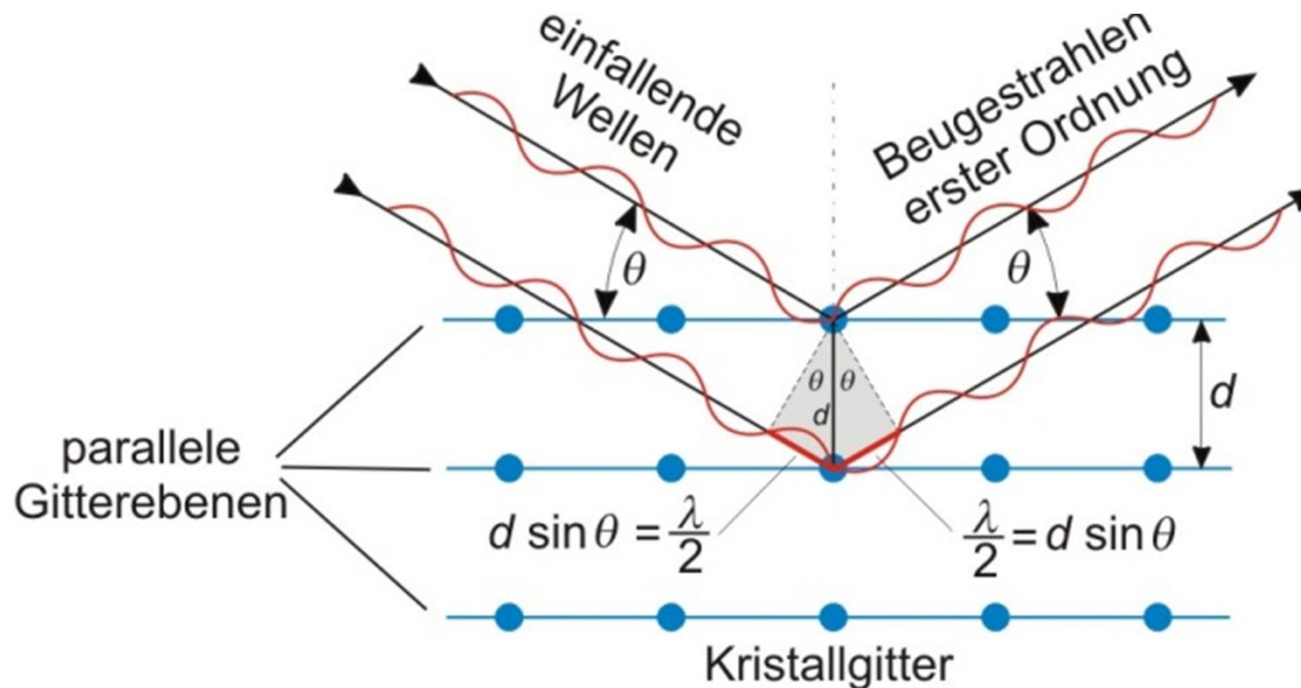
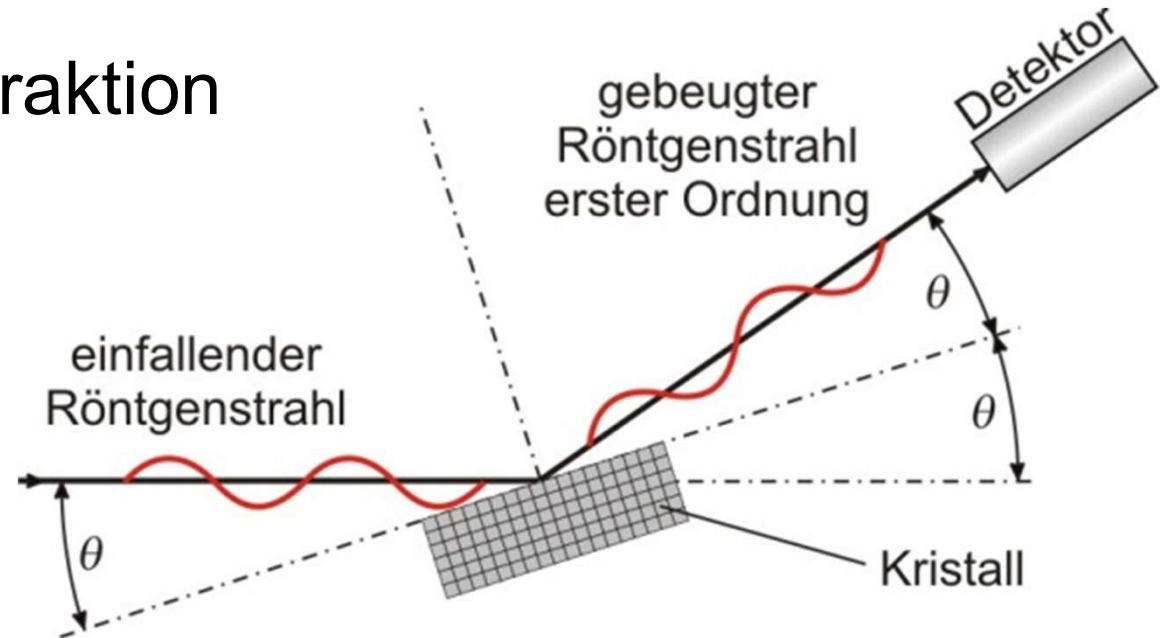
fast monochromatische Röntgenstrahlung

-Diagnostik (zB.: Mammographie)

-Strukturanalyse der Materie (Röntgenbeugung)

