

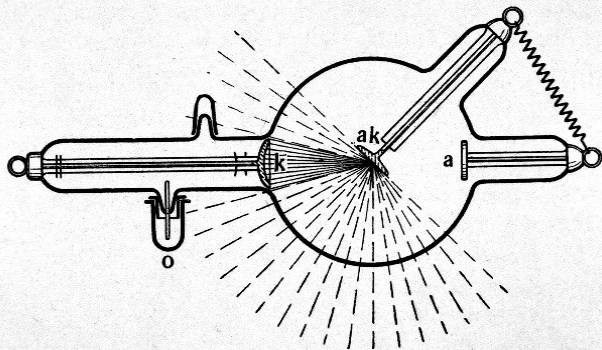
1895



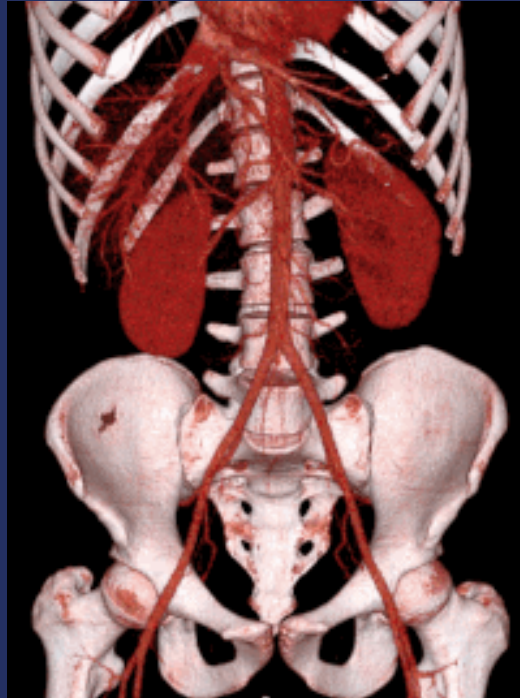
Röntgenstrahlung

Erzeugung und Eigenschaften

Physikalische Grundlagen der Röntgendiagnostik



1. Einfache Röntgenröhre mit Ösmoferegulierung.



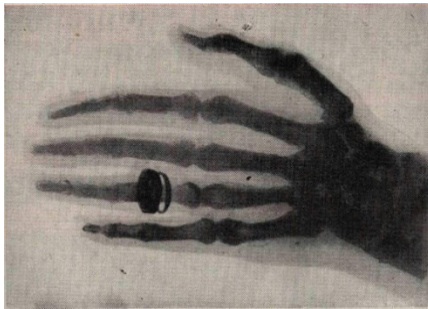
Gusztáv Schay



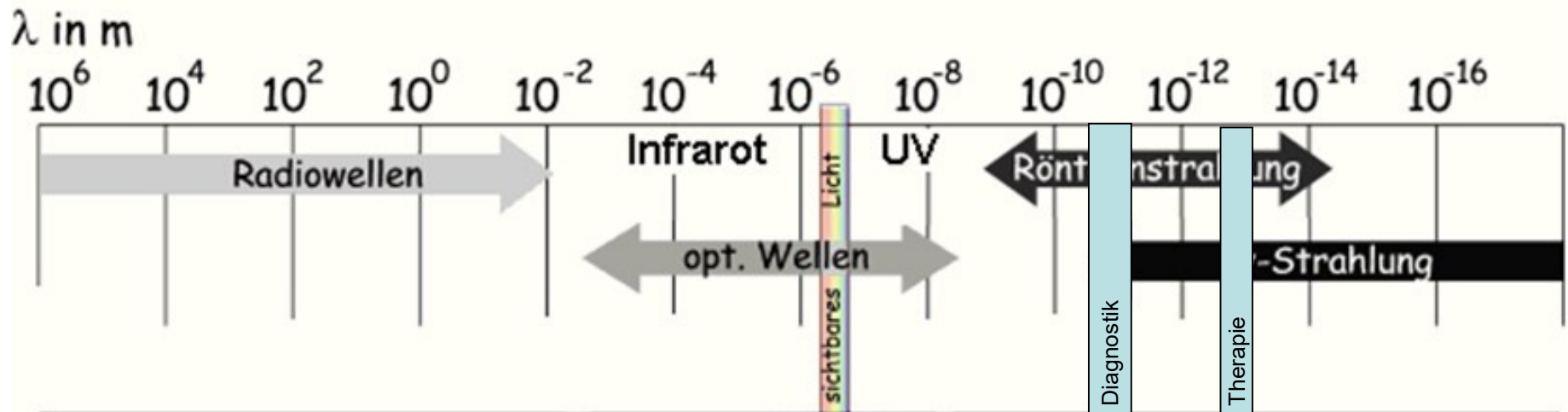
SEMMELWEIS
UNIVERSITY 1769

Historie (vor 127 Jahren in 8 November)

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



	Diagnostik	Therapie
Photonenenergie	30-200 keV	5-20 MeV
Wellenlänge	~ einige 10 pm	~100 fm



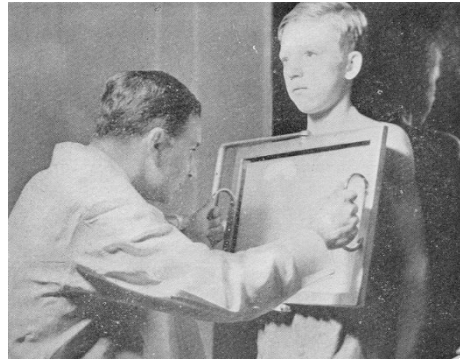
- **Wirkungen:**

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

- **Entstehung:** in der Elektronenhülle

- **Typen**

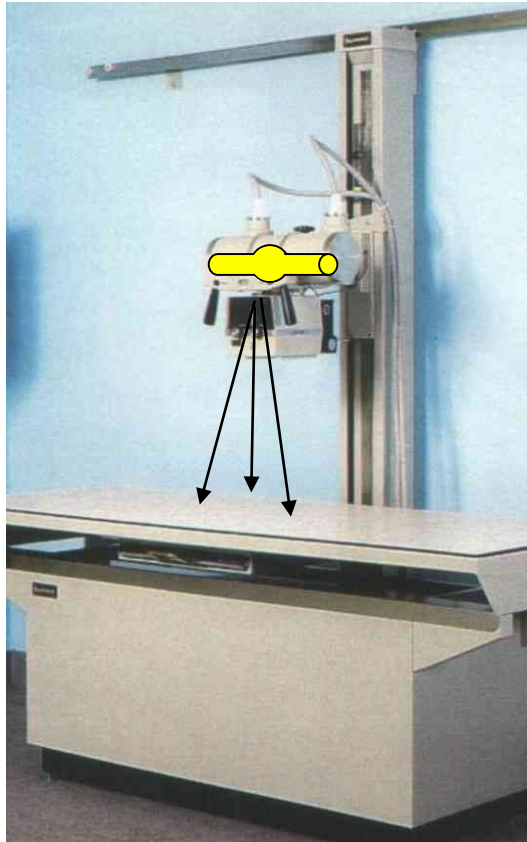
- Bremsstrahlung
- charakteristische Strahlung



Entstehung der Röntgenstrahlung

Röntgenstrahlung entsteht wenn hochenergetische (beschleunigte) geladene Teilchen (Elektronen) ihre (kinetische) Energie abgeben.

