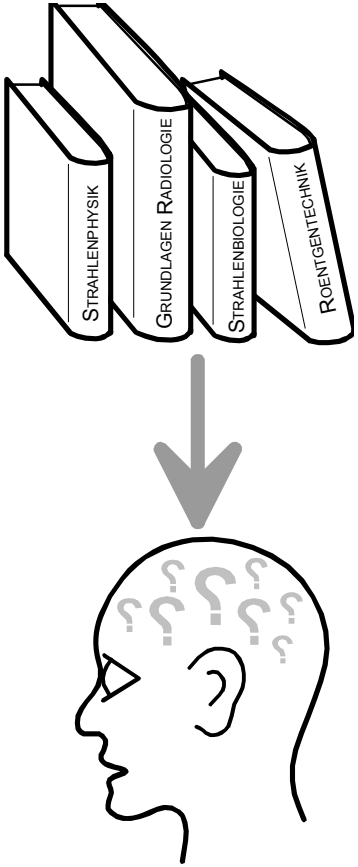
Einführung ionisierende Strahlung

Stephan Scheidegger
ZHAW School of Engineering

Inhalt



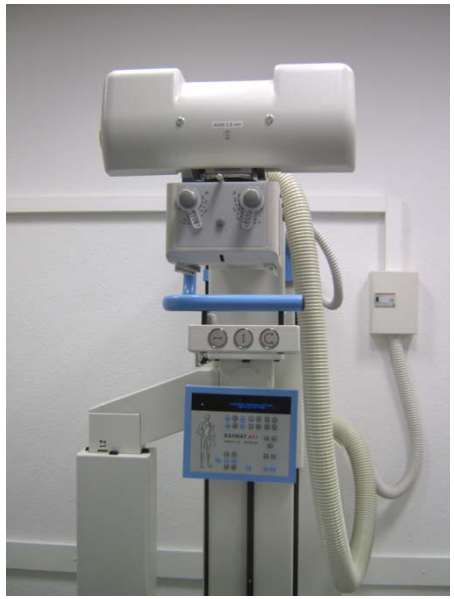
- Grundbegriffe
- Erzeugung ionisierender Strahlung
- Wechselwirkungen
- Die Energiedosis
- Messung ionisierender Strahlung

Lernziele

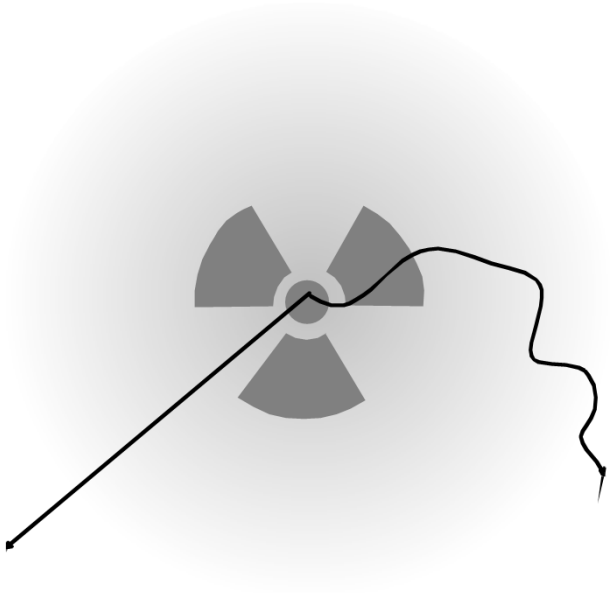
- Grundbegriffe in eigenen Worten erläutern können
- Entstehung ionisierender Strahlung erklären können
- Gesetze der Schwächung von Röntgenstrahlung anwenden können
- mit Energiedosisbegriff vertraut sein
- Grundprinzip der Messung beschreiben können

Anwendungen ionisierender Strahlung in der Medizin

- Diagnostik
- Therapie
- Analytik



Der Begriff der Strahlung

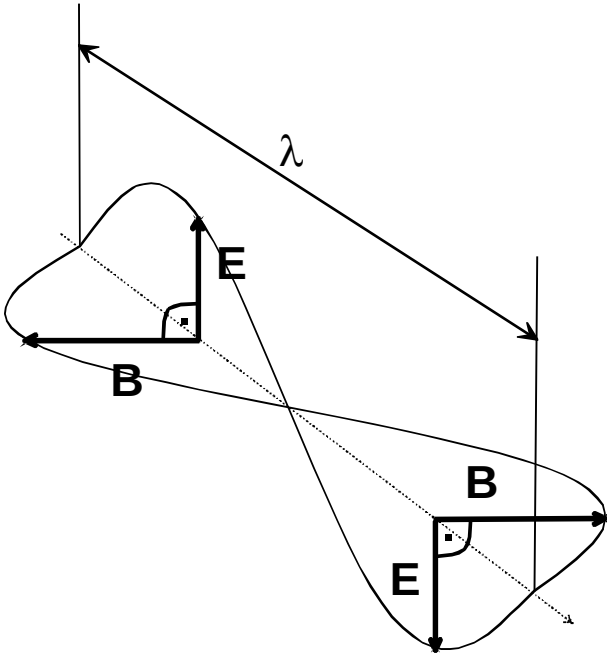


- Energietransport durch Wellen oder Teilchen
- Beispiele:

  Photonen

  Elektronen

Elektromagnetische Wellen



- räumliche Ausbreitung elektrischer und magnetischer Felder

- charakterisiert durch:

  Wellenlänge λ

  Frequenz ν

  Geschwindigkeit c

Wellen-Teilchen-Dualismus

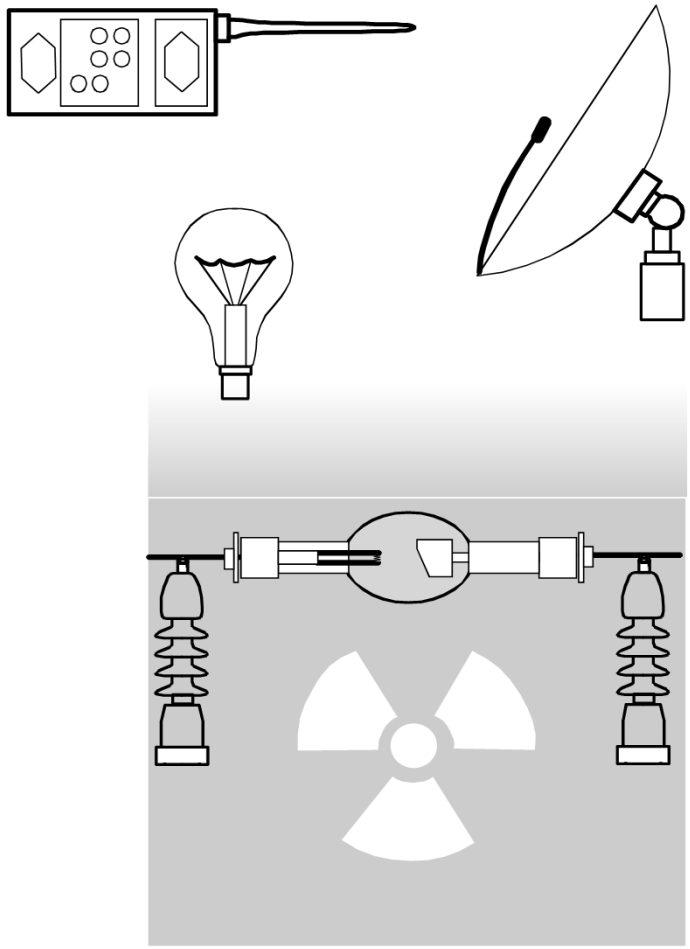
$$E_\gamma = \mathrm{h} \cdot \nu = \mathrm{h} \frac{\mathrm{c}}{\lambda}$$

- Energie eines einzelnen Photons abhängig von:

  Frequenz ν

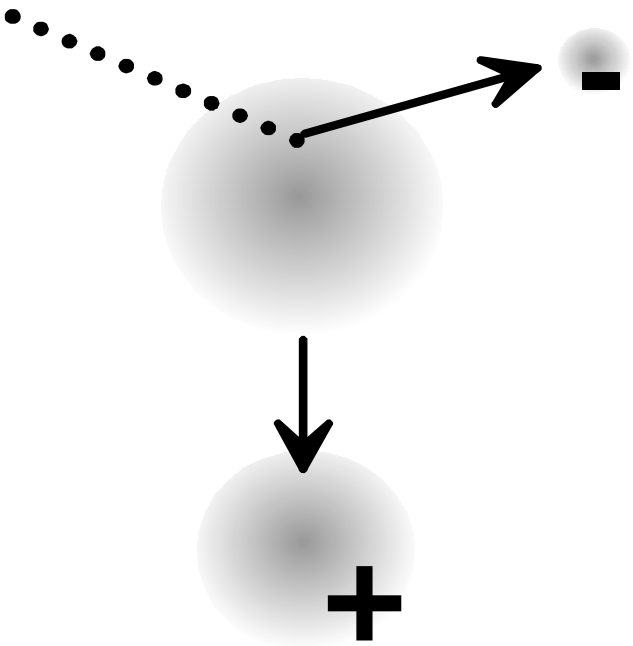
  bzw. Wellenlänge λ

Erscheinungsformen



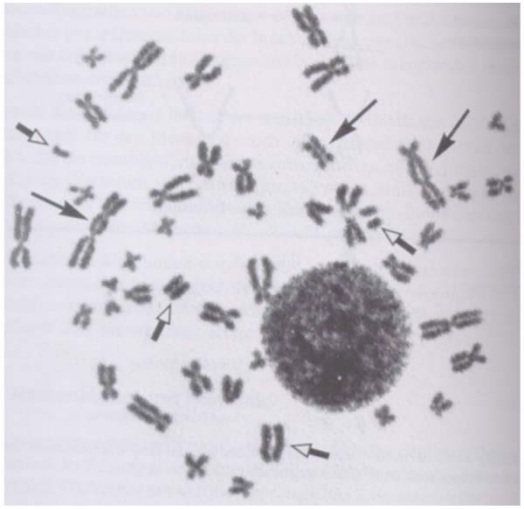
- Radio- und Radarwellen
- Infrarot
- sichtbares Licht
- UV
- Röntgen- und γ-Strahlung