# Umweg: Röntgendiffraktion

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



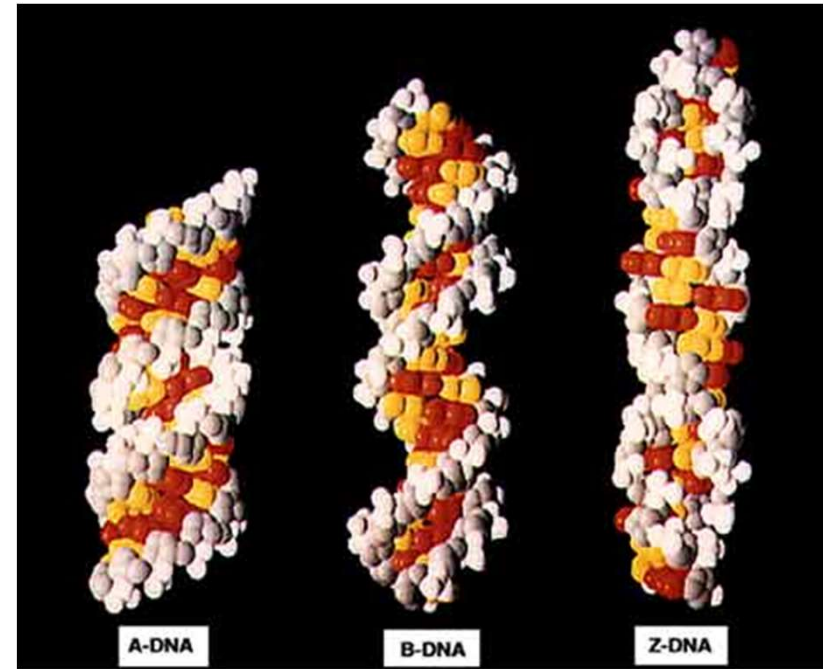
Bragg-Gleichung:

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

Beispiele:

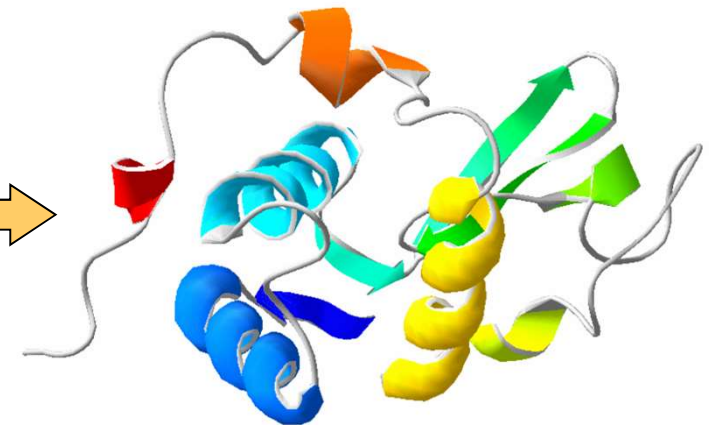
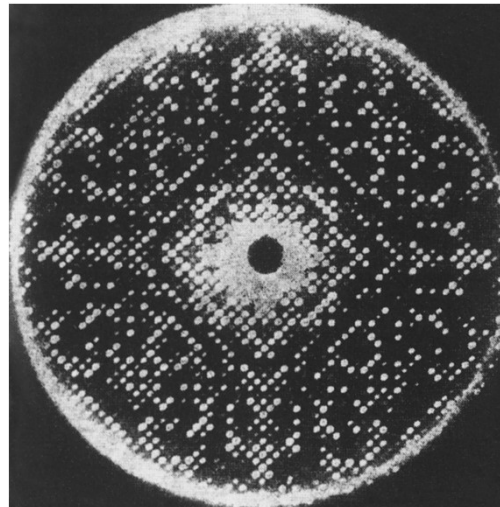
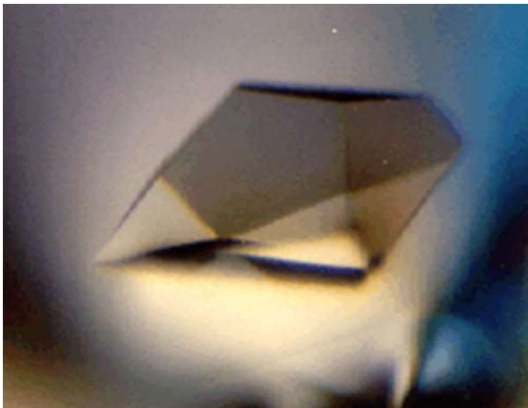


DNA



Lysozyme

Protein-Kristall



# PDB Database: 3D Makromolekülstrukturen meistens mit Hilfe der Rtgdiffraktion bestimmt

RCSB PDB - Mozilla Firefox

12.02.2023: mehr als 200000 !