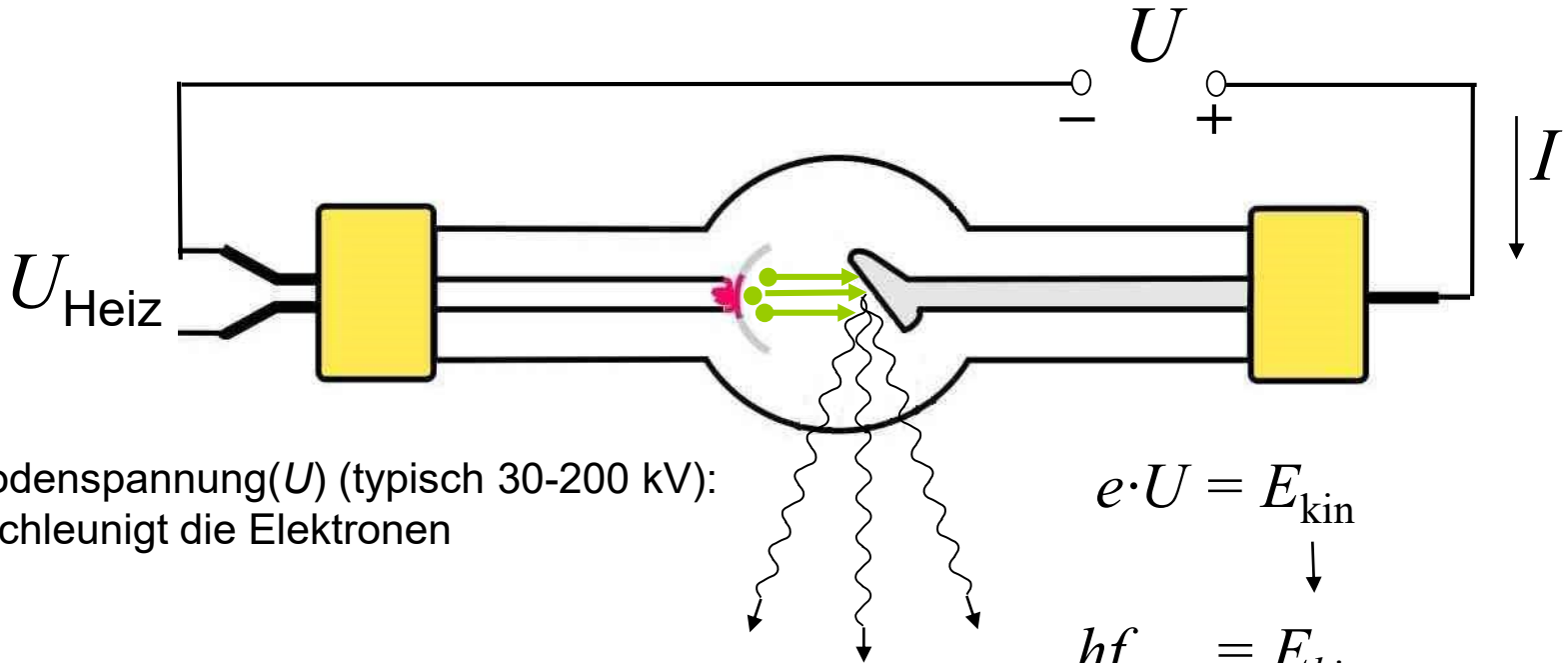
Röntgenröhre (Diagnostik)



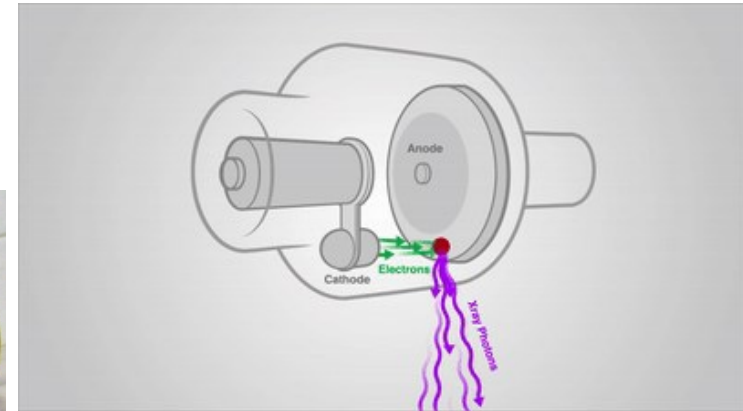
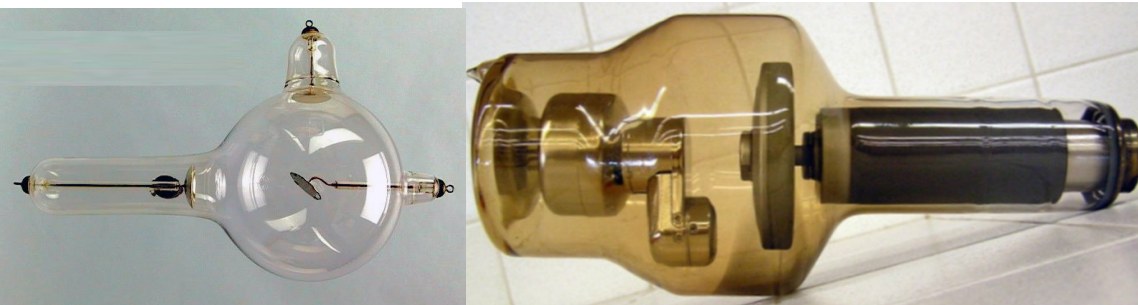
Teilchenbeschleuniger (Therapie)



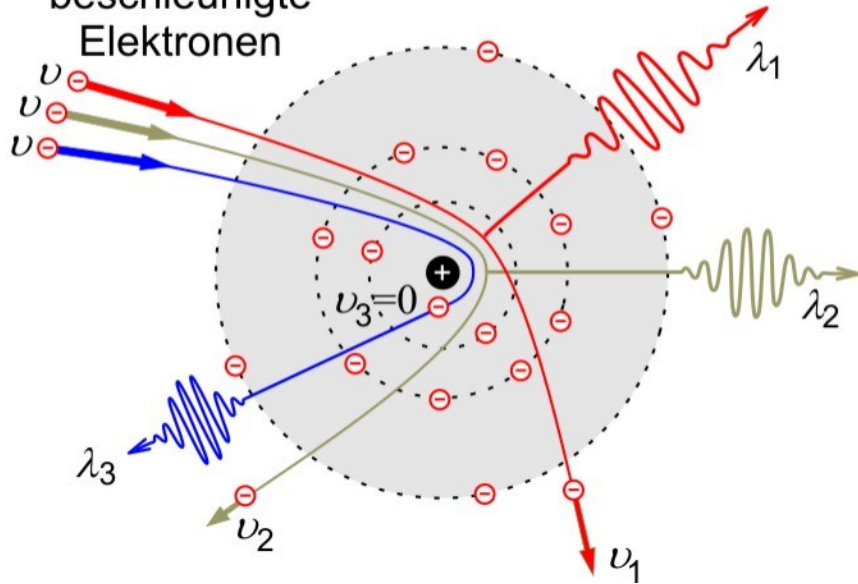
Die Röntgenröhre: hohe Beschleunigungsspannung



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



auf die
Geschwindigkeit v
beschleunigte
Elektronen



Bremsstrahlung

Kinetische Energie

⇒ Photonenenergie (Rtg)

⇒ thermische Energie

$$eU = E_{\text{kin}} = Q + hf = Q + h \frac{c}{\lambda} = hf_{\text{max}} = h \frac{c}{\lambda_{\text{min}}}$$

Grenzwellenlänge, Duane-Hunt Gesetz

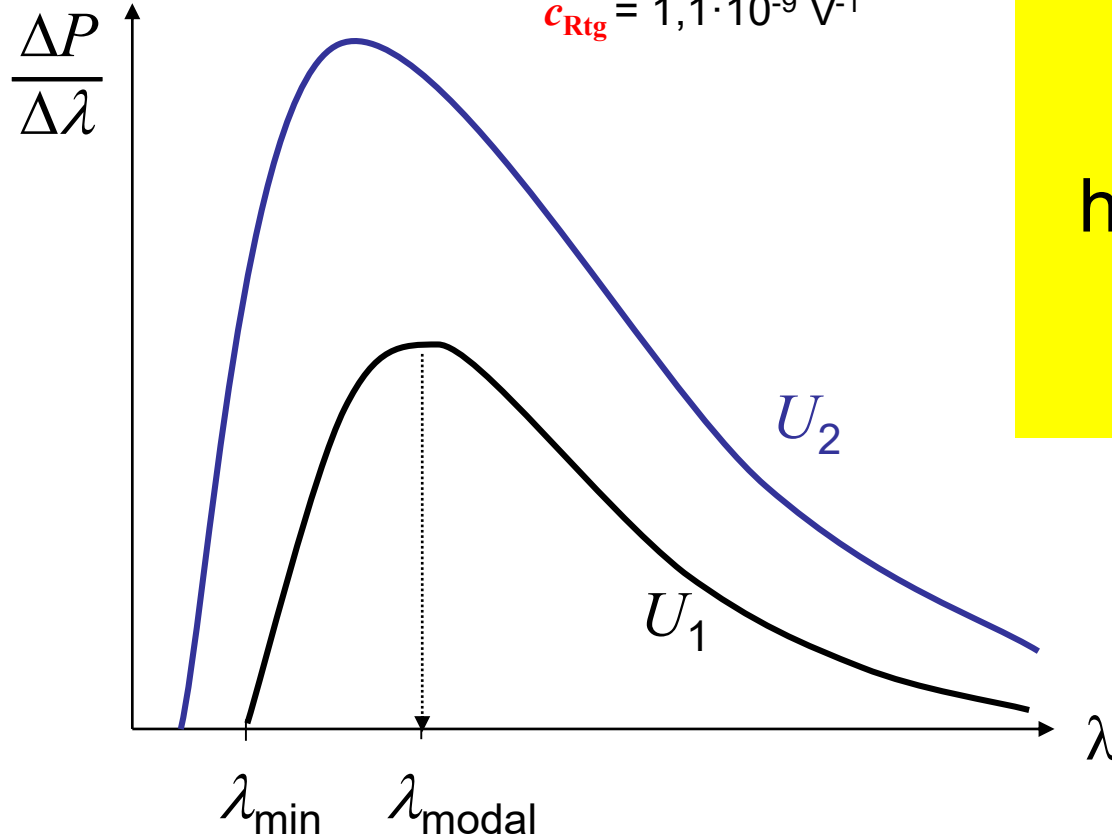
$$\lambda_{\text{min}} = \frac{hc}{eU} \quad \lambda_{\text{min}} = \frac{1230 \text{ kV} \cdot \text{pm}}{U}$$