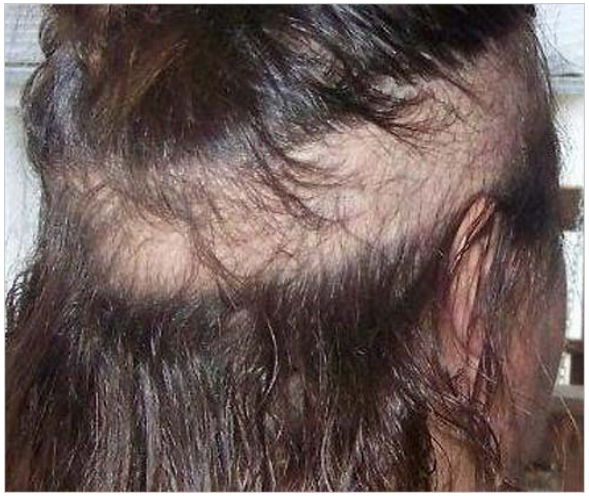
Ionisierende Strahlung



- Ionisation = Ladungstrennung
- Ionisation durch einzelnes Teilchen (Photon, Elektron, …) → ionisierende Strahlung

Biologische Wirkung ionisierender Strahlung



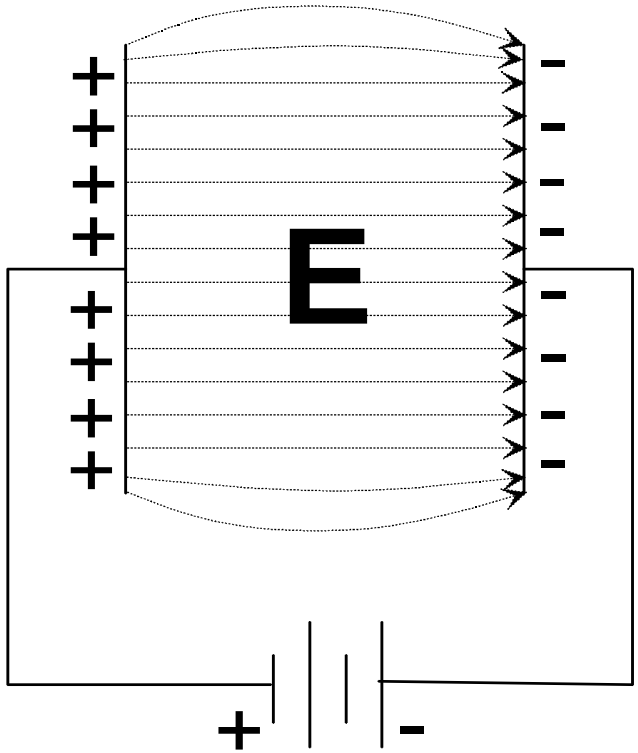


Das Elektronenvolt

$$E_{kin} = q \cdot U$$

- Kraft = Ladung mal elektrische Feldstärke
- Energie (Arbeit) *E* = Kraft mal Weg
- Spannung *U* = elektrische Feldstärke mal Weg

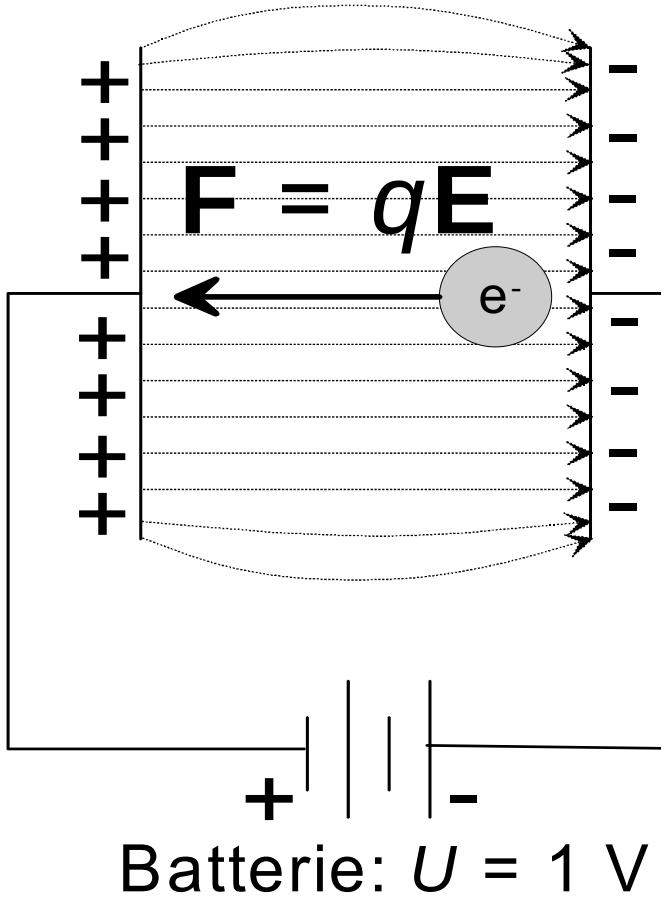
Das Elektronenvolt



Batterie

- elektrisches Feld zwischen zwei Platten durch Anlegen einer Spannung *U* (Batterie)

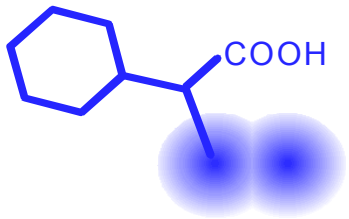
Das Elektronenvolt



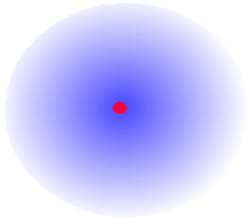
- Elektron im elektrischen Feld
- Spannung = 1 V
- kinetische Energie nach durchlaufen der Spannung von 1 V = 1.6022×10^{-19} J

= 1 eV

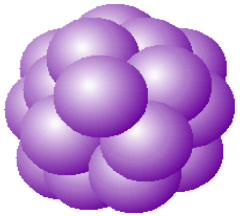
Bindungsenergien



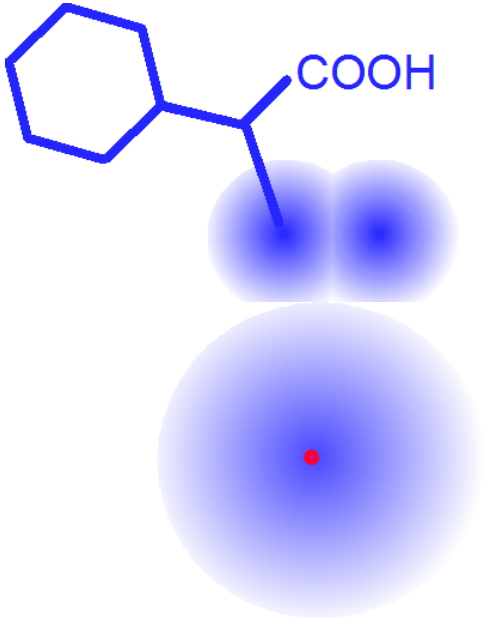
- Moleküle: wenige eV



- Atome: einige eV (äussere Hülle) bis viele keV (innere Hülle)