Fájl Szerkesztés Nézet Előzmények Könyvjelzők Eszközök Súgó

www.rcsb.org

RCSB PDB PROTEIN DATA BANK

PDB-101

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:

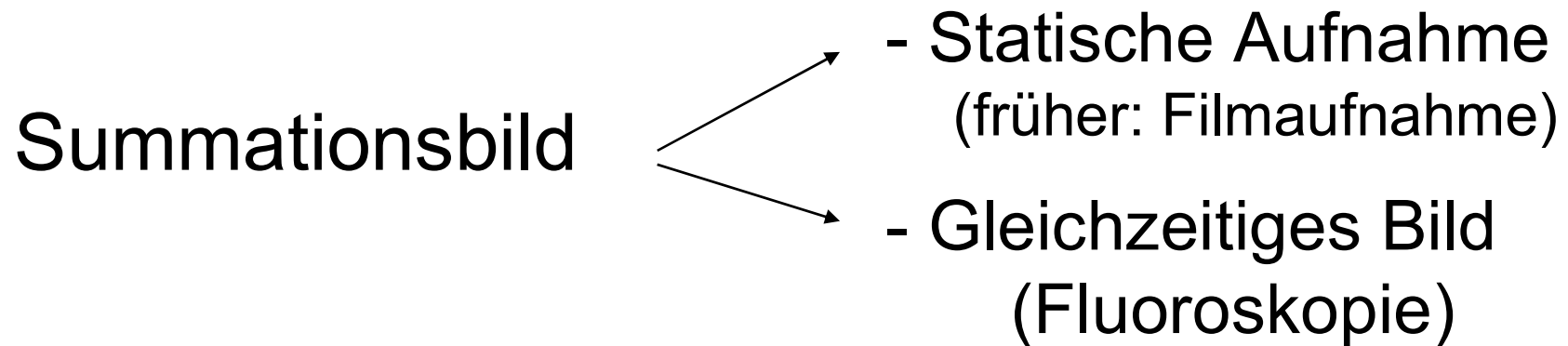
Website Release Archive: [dropdown]

RCSB PDB News Hide



# III. Physikalische Grundlagen der Röntgendiagnostik

## Röntgendiagnostische Verfahren



Spezialitäten: Anwendung von Kontrastmitteln,  
Digitalisierung, Substraktion

# 1. Schwächung der Röntgenstrahlung

## a) Schwächungsgesetz

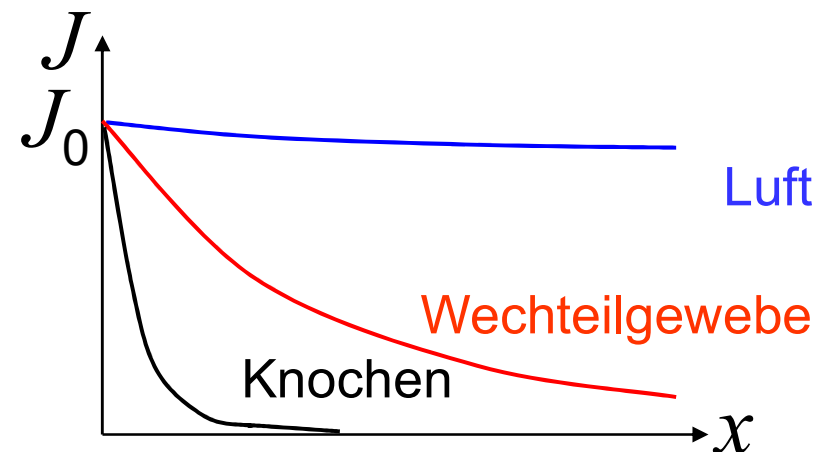
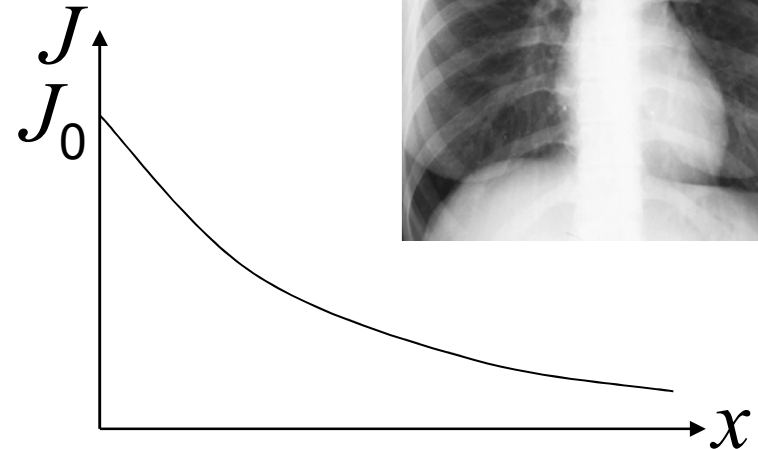
$$J = J_0 \cdot e^{-\mu x}$$