Emissionsspektrum der Bremsstrahlung

$$P \sim U^2$$

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

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



harte ←————→ weiche
Strahlung

Anodenspannung ↑

$\lambda_{\text{min}} \downarrow$

$\lambda_{\text{modal}} \downarrow$

$E_{\text{photon}} \uparrow$

härtere Strahlung

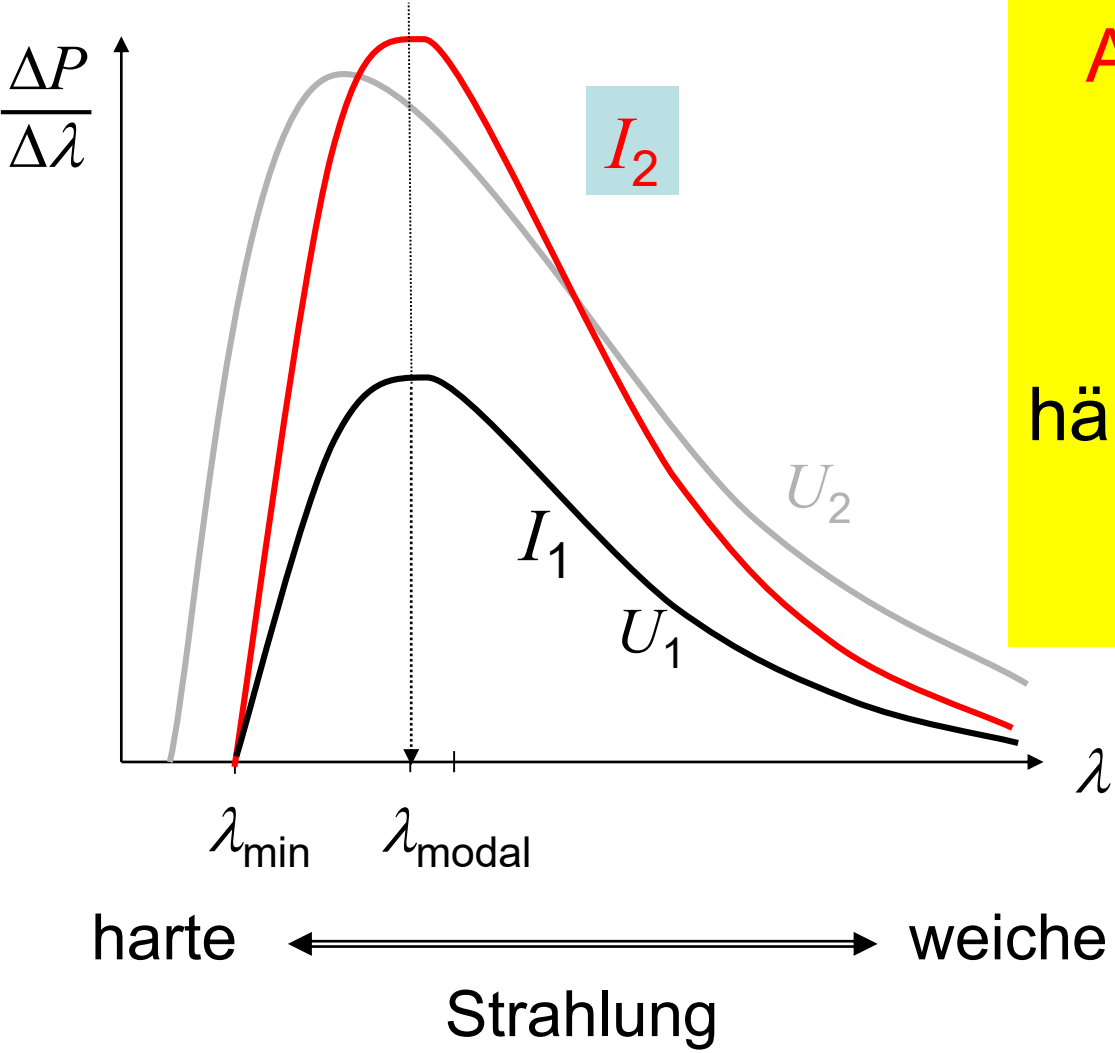
$N_{\text{photon}} \uparrow$

Leistung ↑↑

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

typischer η : 1% **99% Wärme!**

Emissionsspektrum der Bremsstrahlung

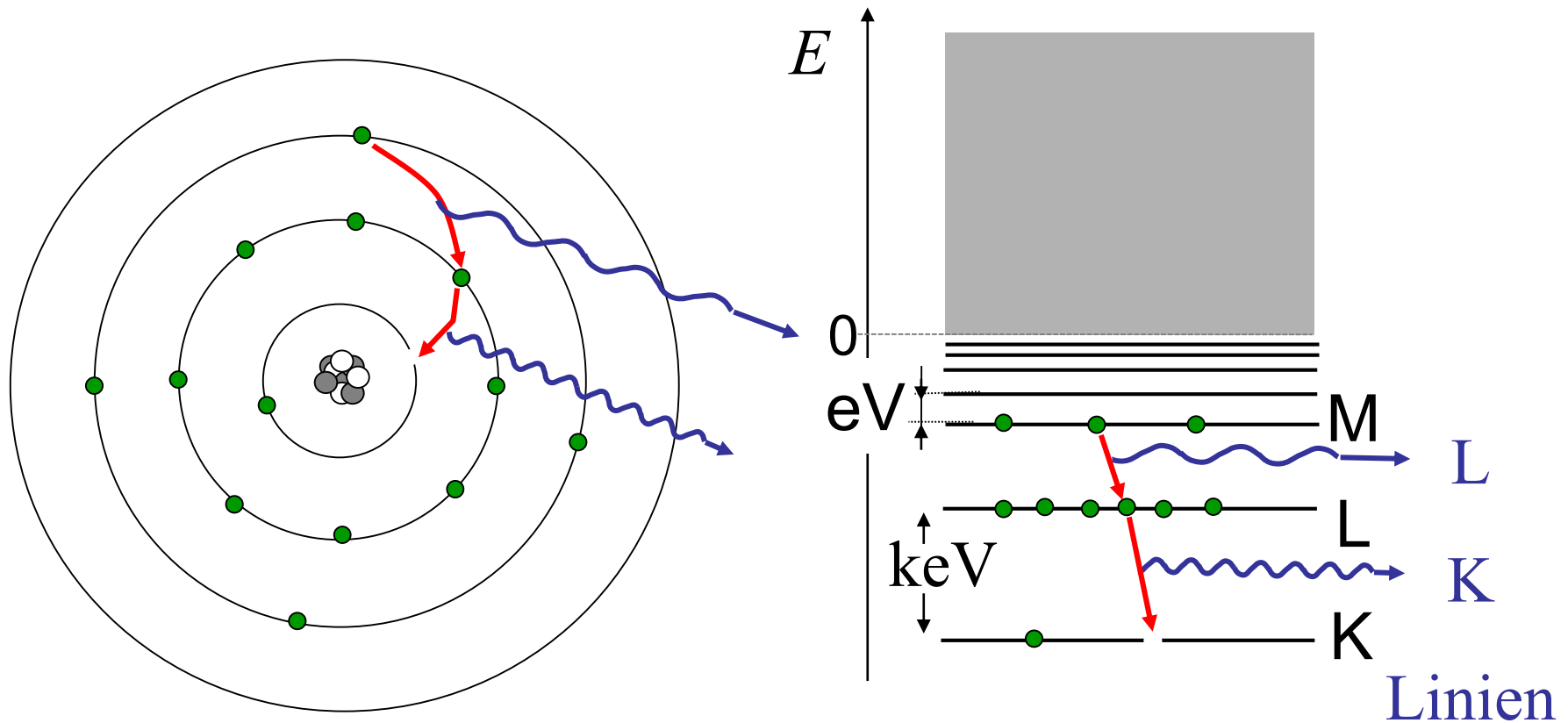


Anodenstrom \uparrow
 λ_{min} -
 λ_{modal} -
 E_{photon} -
härte d. Strahlung -
 N_{photon} \uparrow
Leistung \uparrow