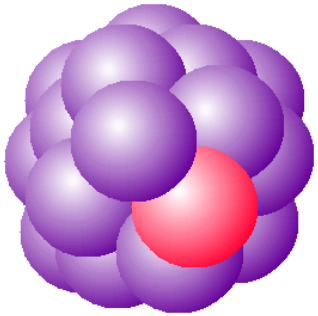
- Atomkerne: einige MeV



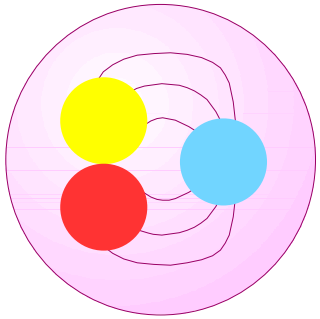
Molekül

Atom

elektromagnetische WW



Atomkern: elektromagn.
+ Kernkräfte



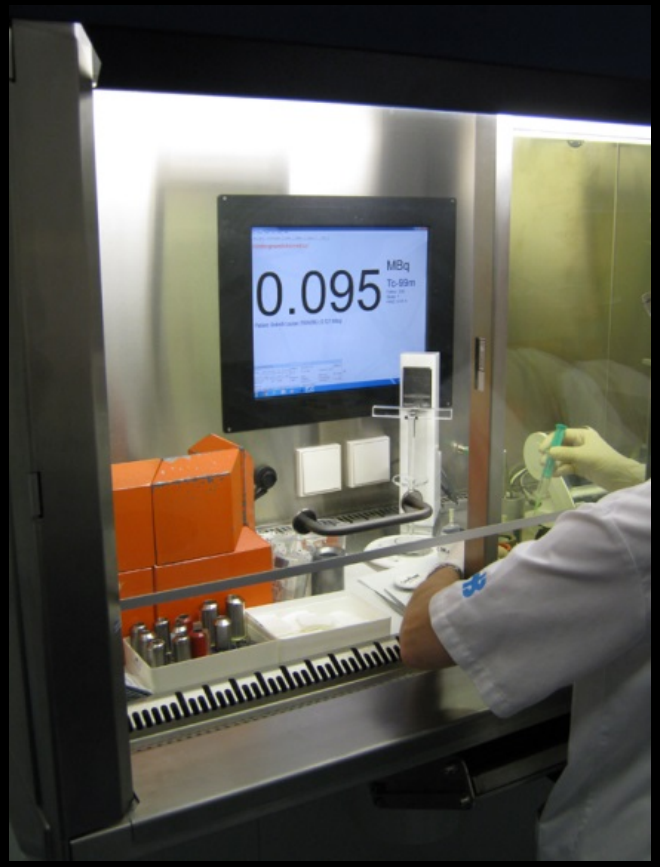
Nukleon (Hadronen):
starke WW

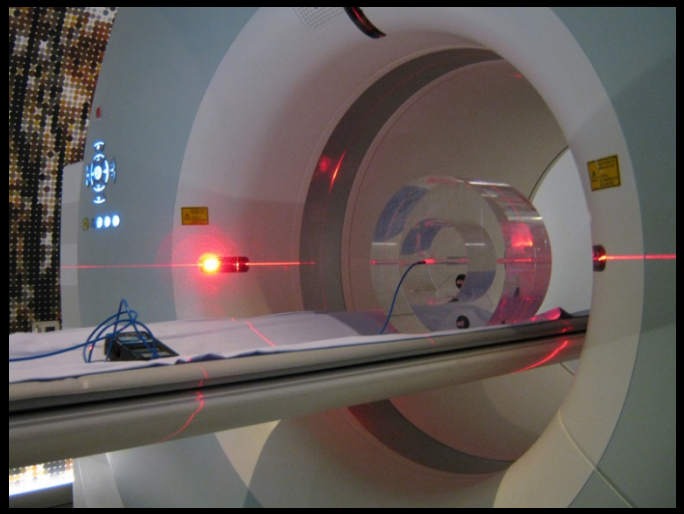
Inhalt

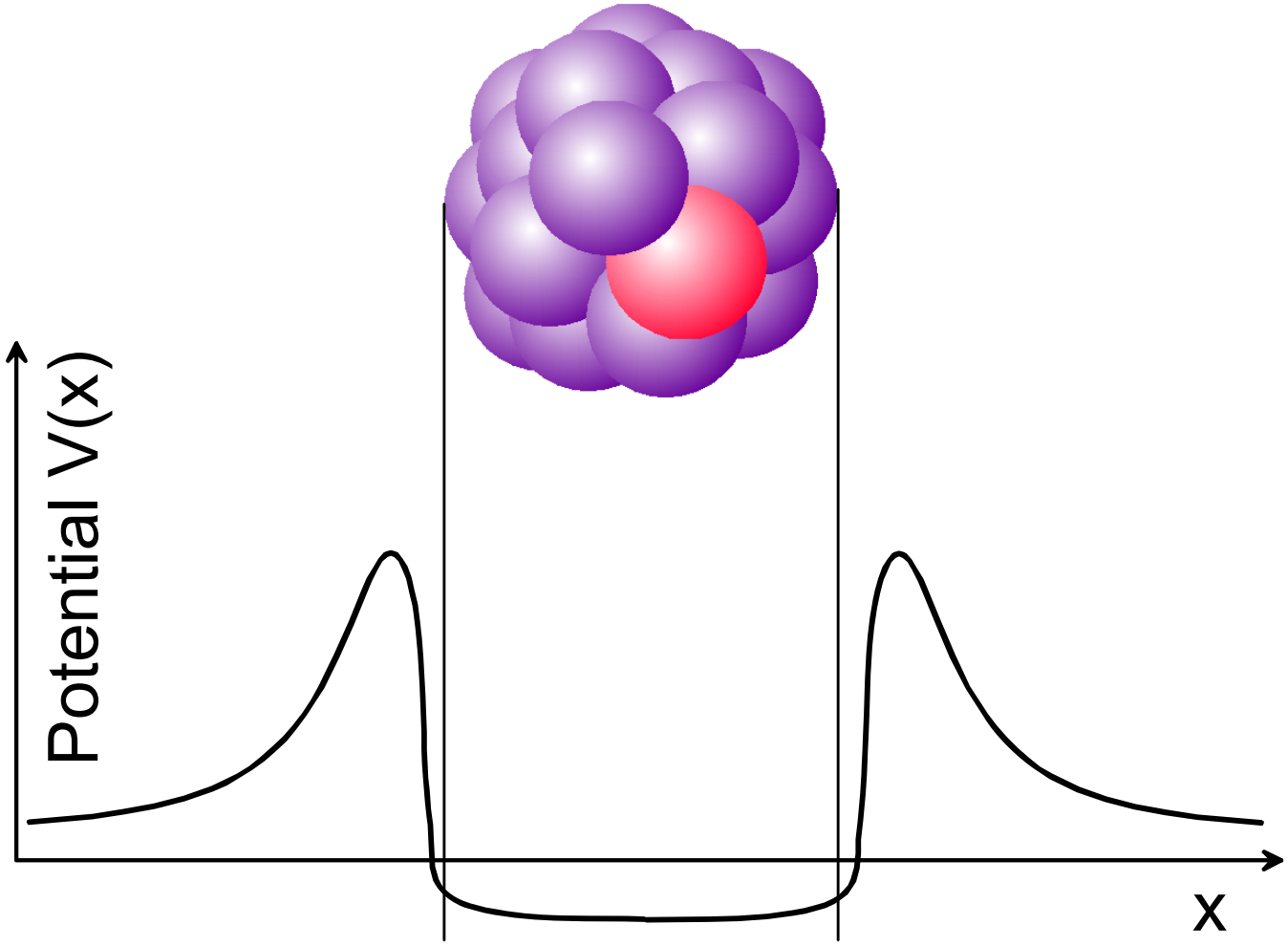
- Grundbegriffe
- Erzeugung ionisierender Strahlung