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

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

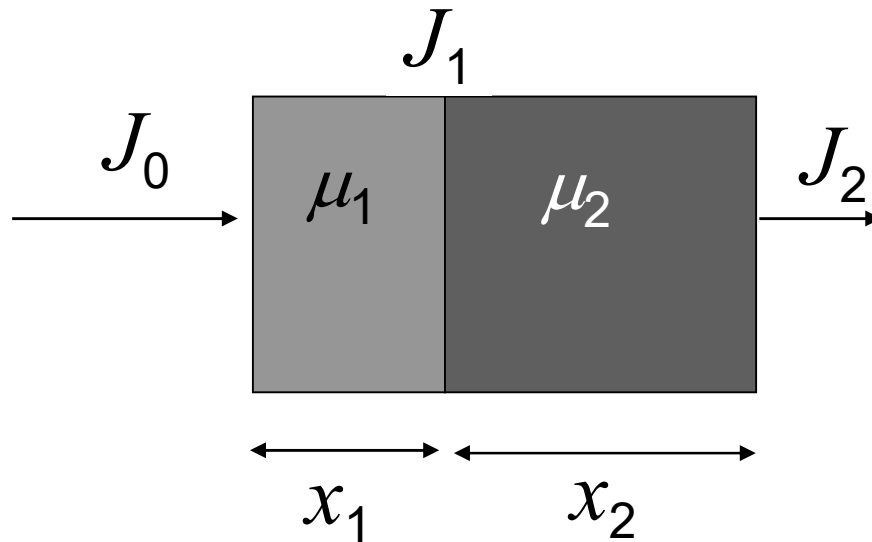
Massen-  
schwächungs-  
koeffizient

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





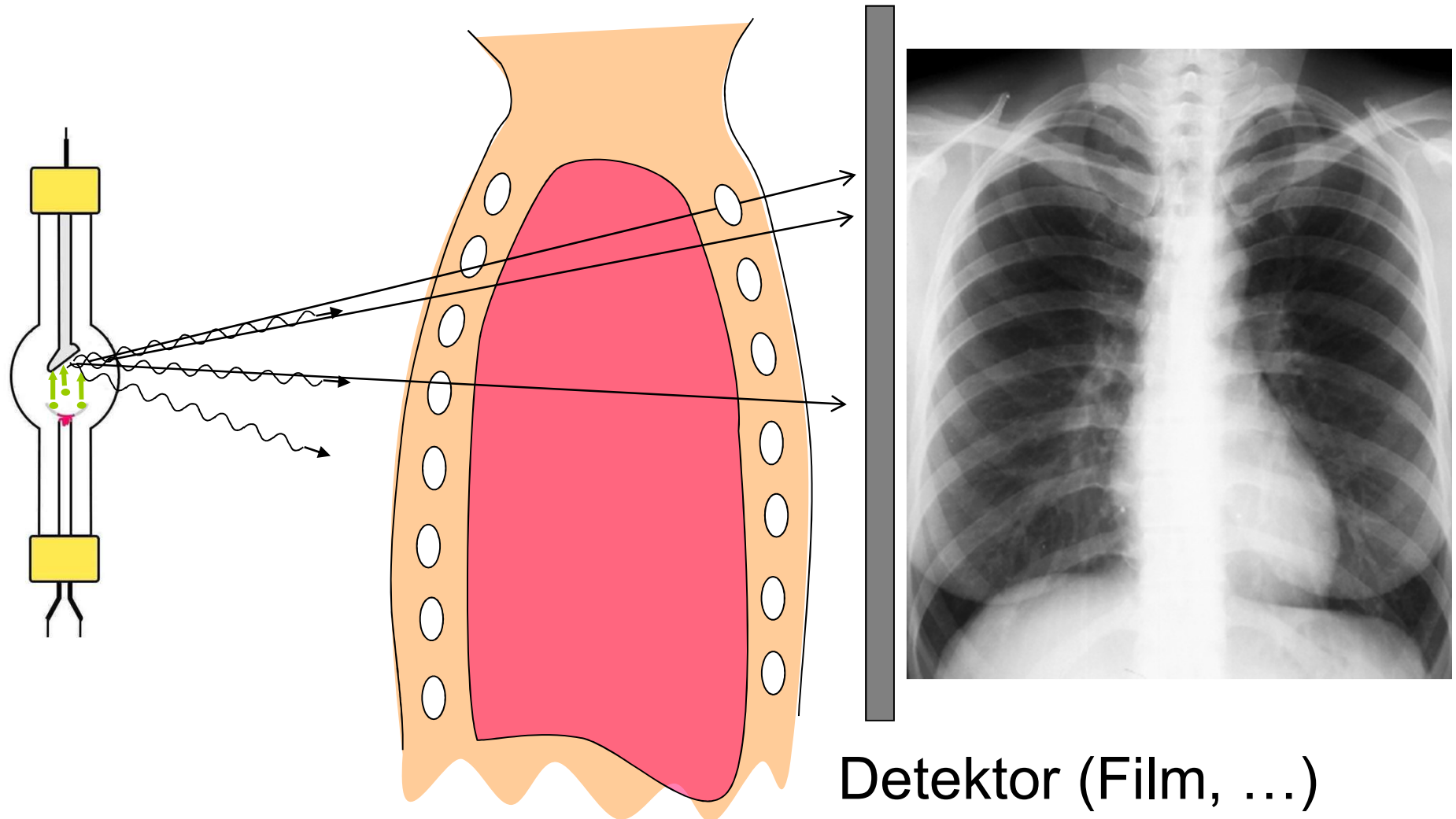
## b) Absorption von inhomogenen Körper



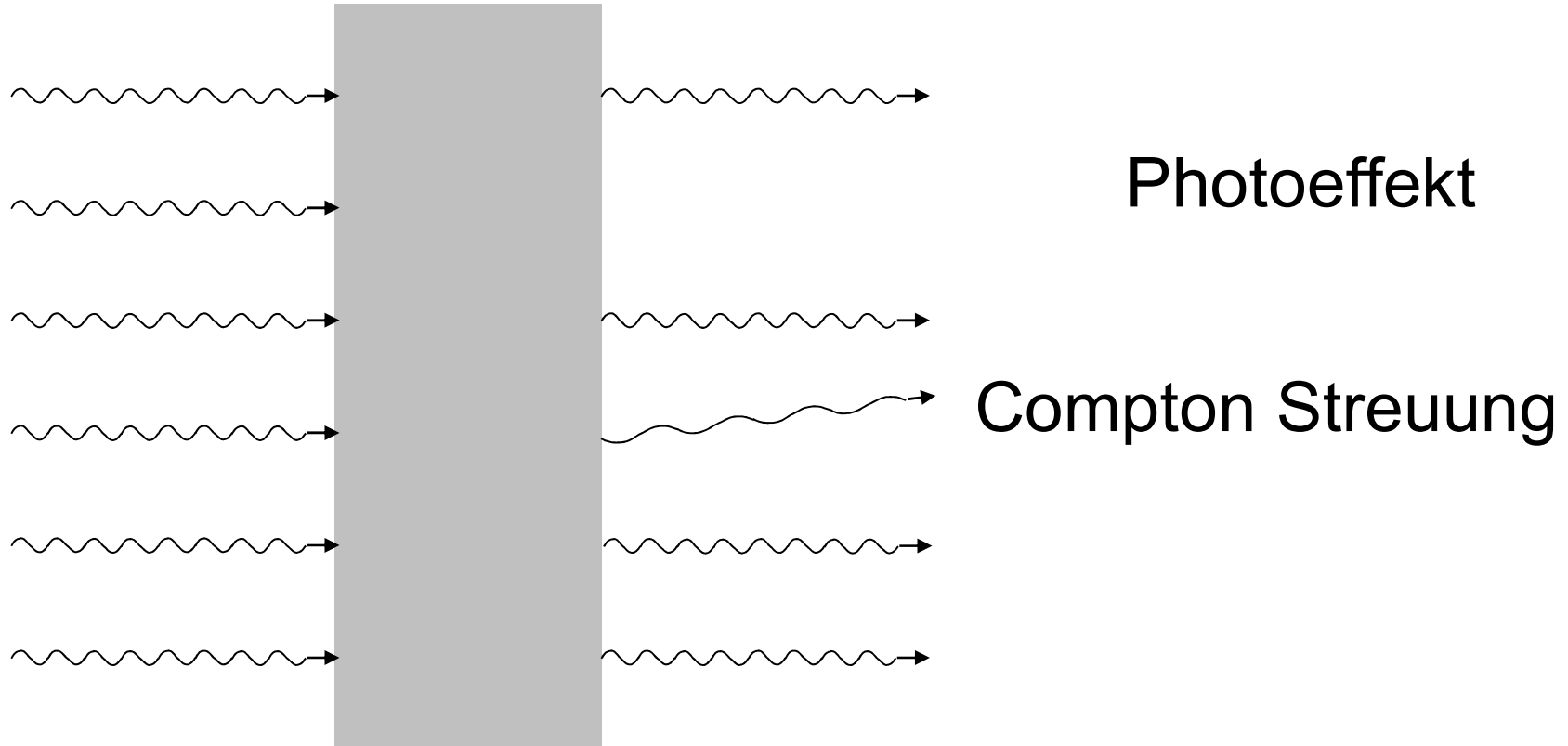
$\mu \cdot x$  Werte sind  