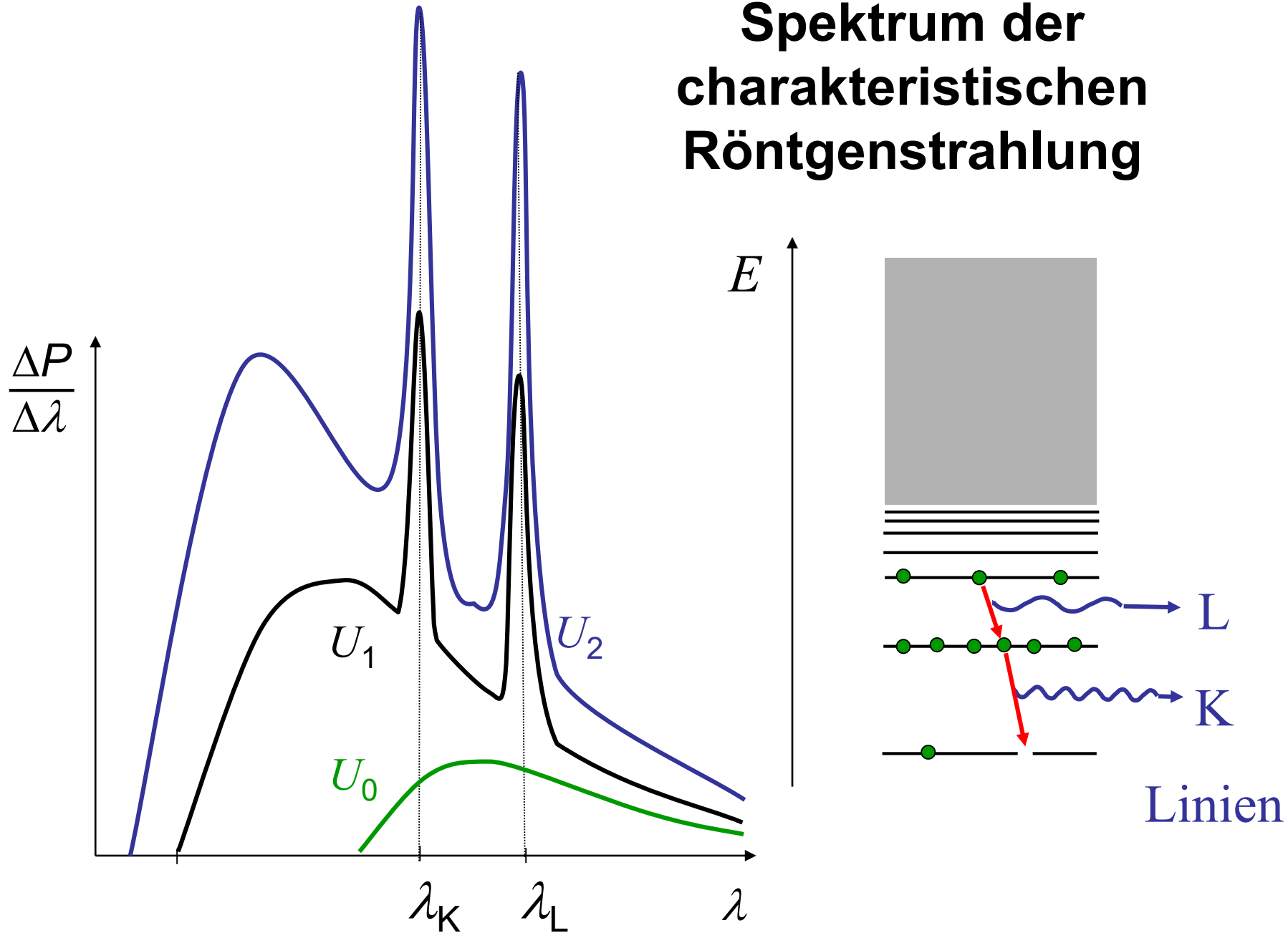
$P \sim I$

$$I_{\text{Anode}} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{\Delta n \cdot e}{\Delta t}$$

Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung



Spektrum der charakteristischen Röntgenstrahlung



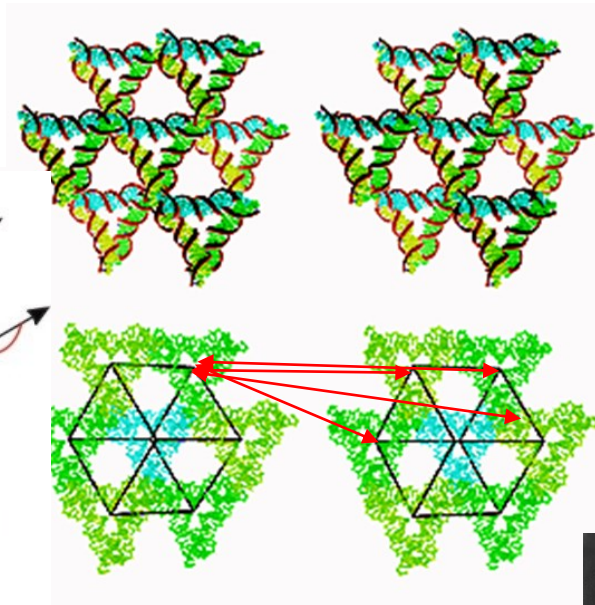
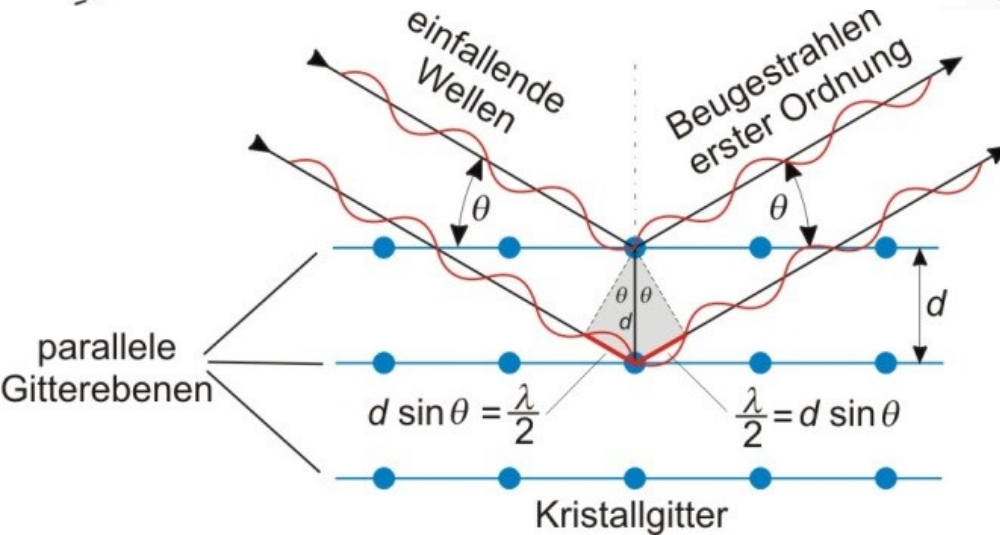
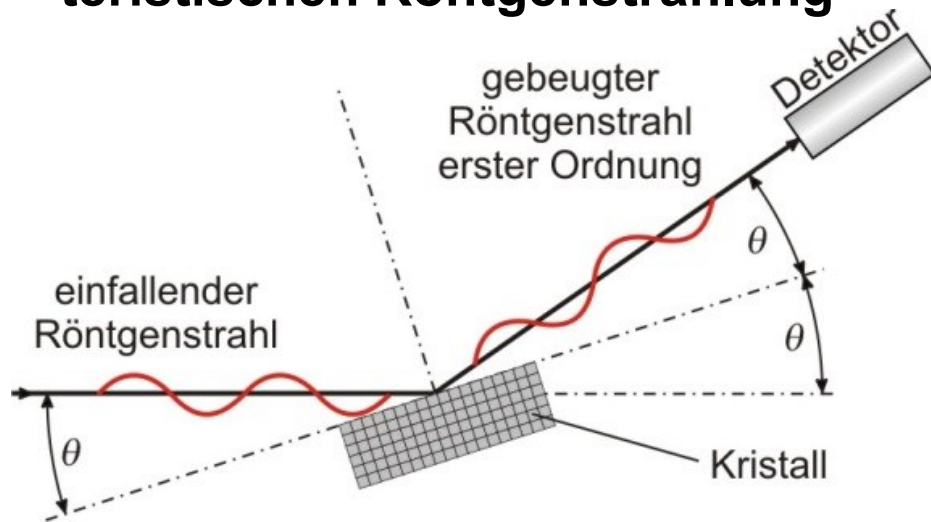
Anwendung der charakteristischen Röntgenstrahlung