^{192}Ir-Quelle für HDR-Brachytherapie

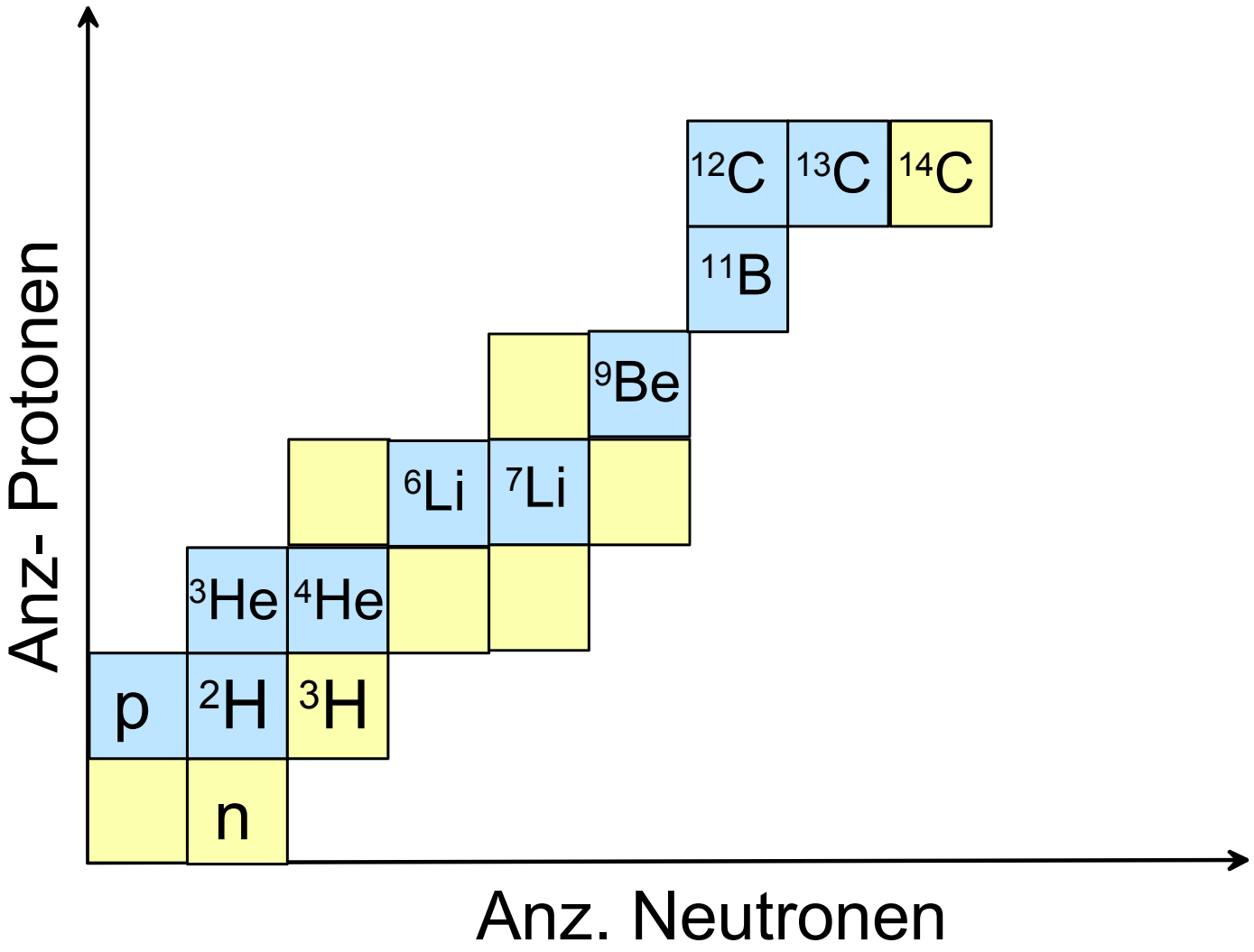
^{18}F für PET / ^{99}mTc für SPECT



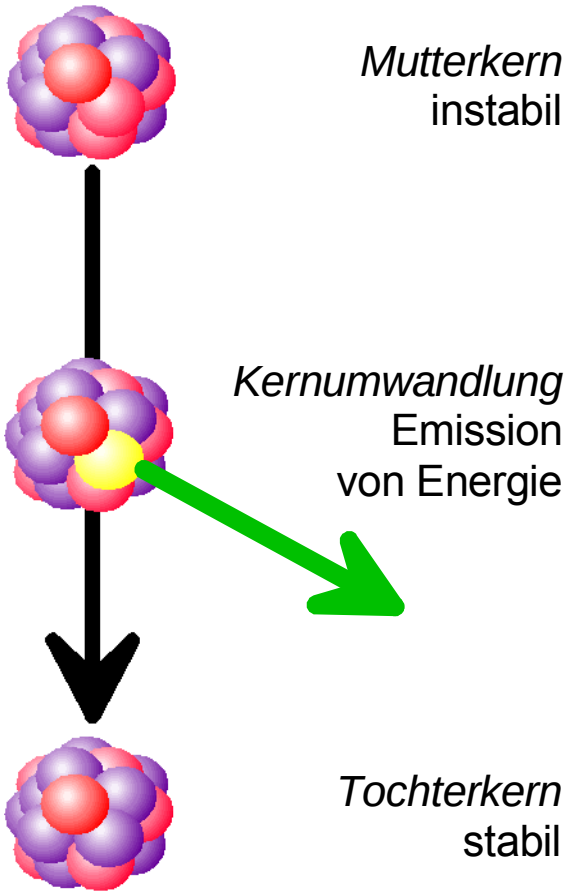



Potential V(x)
x

Nuklidkarte

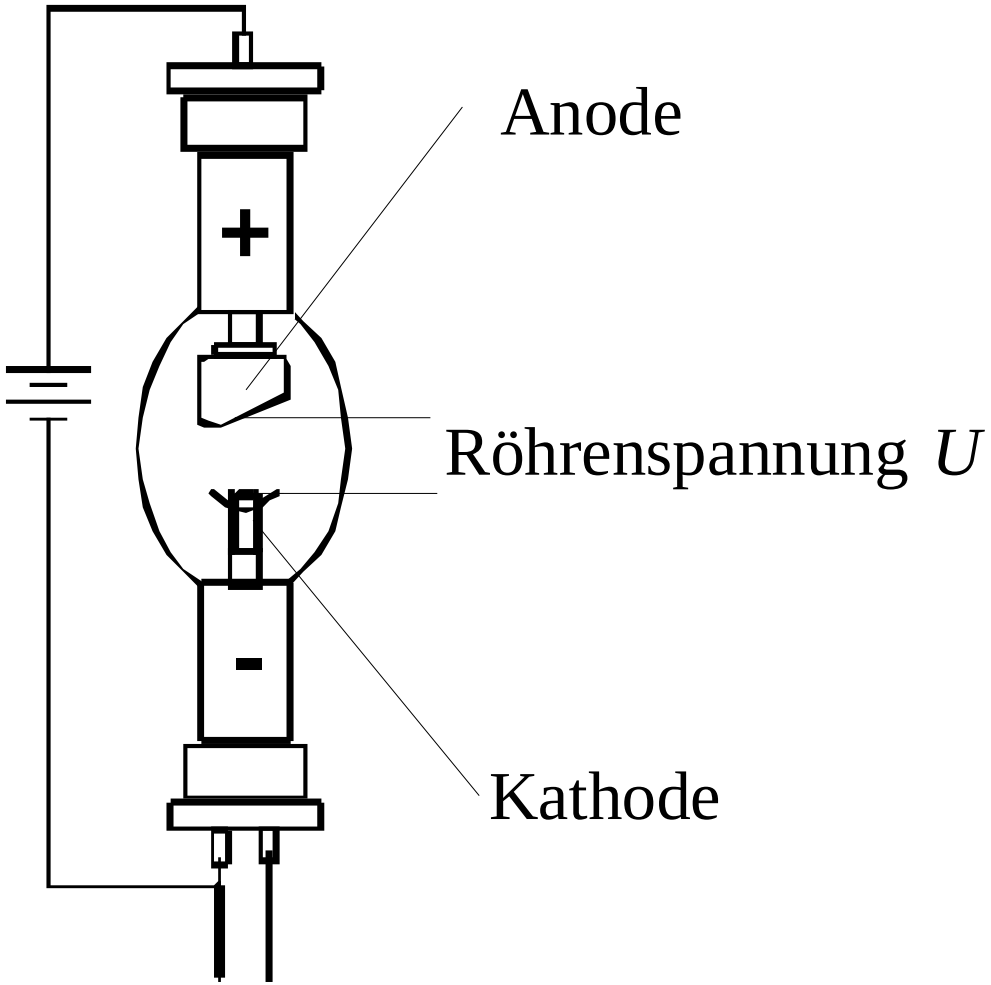


Radioaktiver Zerfall

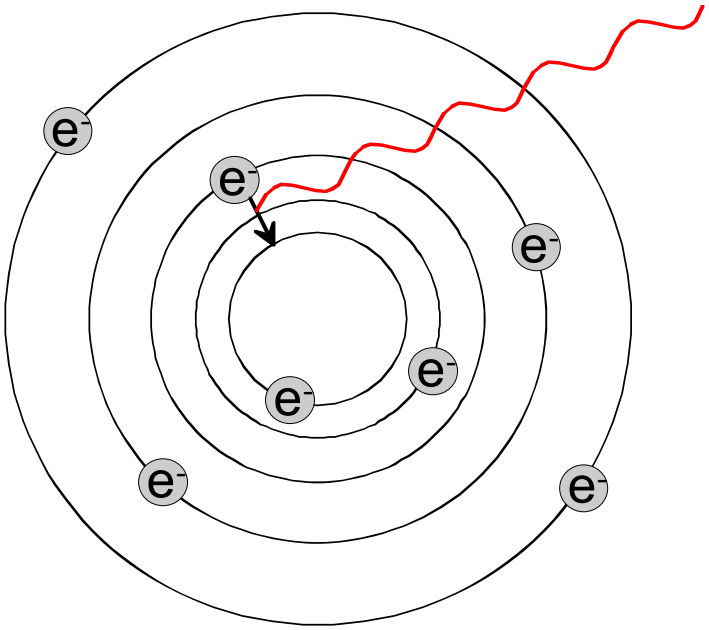


- Zerfall instabiler Atomkerne
- Energieabgabe durch Strahlung (α, β, γ)
- Tochterkern stabil oder instabil (Zerfallsketten)