addiert  
(summiert)  
Summationsbild

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

### c) Grundprinzip der Summationsaufnahmen



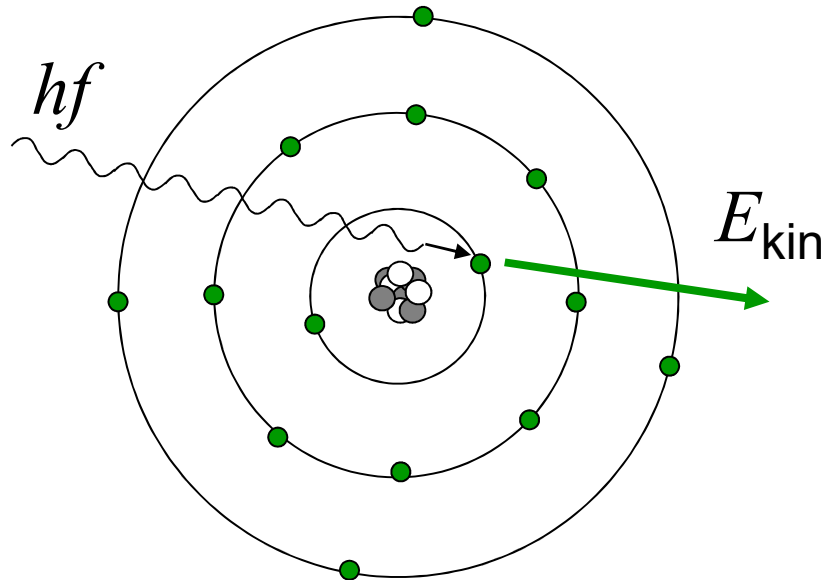
## 2. Teilprozesse der Schwächung der Röntgenstrahlung



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

unterschiedliche Stoff( $Z$ )-  
und  $\lambda$  (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**