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

$\lambda \approx 10-100 \text{ pm}$

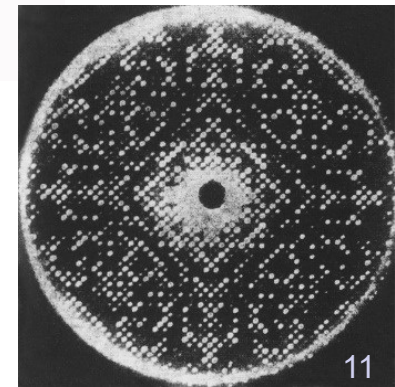
Bragg-Gleichung:

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

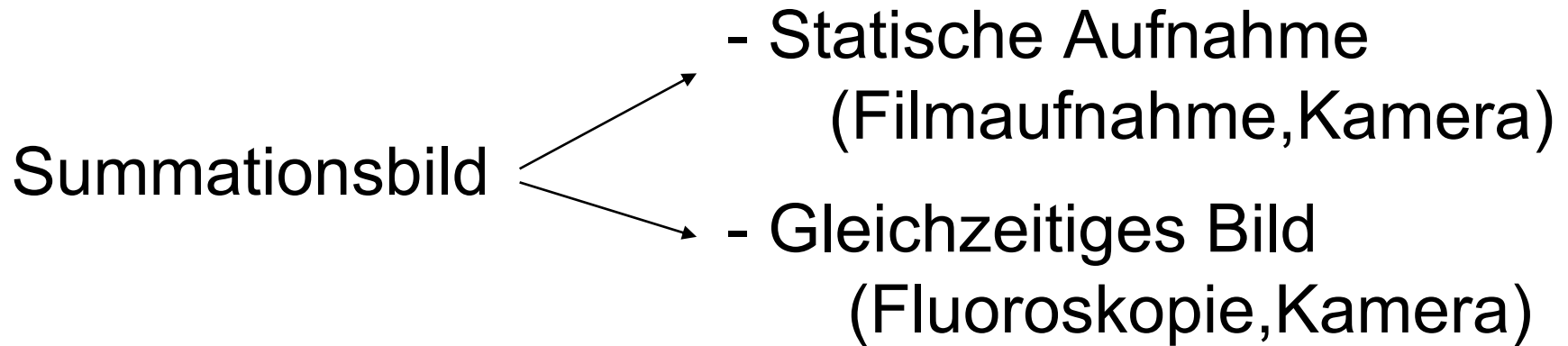


Molekülkristalle
mehrere
Gitterkonstanten

kompliziertes Beugungsbild
modellierung ist „rückwärtz“



Röntgendiagnostische Verfahren



Tomographisches Bild

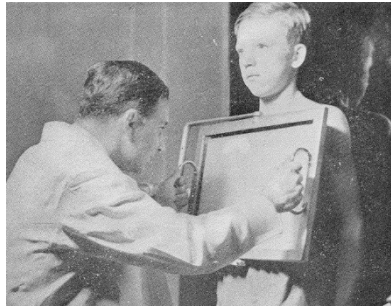
CT
CBCT

Spezialitäten: Anwendung von Kontrastmitteln,
Digitalisierung, Substraktion

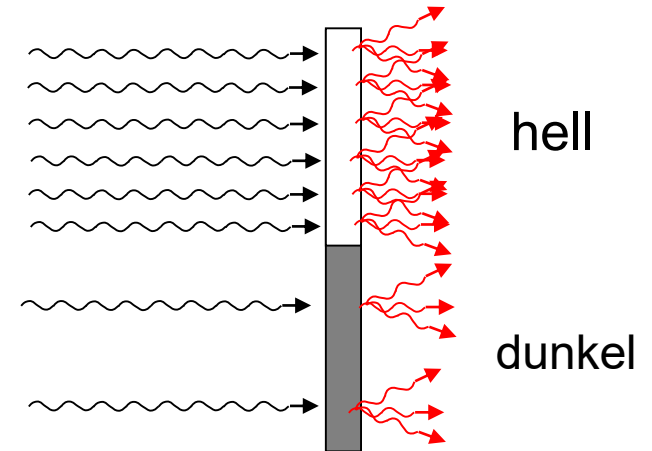
Detektoren

Szintillation

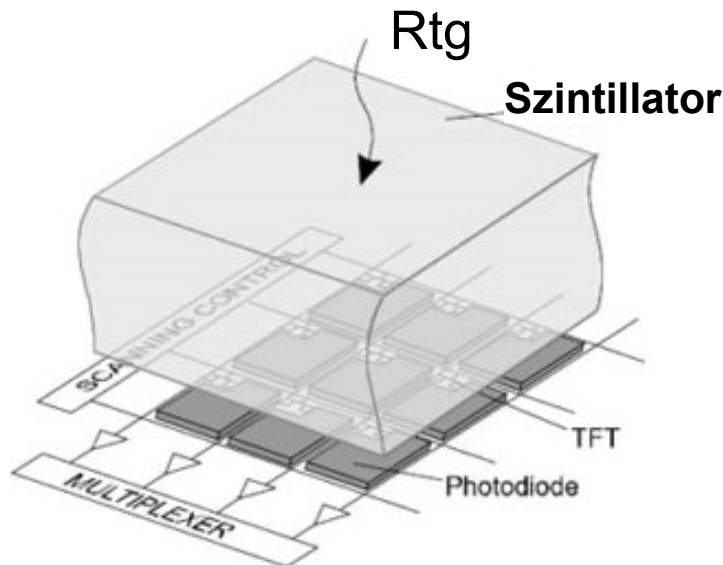
Szintillationsschirm
(Fluoroskopie)



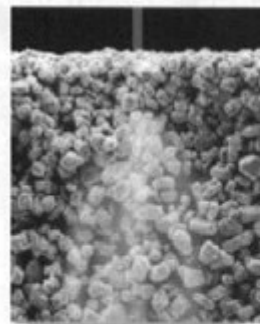
Fluoroskopie: Heute nur mit Bildverstärker!
(Rtg-gesteuerte Operation)



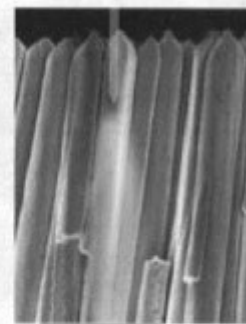
„Flat panel“ Röntgendetektor
zur digitalen Röntgentechnik