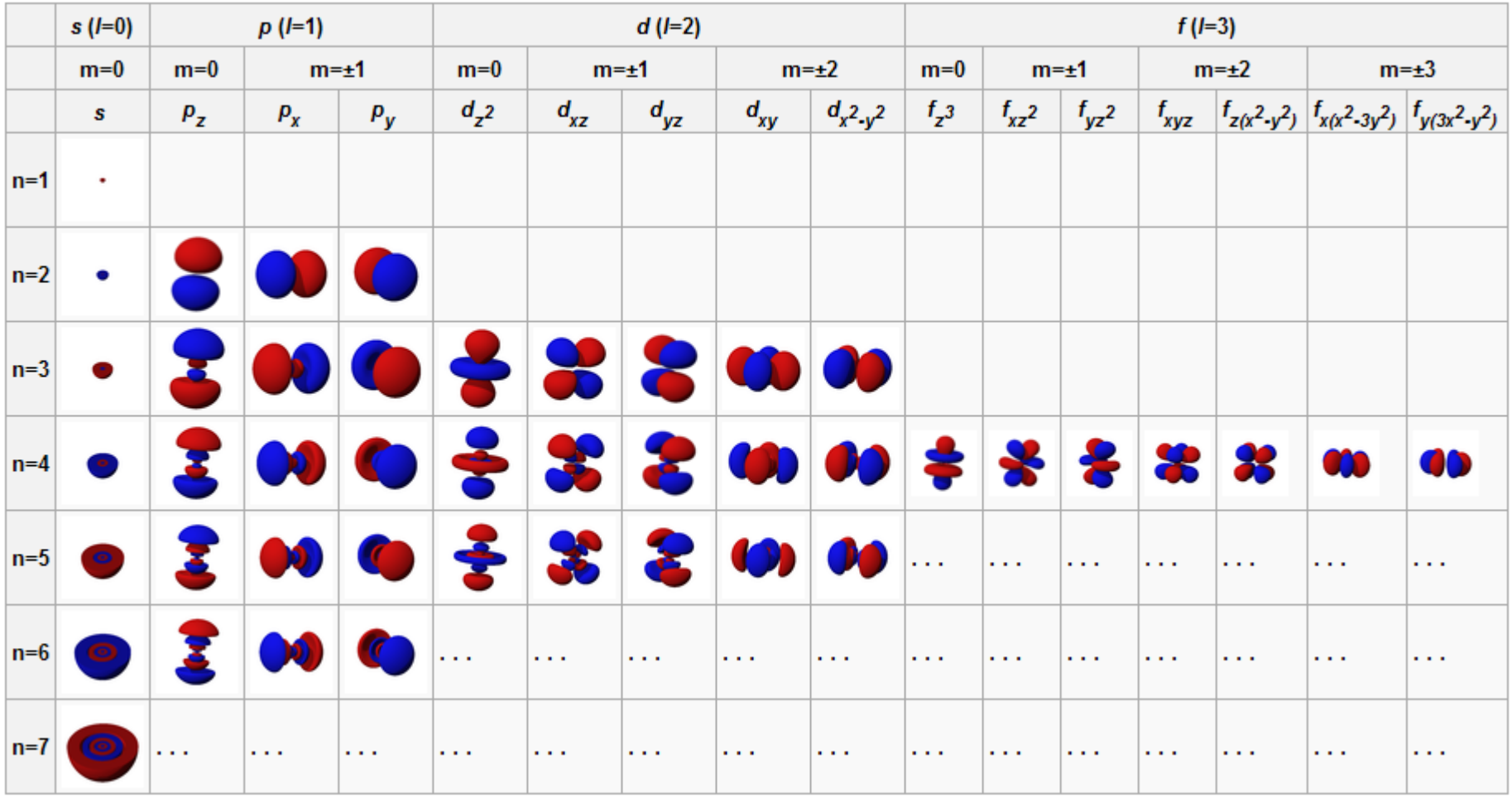
Erzeugung von Röntgenstrahlung



Röntgenstrahlung

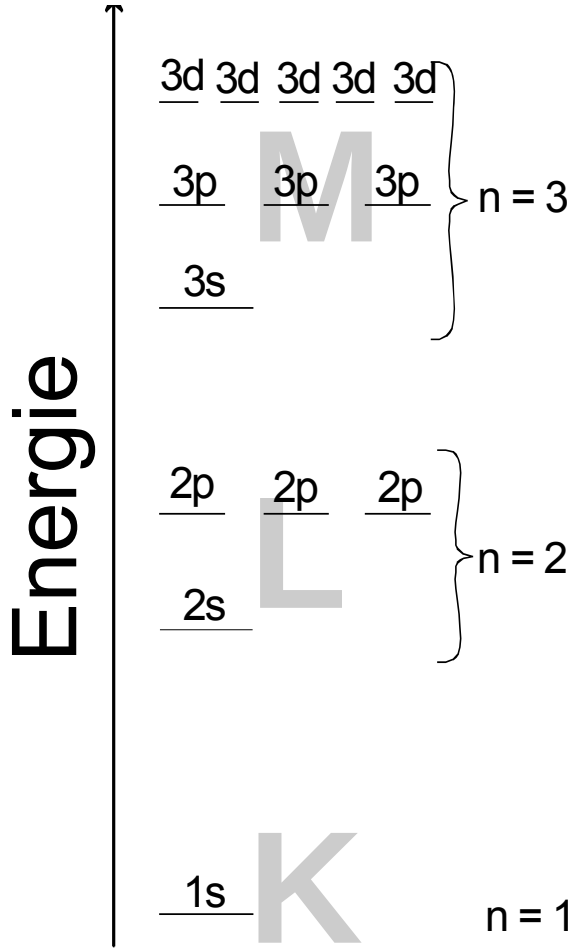


- Nachrutschen eines Elektrons aus einer höheren Schale
- Energieabgabe durch Strahlung (Photonen)
- Andere Prozesse: Bremsstrahlung

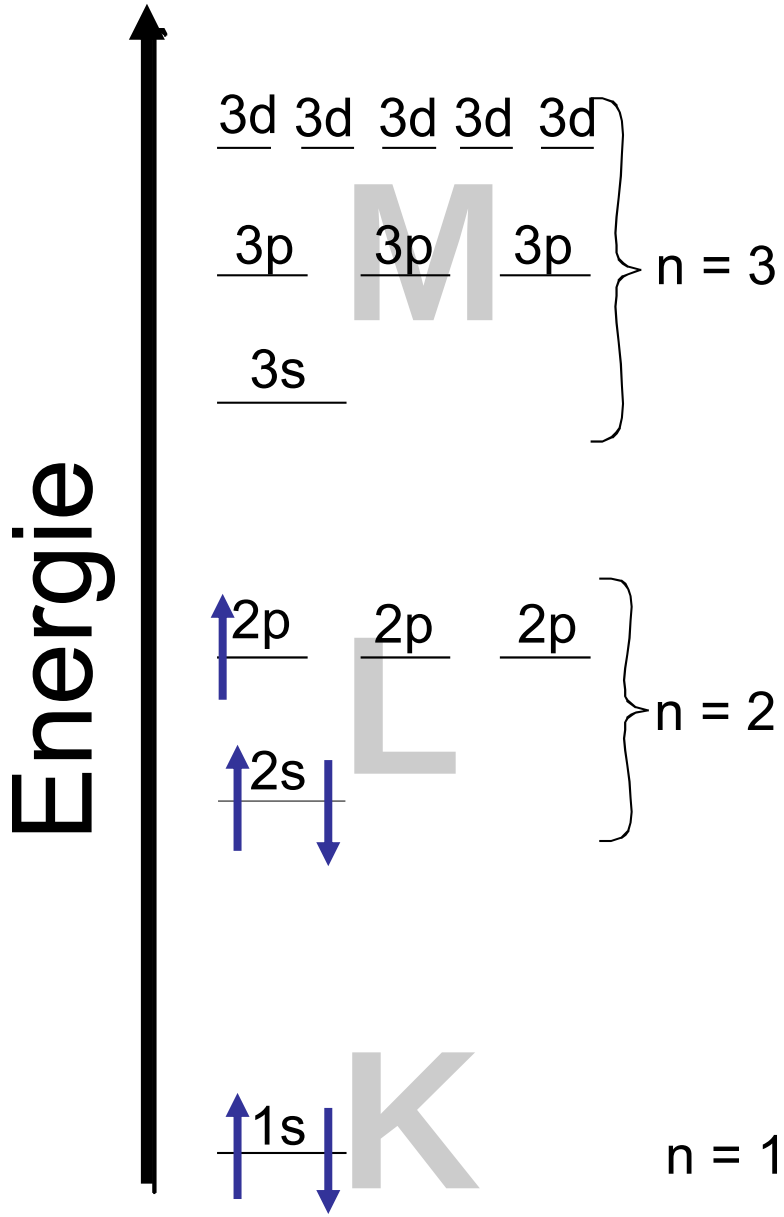


(http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_orbital, 10.05.2012)

Elektronenhülle



- verschiedene Energieniveaus
  → Schalen (K, L, M, …)
- innerhalb Schalen verschiedene Orbitale



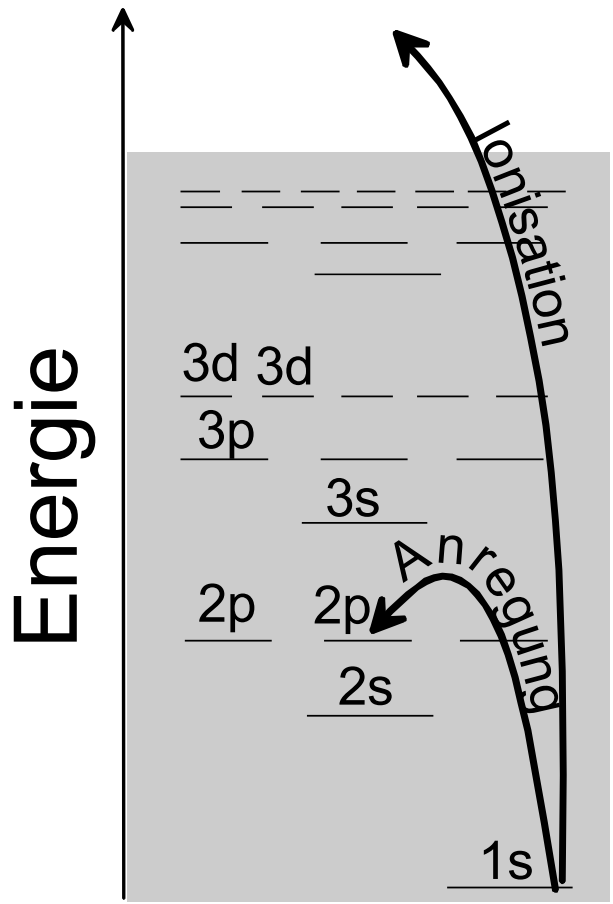
Energieniveaus im H-Atom: Bestimmt durch Quantenzahlen

n: Hauptquantenzahlen

l, *m*: Nebenquantenzahlen

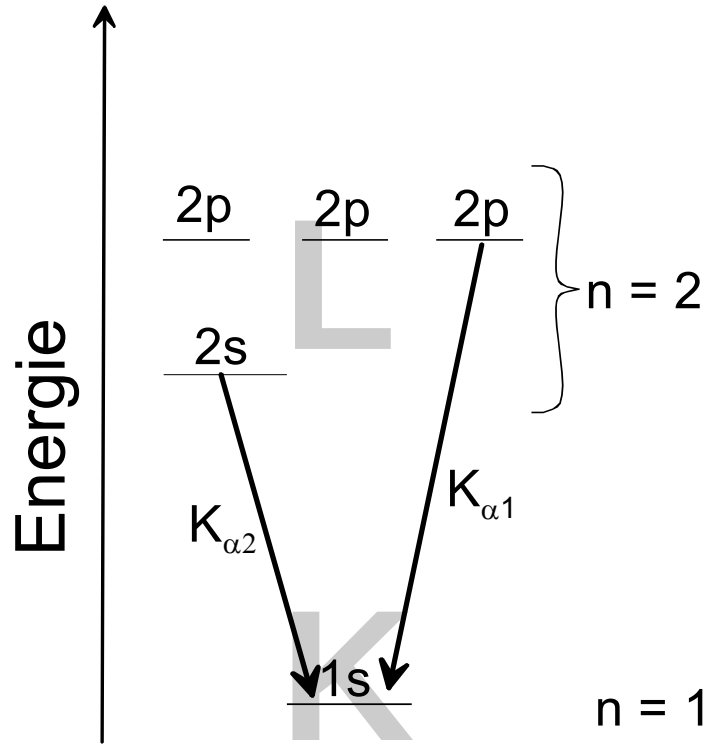
Auffüllen der Orbitale: Pauli-Prinzip

Anregung & Ionisation



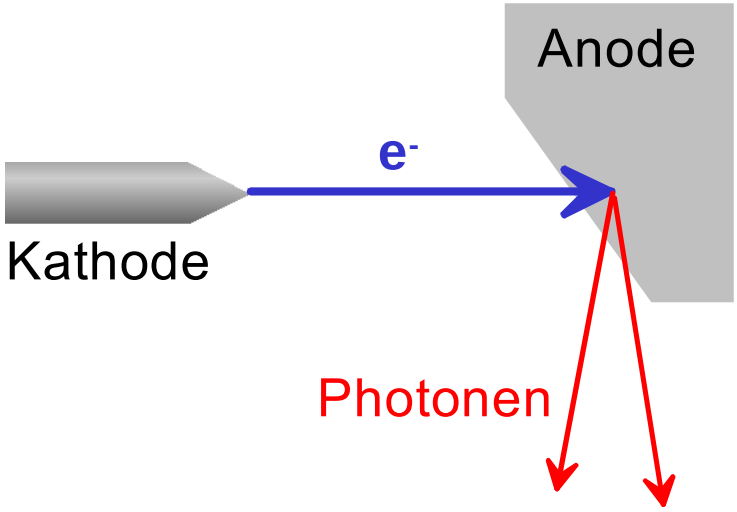
- Anregung: Auf Elektron übertragene Energie **kleiner** als Bindungs-Energie
- Ionisation: Auf Elektron übertragene Energie **grösser** als Bindungs-Energie