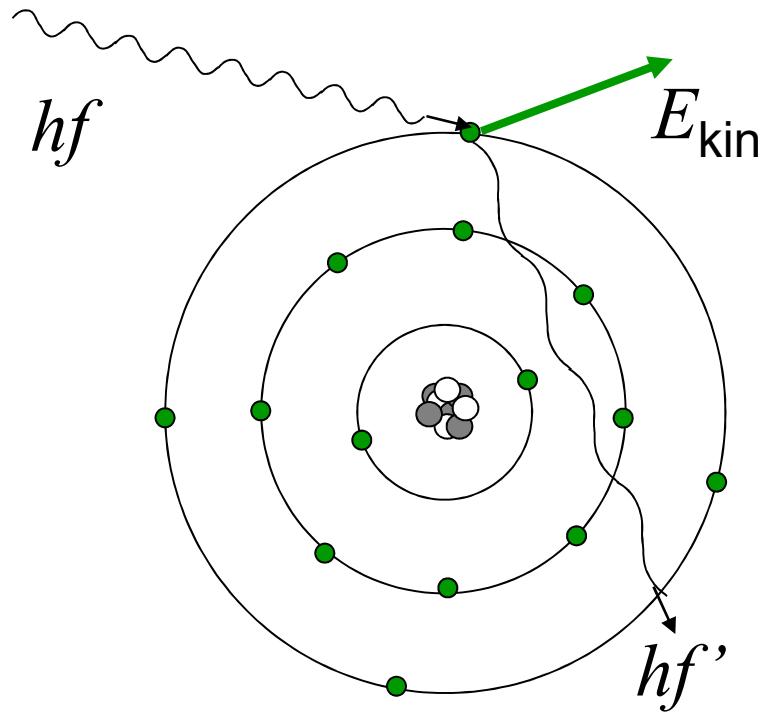
110%=1,1

$1,1^3=1,331$

**33%  $\tau_m$  Unterschied!**

bei weicher Strahlung

## b) Compton Streuung



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

praktisch unabhängig von  $Z$  !

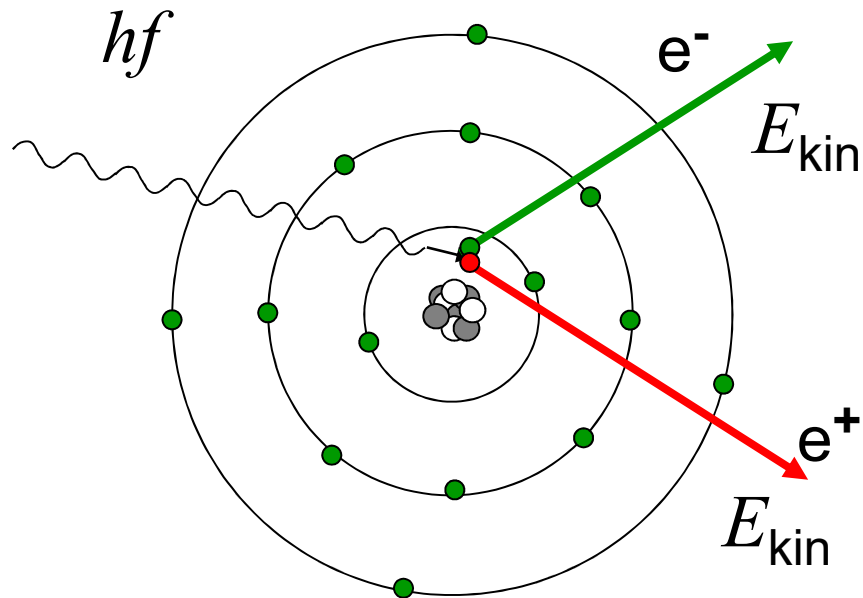
zB:

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

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



### c) Paarbildung



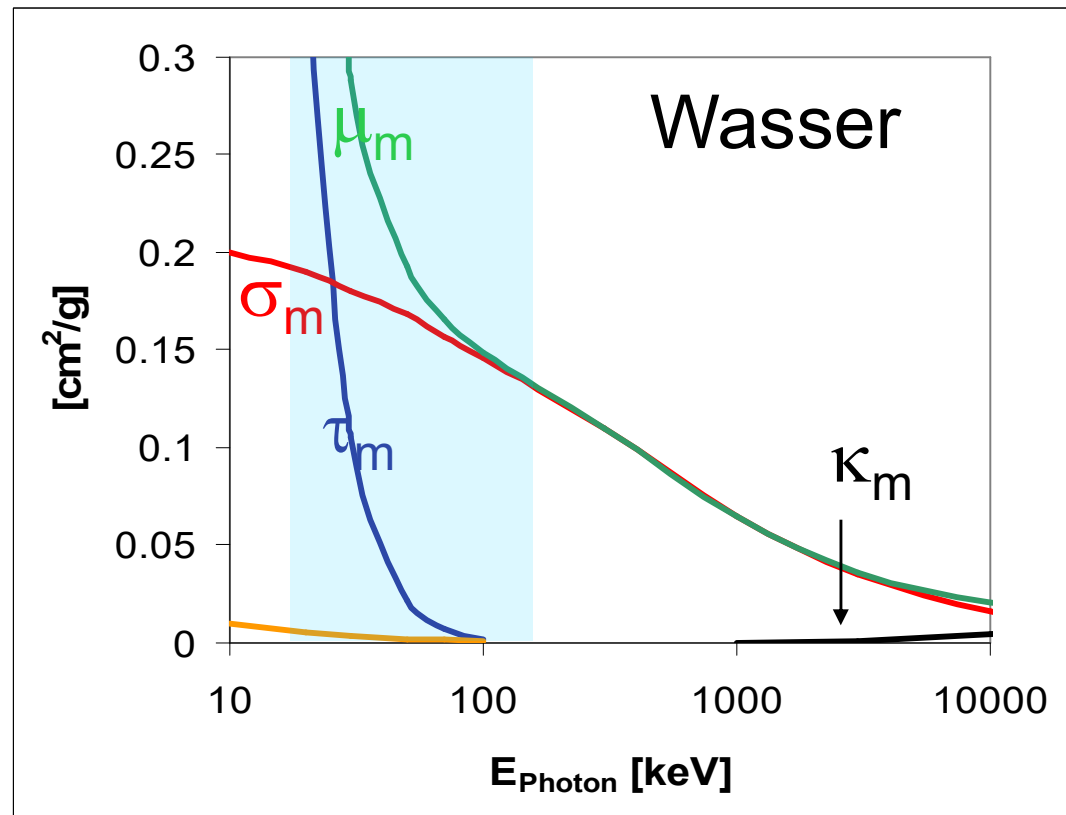
$$hf \geq 2 m_e c^2 \approx 1\text{MeV}$$