Phosphor

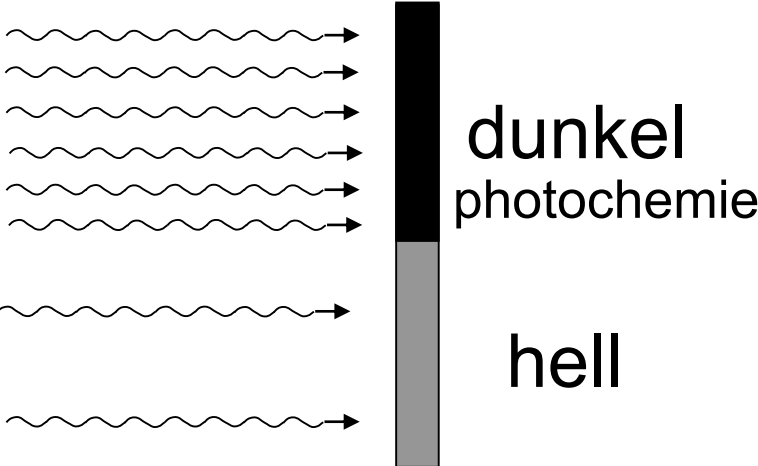


Cesium Iodide

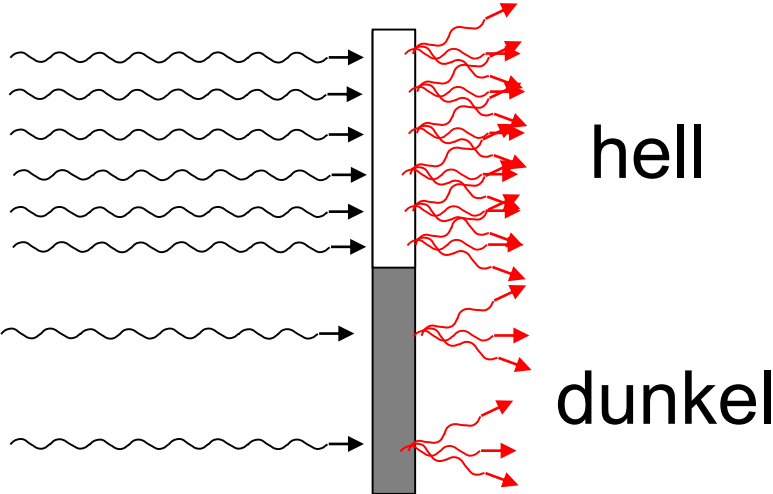


Vergleich des photographischen und fluoroskopischen Bildes

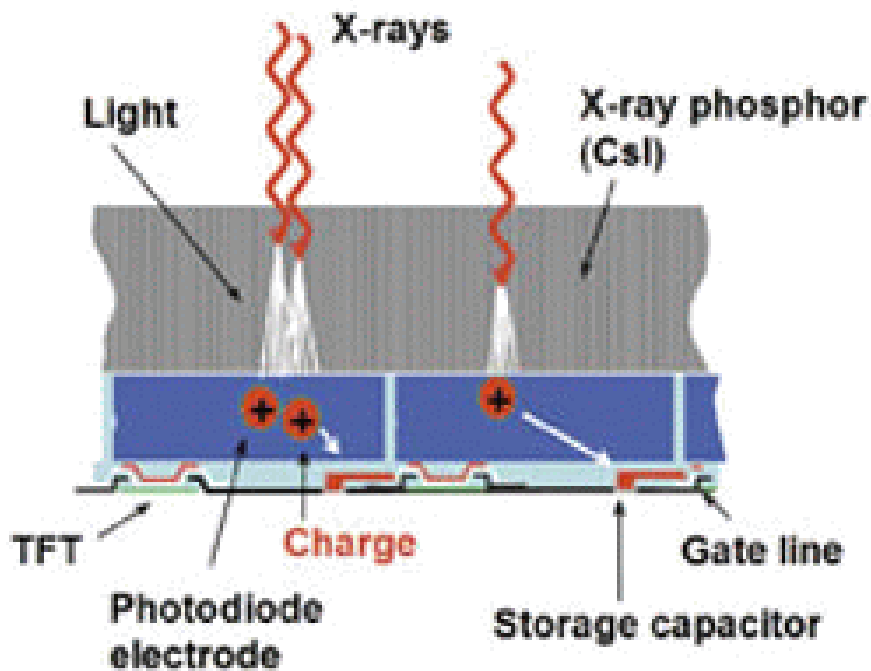
Photographisch



Szintillation (Fluoroskopie)