Charakt. Strahlung



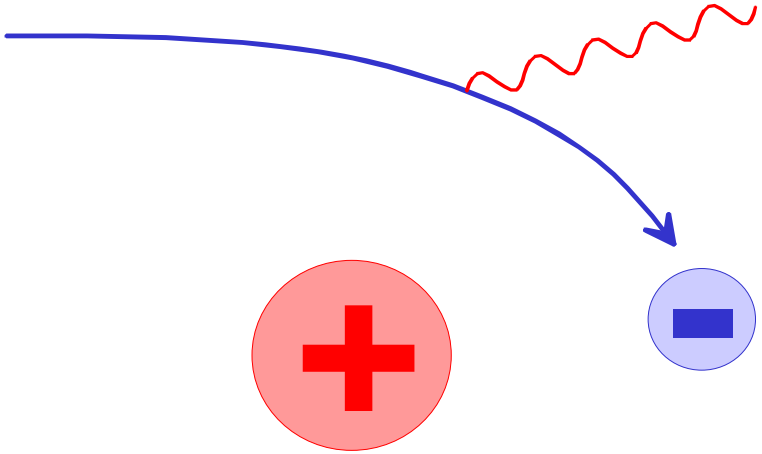
- Übergang zwischen L- und K-Schale
  → K_α-Linien
- Übergang zwischen M- und K-Schale
  → K_β-Linien

Prinzip Röntgenröhre



- Hochspannung zwischen Kathode und Anode
- Austritt von Elektronen aus der Kathode und Beschleunigung
- Abbremsen der Elektronen im Anodenmaterial

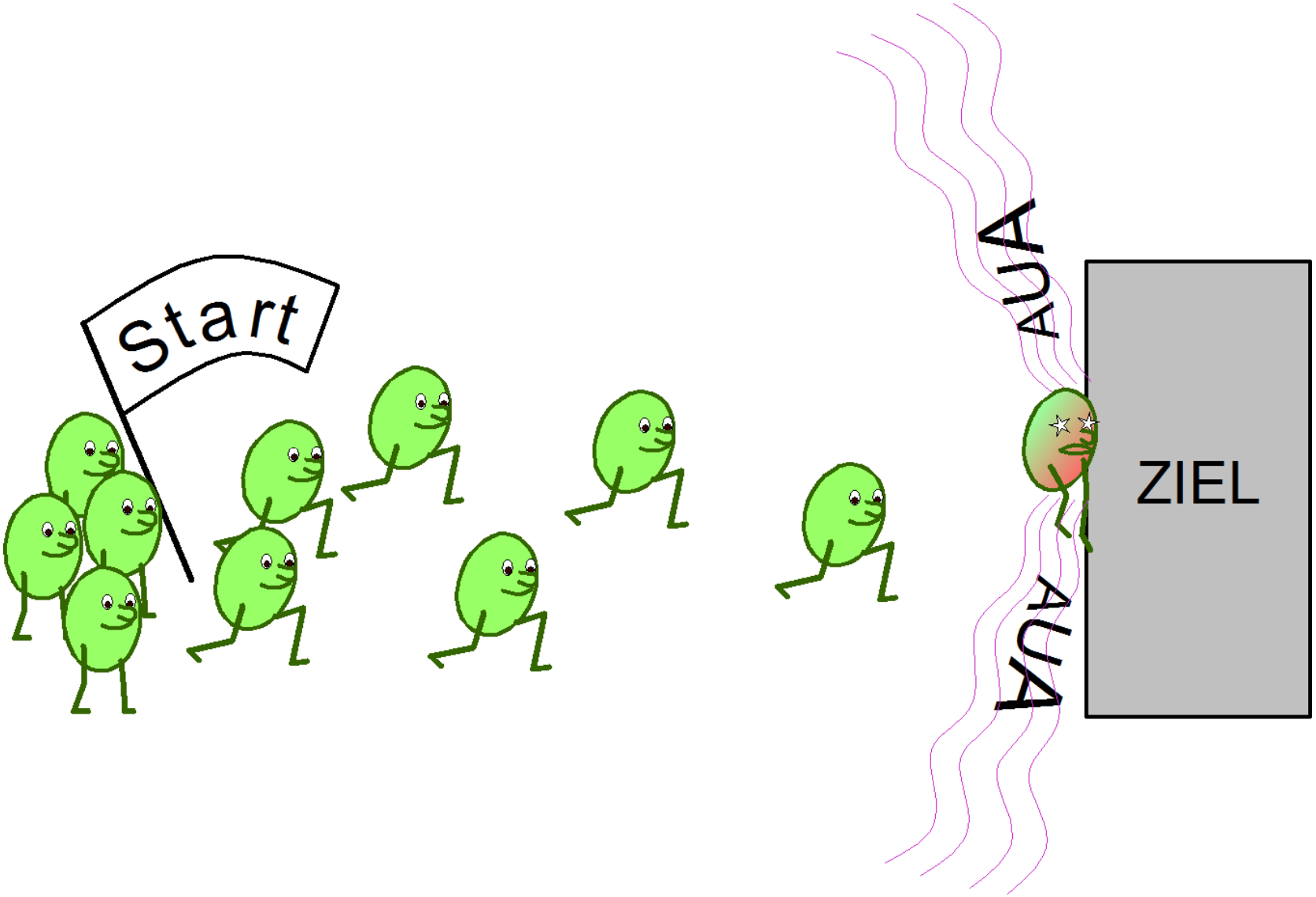
Bremsstrahlung



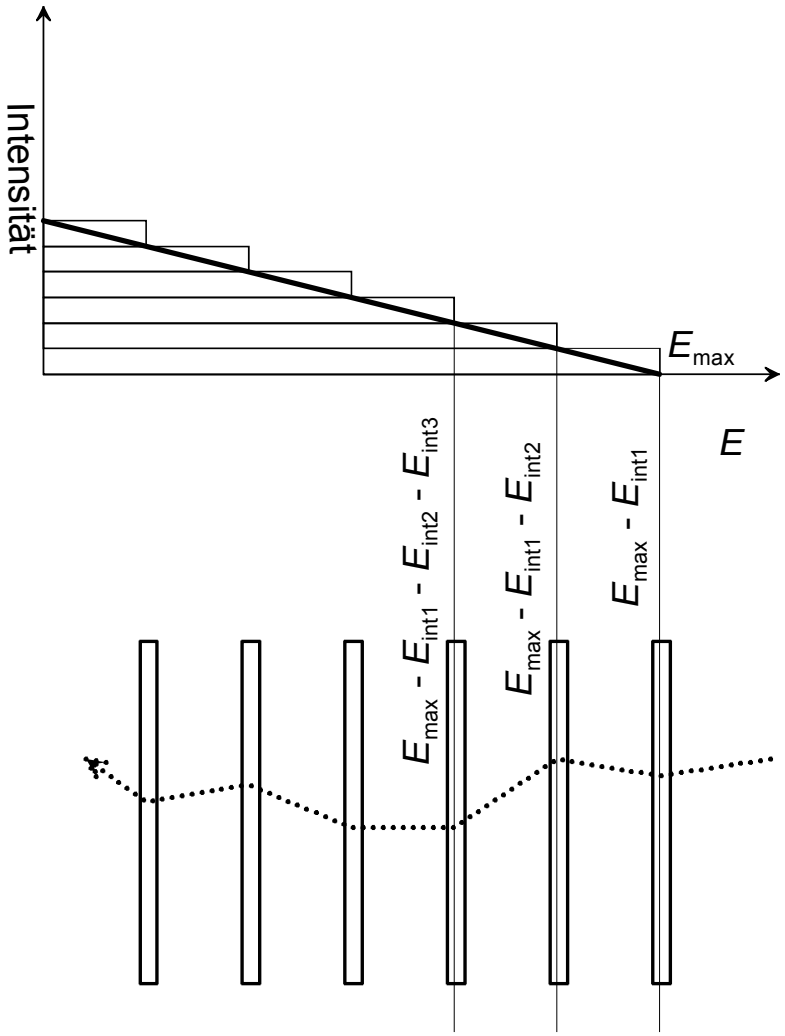
- Ablenkung und Abbremsung von Elektronen