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

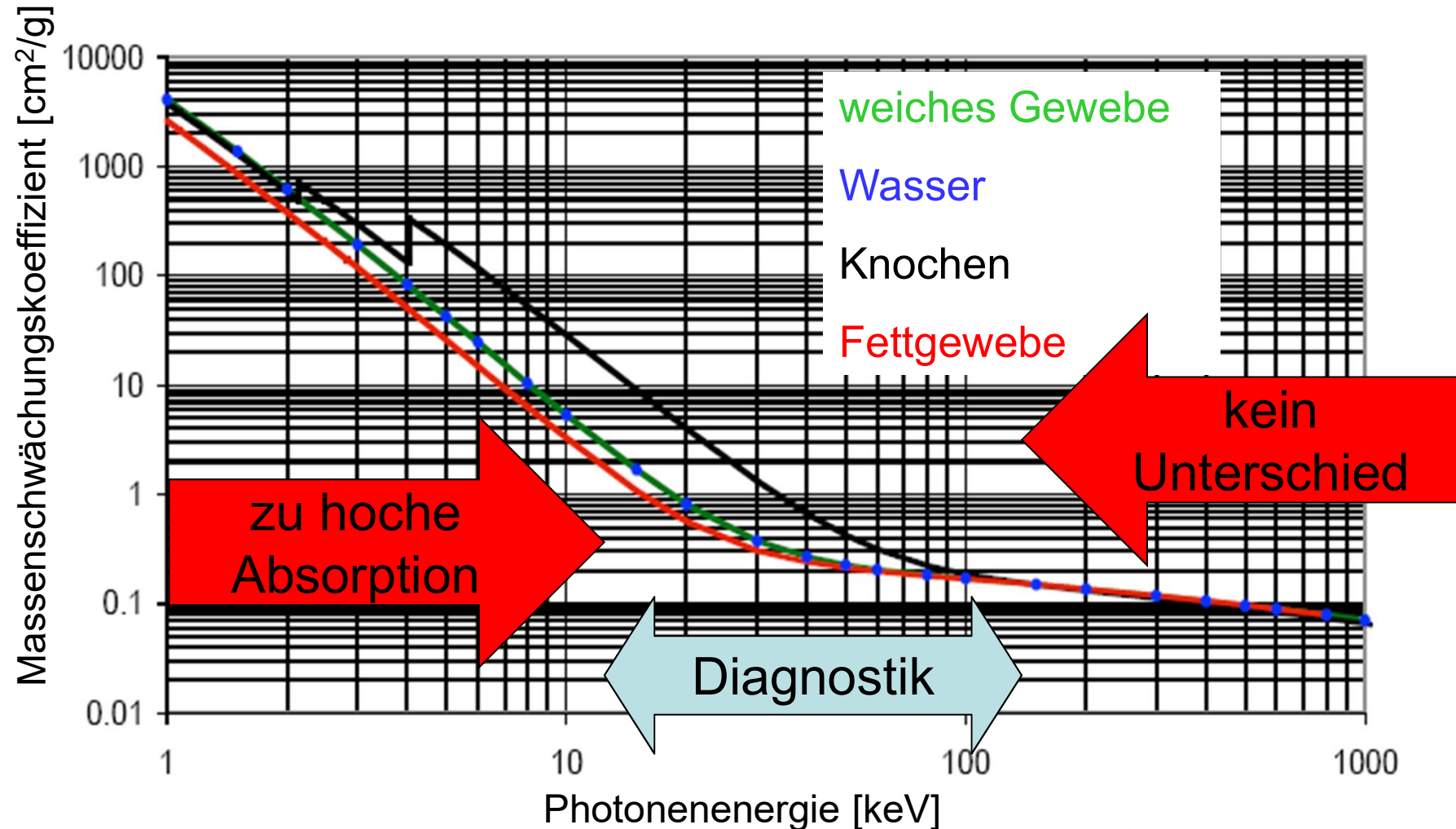
Bei diagn. Rtg kommt  
nicht vor!

(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	
<b>Photoeffekt</b>	$\sim 1 / E^3$	$\sim Z^3$	<b>10 - 100 keV</b>
<b>Compton- Effekt</b>	Nimmt ab mit E	unabhängig $\sim Z/A$	<b>0.1 - 5 MeV</b>
<b>Paarbildung</b>	Nimmt zu mit E	$\sim Z^2$	<b>&gt; 5 MeV</b>

**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:  $\approx 6$       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:

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

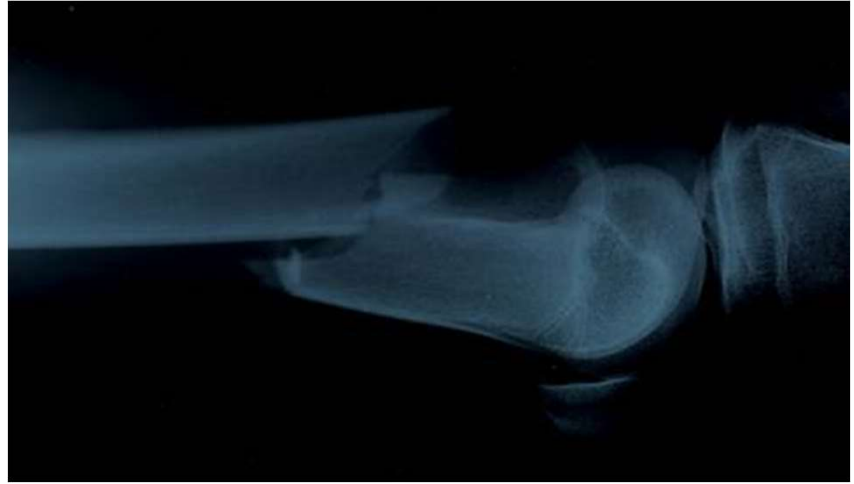
$$\mu_m = \tau_m + \sigma_m$$

$$\mu = \mu_m \varrho$$

$$\begin{aligned} \varrho_{wG} &= 1,05 \\ \varrho_{Knochen} &= 1,7..1,8 \end{aligned}$$