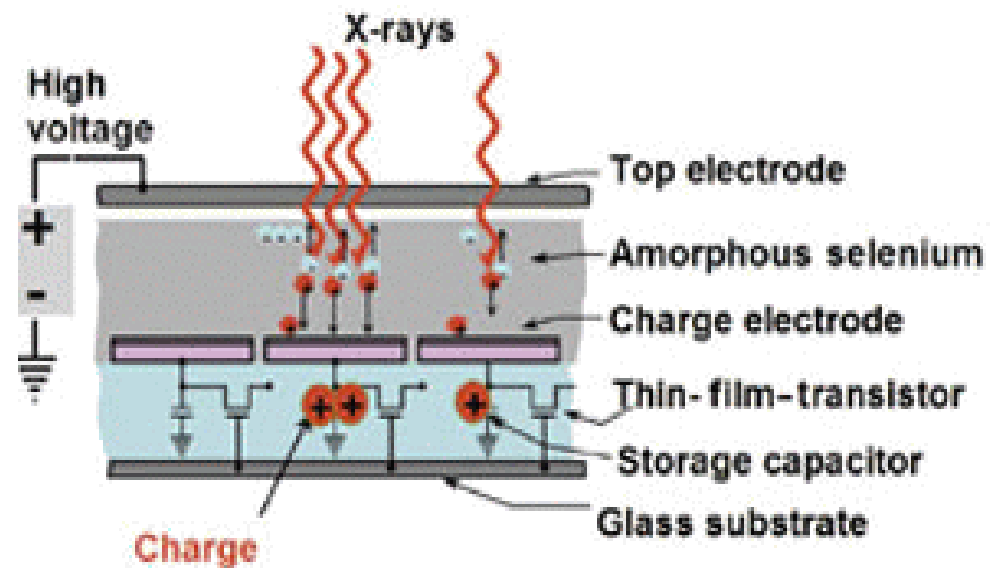


Vergleich von indirekten und direkten Halbleiterdetektoren



A. Indirect AMFPI: X-rays to light to charge

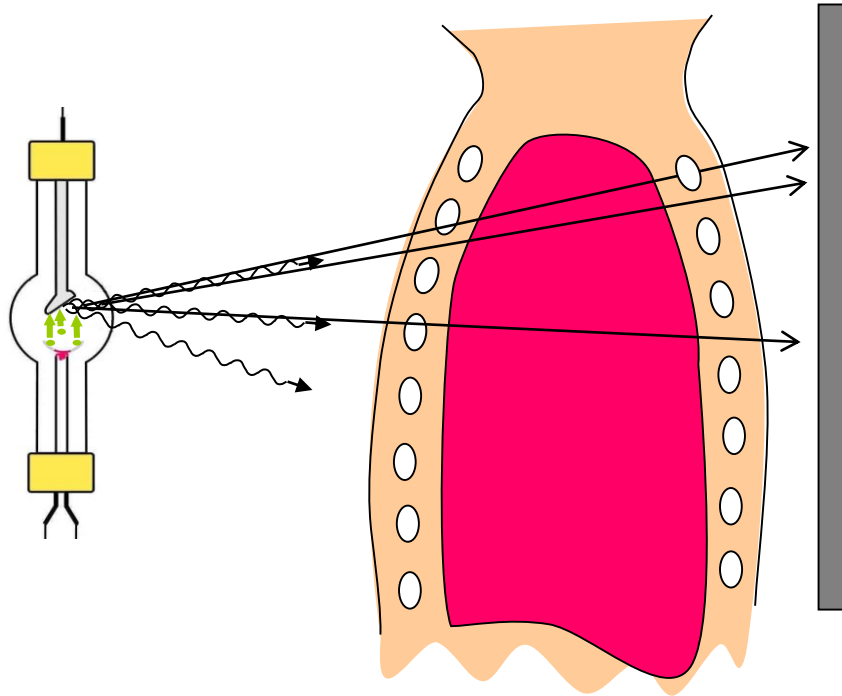
Indirekt



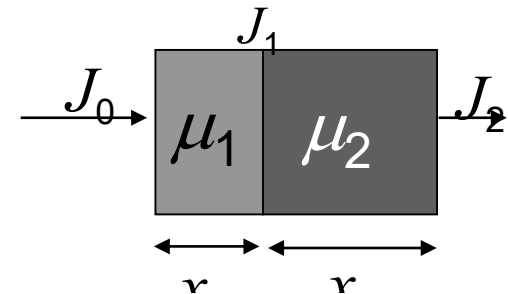
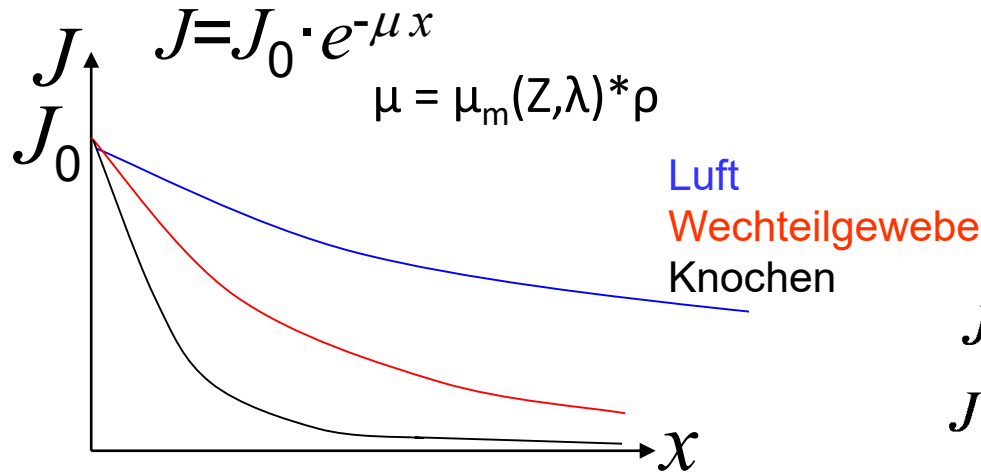
B. Direct AMFPI: X-rays to charge

Direkt

Grundprinzip der Summationsaufnahmen



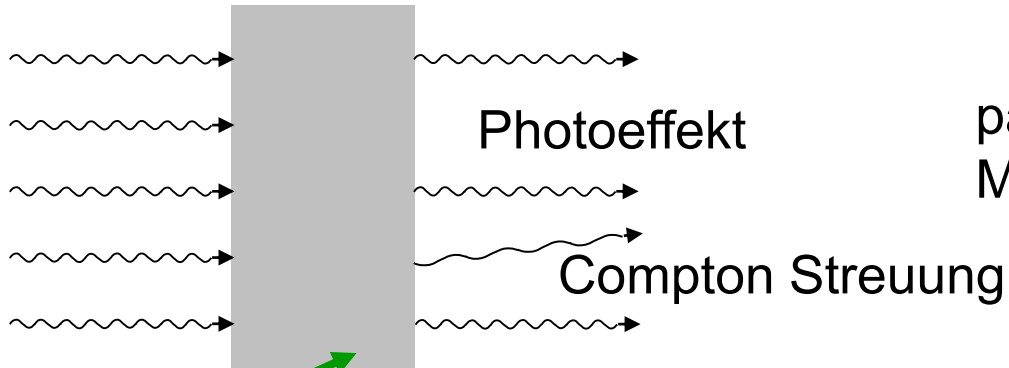
Detektor (Film, ...)



$$J_1 = J_0 e^{-\mu_1 x_1}$$

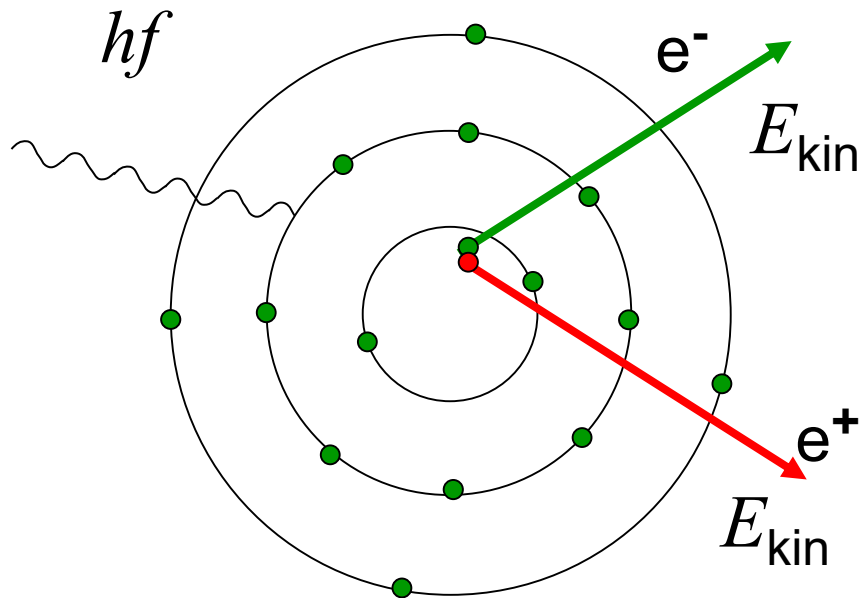
$$J_2 = J_1 e^{-\mu_2 x_2} = J_0 e^{-\mu_1 x_1} e^{-\mu_2 x_2} = J_0 e^{-\text{Summation}}$$