  → beschleunigte Ladung

- Emission von Strahlung

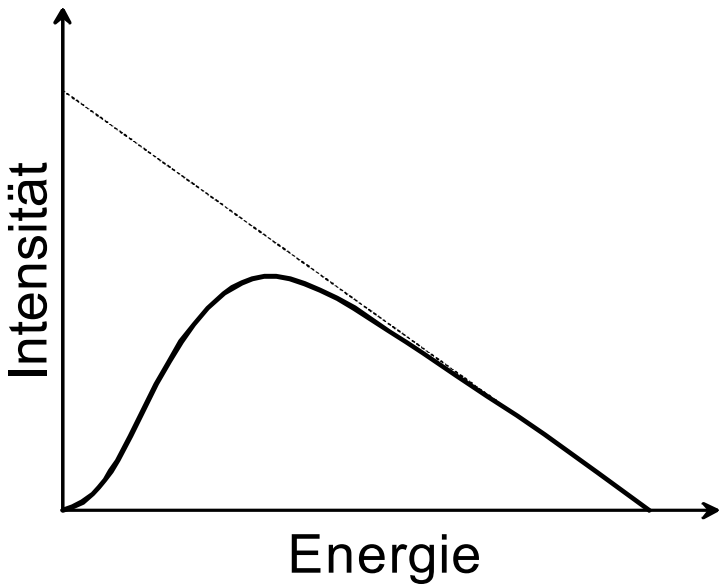

Start
AUA
AUA
ZIEL

Bremsberg



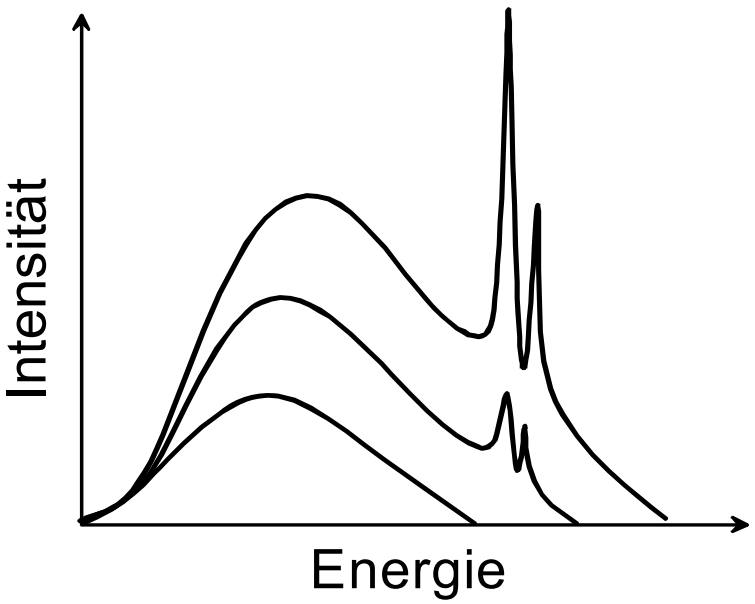
- maximale Photonenenergie = kinetische Energie der Elektronen ($q \cdot U$)
- Energieabgabe in einem einzelnen Wechsel-wirkungsprozess unwahr-scheinlich
- Absorption der nieder-energetischen Photonen im Anodenmaterial

Bremsberg

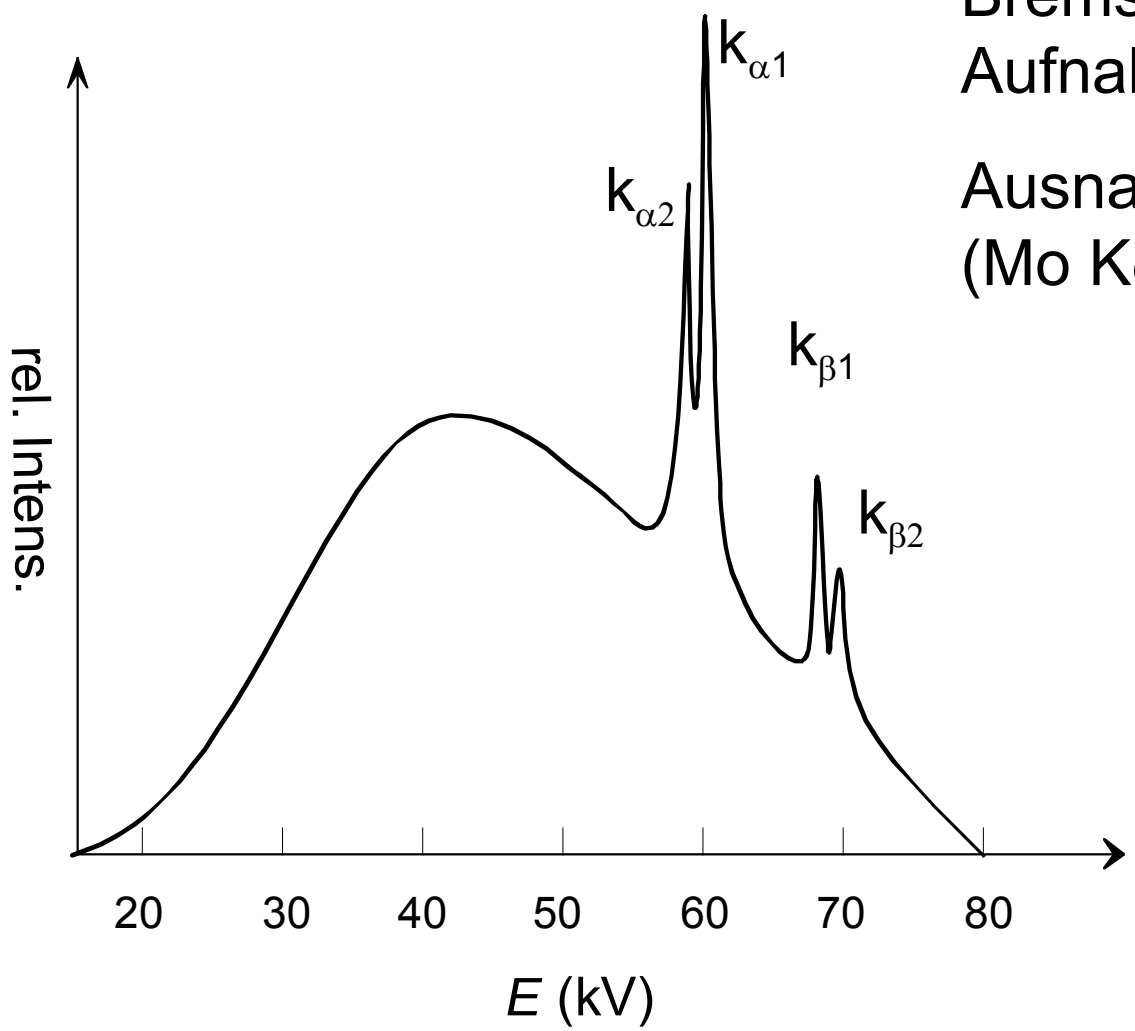


- maximale Photonenenergie = kinetische Energie der Elektronen (q·*U*)
- Energieabgabe in einem einzelnen Wechsel-wirkungsprozess unwahr-scheinlich
- Absorption der nieder-energetischen Photonen im Anodenmaterial

Röntgenspektrum



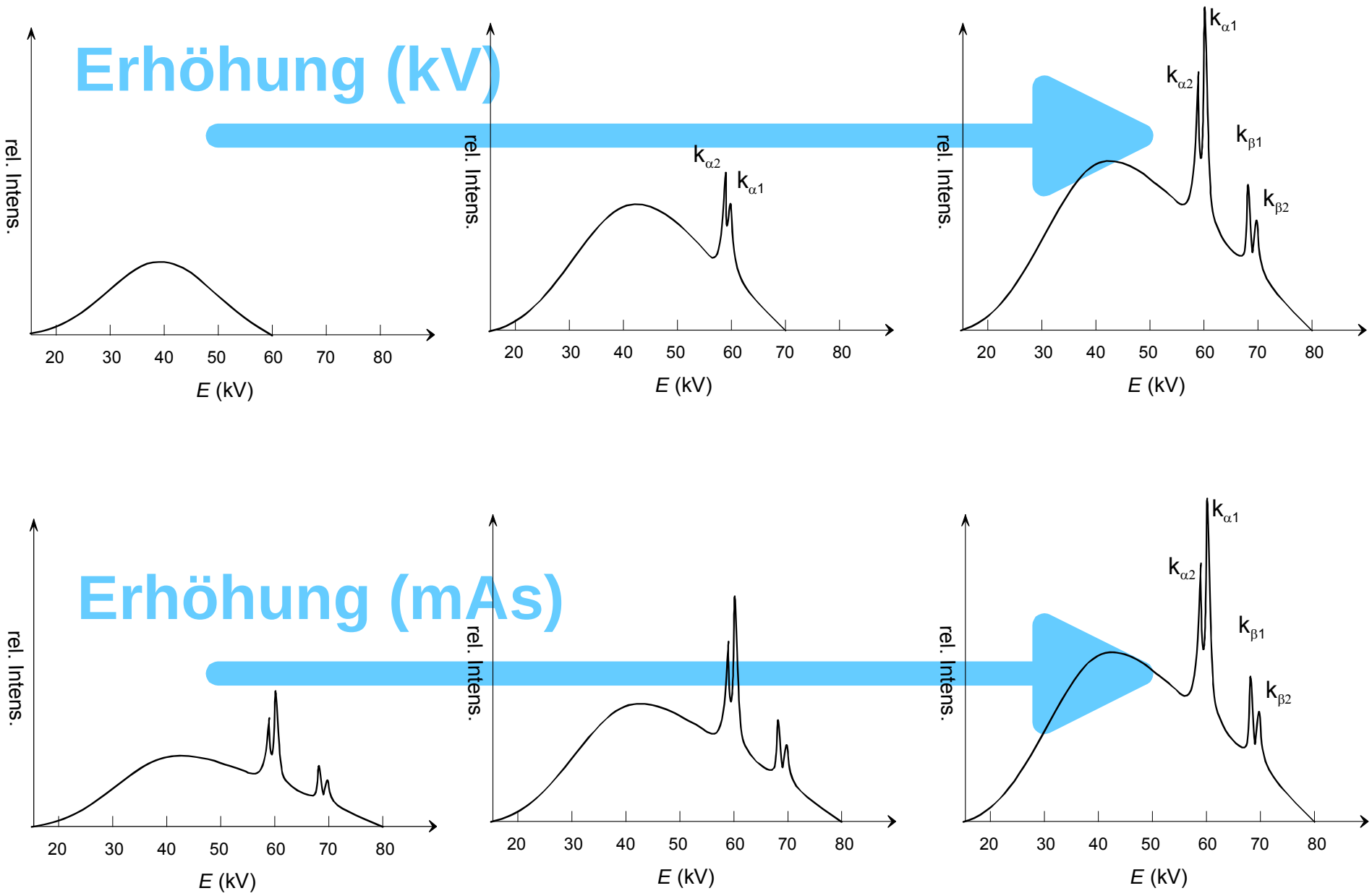
- Bremsberg
- charakteristische Strahlung