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)

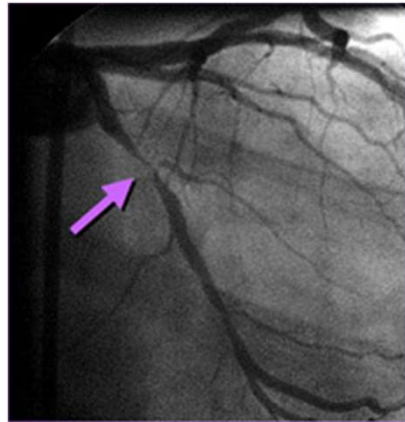
Blutgefäß  
(Angiographie)

Barium (Z=56)

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

# Angiographie

## Kontrastmittel in den Blutgefäße







Negatives Kontrastmittel:

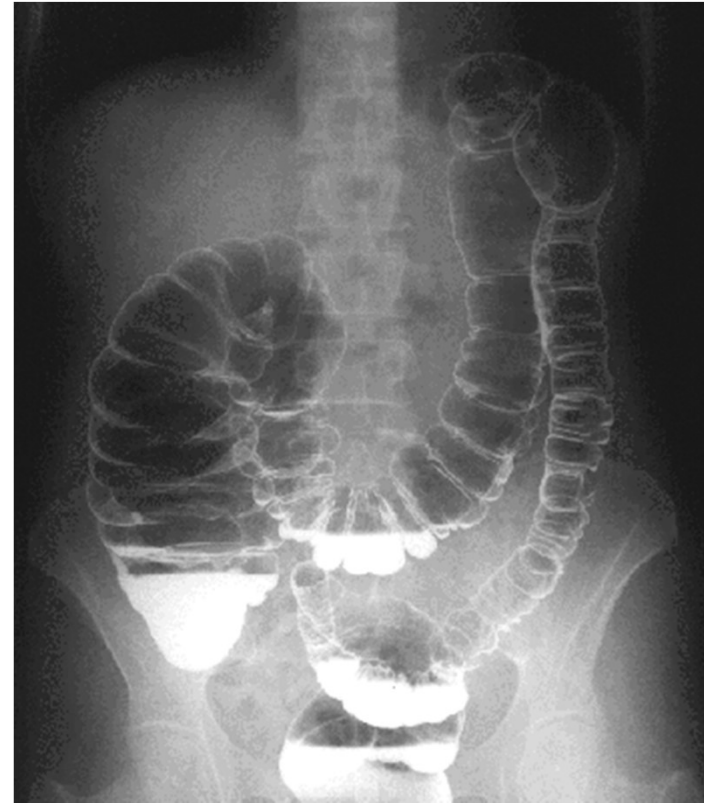
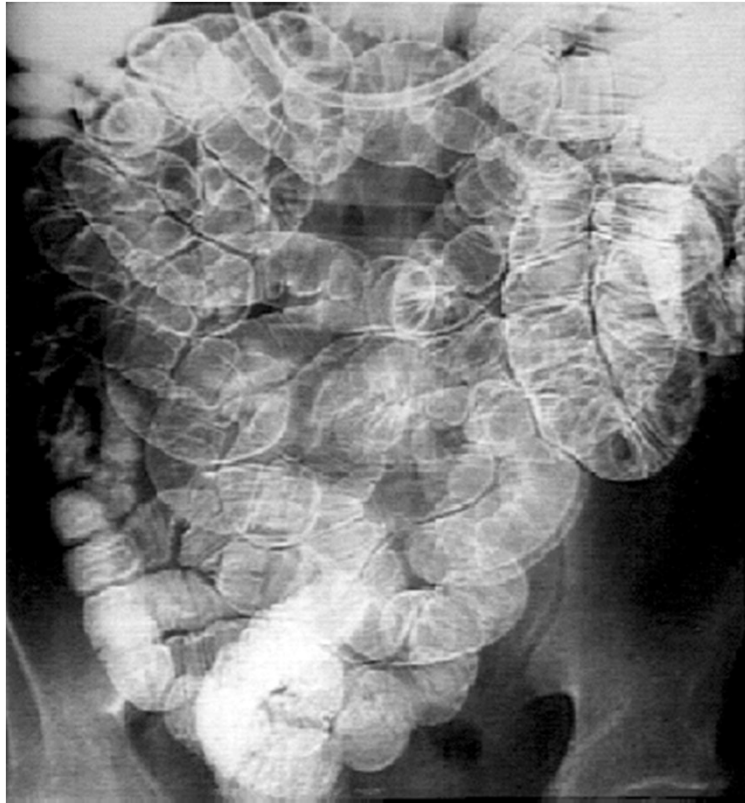
wenige Absorption  $\mu \downarrow$   $\rho \downarrow$   $\mu_m - Z_{\text{eff}} -$

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



Danke für Ihre Aufmerksamkeit!



Hausaufgaben:  
2.86-88, 90-92