Teilprozesse der Schwächung der Röntgenstrahlung



partielle
Massenschwächungskoeffizienten

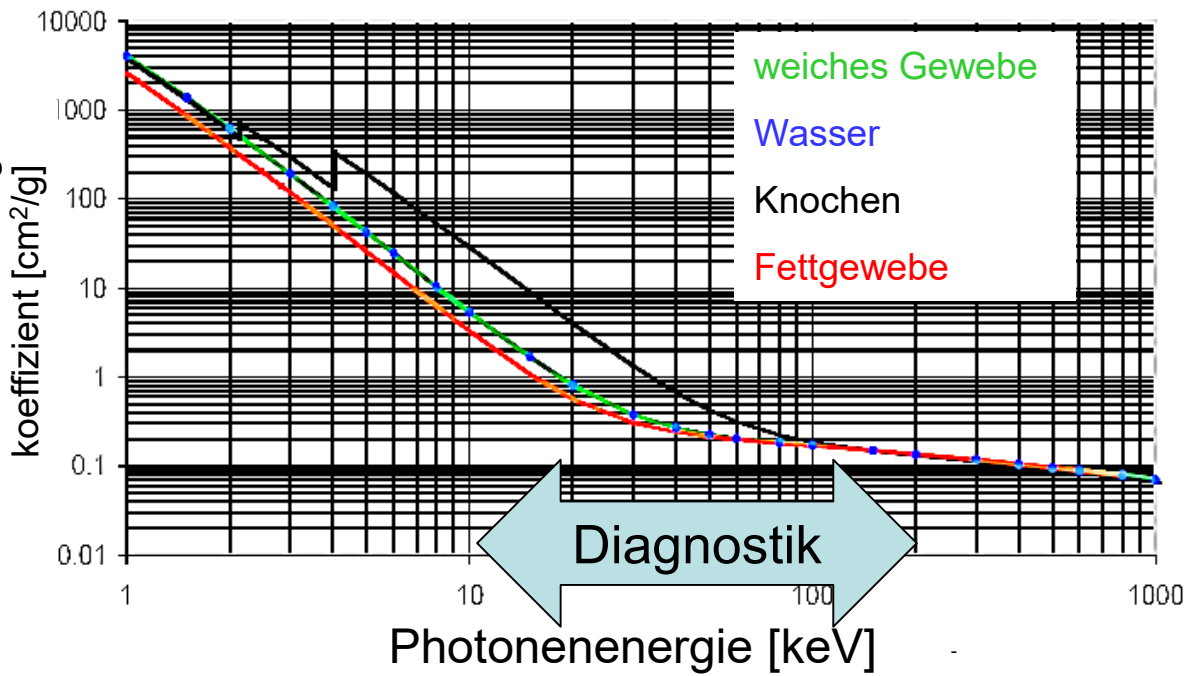
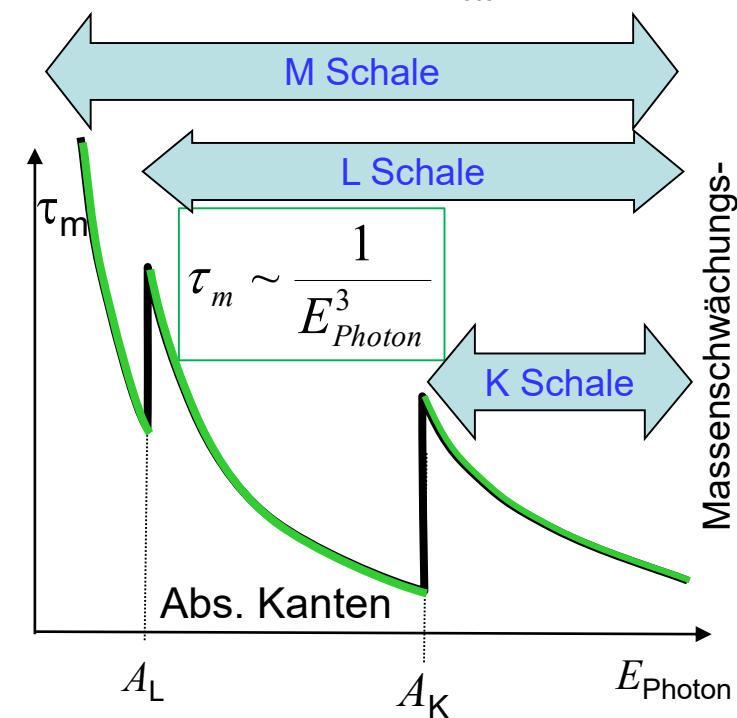
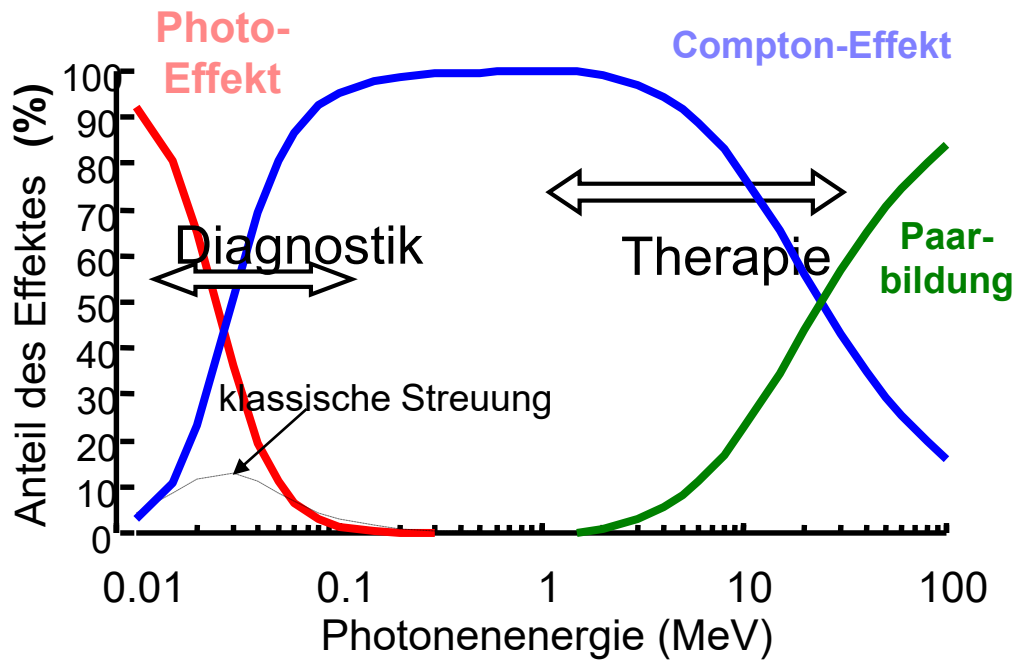
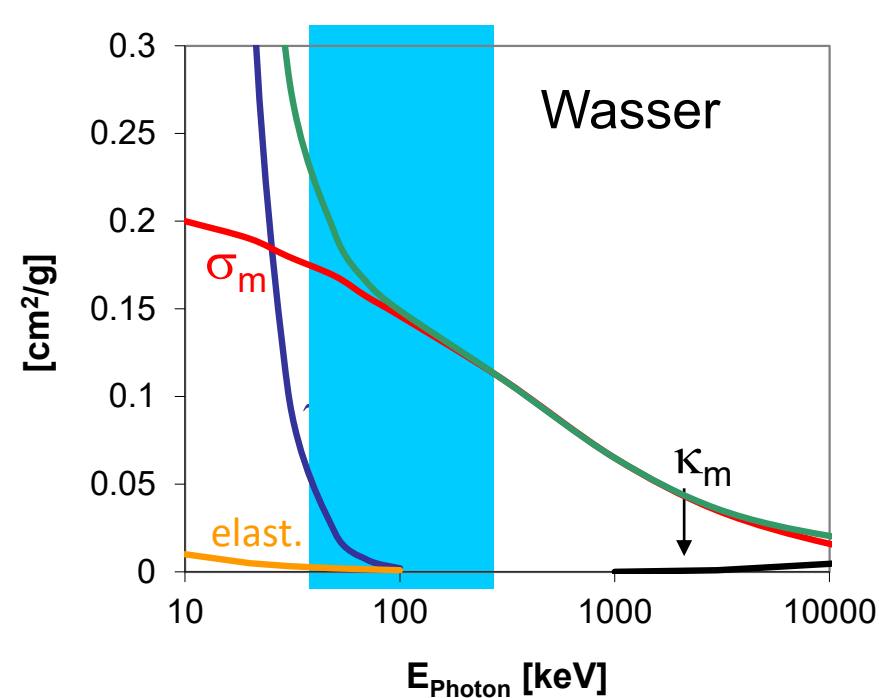
$$\mu_m = \tau_m + \sigma_m (+\kappa_m)$$



Paarbildung

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

nur bei therap. Rtg. und γ -Strahlung



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

$$Z_{\text{eff}} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^n w_i Z_i^3}$$

Z_i : Ordnungszahl von i-ten Atomtyp

w_i : Elektronenzahlverhältnis

zB: Wasser H_2O 10 Elektronen: 2 von H, 8 von O

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

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

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

$$\frac{\tau_{m,\text{Knochen}}}{\tau_{m,\text{weiches Gewebe}}} = \frac{Z_{\text{eff,Knochen}}^3}{Z_{\text{eff,weiches Gewebe}}^3} = \frac{13,8^3}{7,4^3} = 6,5$$

$$\frac{\sigma_{m,\text{weiches Gewebe}}}{\sigma_{m,\text{Knochen}}} = 1$$

$$\mu_m = \tau_m + \sigma_m \quad \mu = \mu_m \rho \quad \rho_{\text{wG}} = 1,05 \quad \rho_{\text{Knochen}} = 1,7 \cdot 1,8$$

$$\frac{\mu_{\text{Knochen}}}{\mu_{\text{Weichgewebe}}} = \frac{6.5 + 1}{1 + 1} \cdot \frac{1.75}{1.05} = 6.25$$

Effektive Ordnungszahl: ≈ 6

7,4

13,8



Positives Kontrastmittel

mehr Absorption

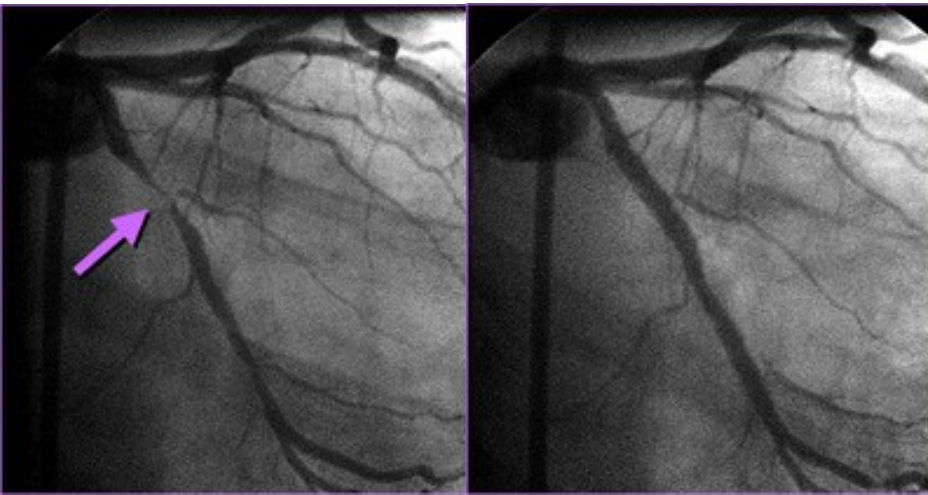
$$\mu \uparrow \quad \mu_m \uparrow \quad Z_{\text{eff}} \uparrow$$

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

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



Jod (Z= 53) Blutgefäß
(Angiographie)



Negatives Kontrastmittel, Doppelkontrast

Negatives Kontrastmittel:

wenige Absorption $\mu \downarrow \quad \rho \downarrow$

$$\mu_m - Z_{\text{eff}} -$$

Luft, CO_2 (Gase) in Darm

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

BaSO_4 + Luft in Darm