Spektrum einer Röntgenröhre

Bremsberg wird für Aufnahmen genutzt

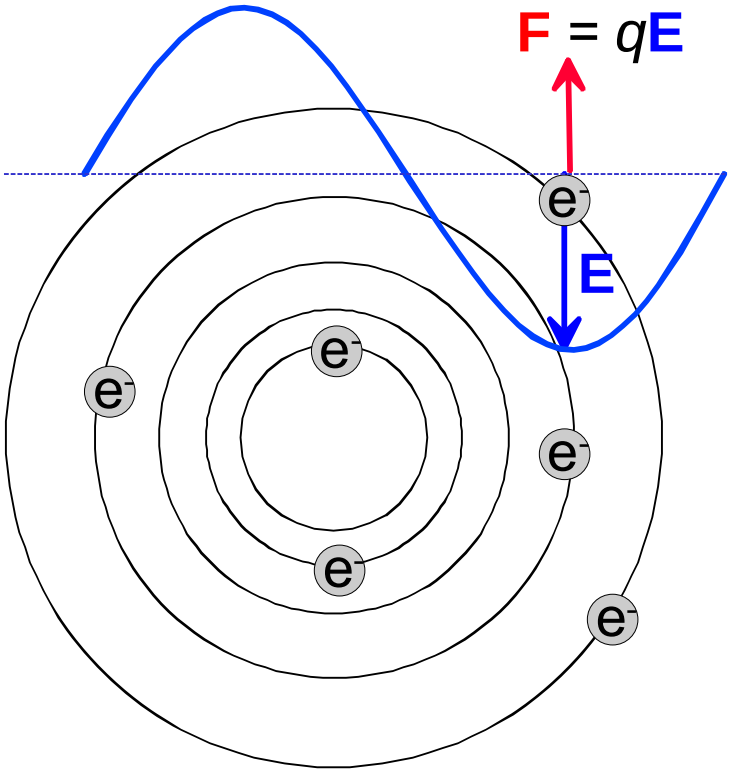
Ausnahme: Mammographie (Mo Kα – Linie)


Erhöhung (kV)
rel. Intens.
E (kV)
20 30 40 50 60 70 80
$k_{\alpha 2}$
$k_{\alpha 1}$
$k_{\beta 1}$
$k_{\beta 2}$
Erhöhung (mAs)

Inhalt

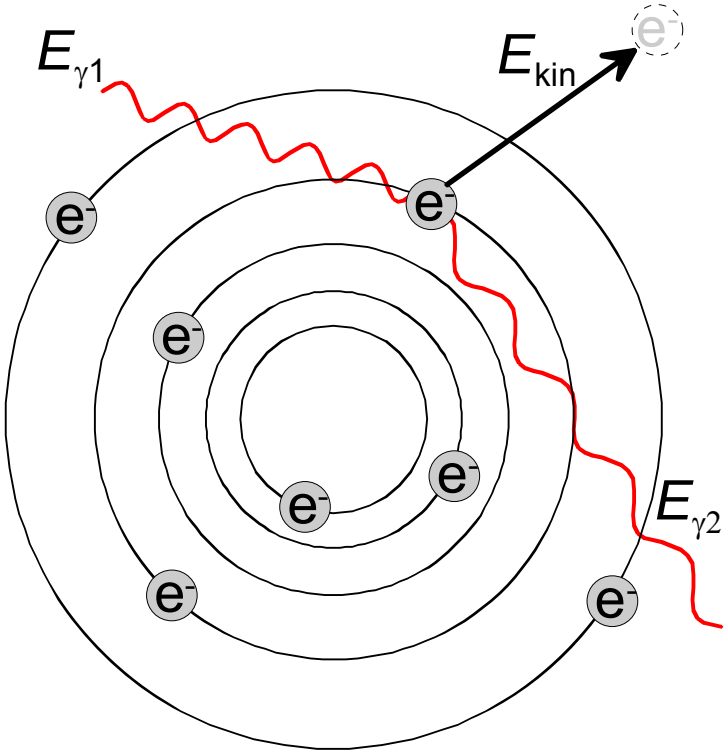
- Grundbegriffe
- Erzeugung ionisierender Strahlung
- Wechselwirkungen

Wechselwirkungen



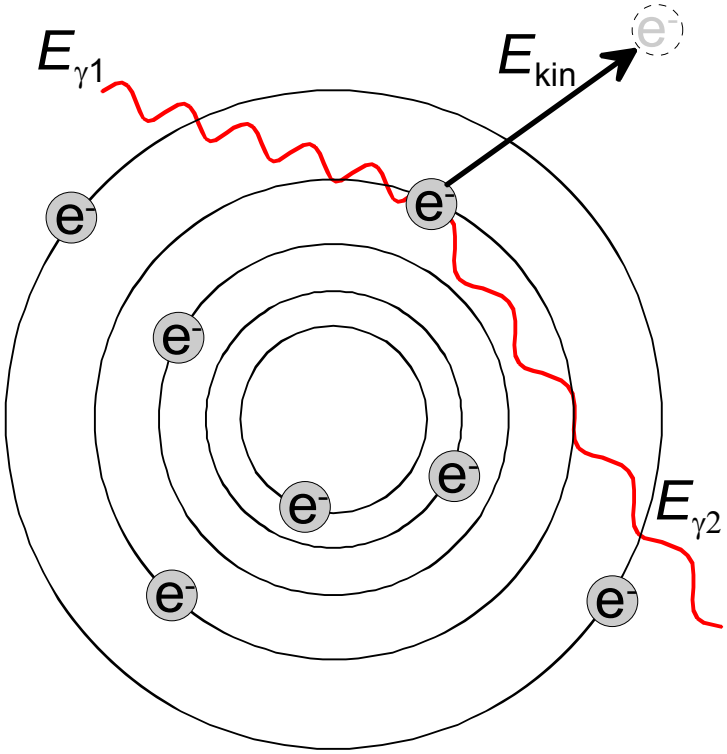
- elektromagnetische Strahlung
  → elektrisches Feld
- Kraftwirkung auf Hüllenelektron
- Energieübertragung auf Hüllenelektron

Comptoneffekt



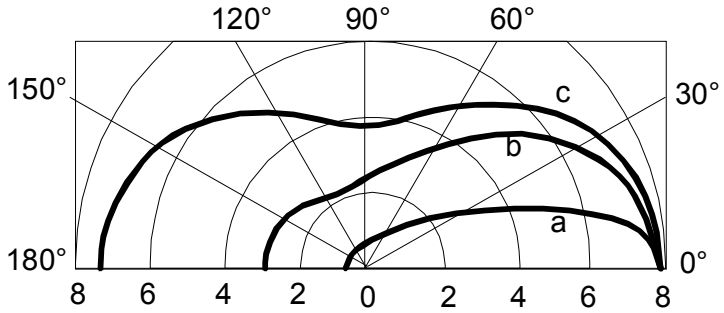
- Energieübertragung auf Hüllenelektron
- Hüllenelektron fliegt weg
- Photon wird gestreut

Comptoneffekt



- vorwiegend äussere Hüllenelektronen betroffen
- wichtigster Streuprozess zwischen ca. 100 keV bis 2 MeV
- Bedeutung in der Diagnostik: Produziert Streustrahlung

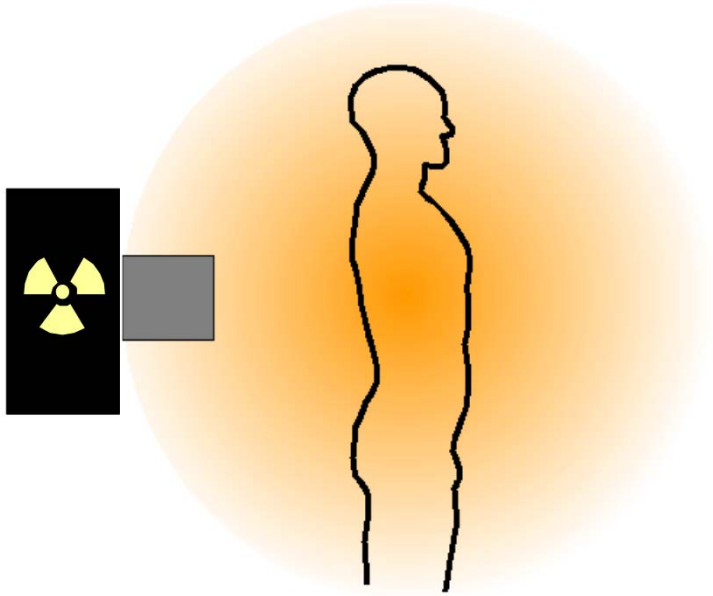
Streustrahlung



(a) 3 MeV
(b) 200 keV
(c) 10 keV

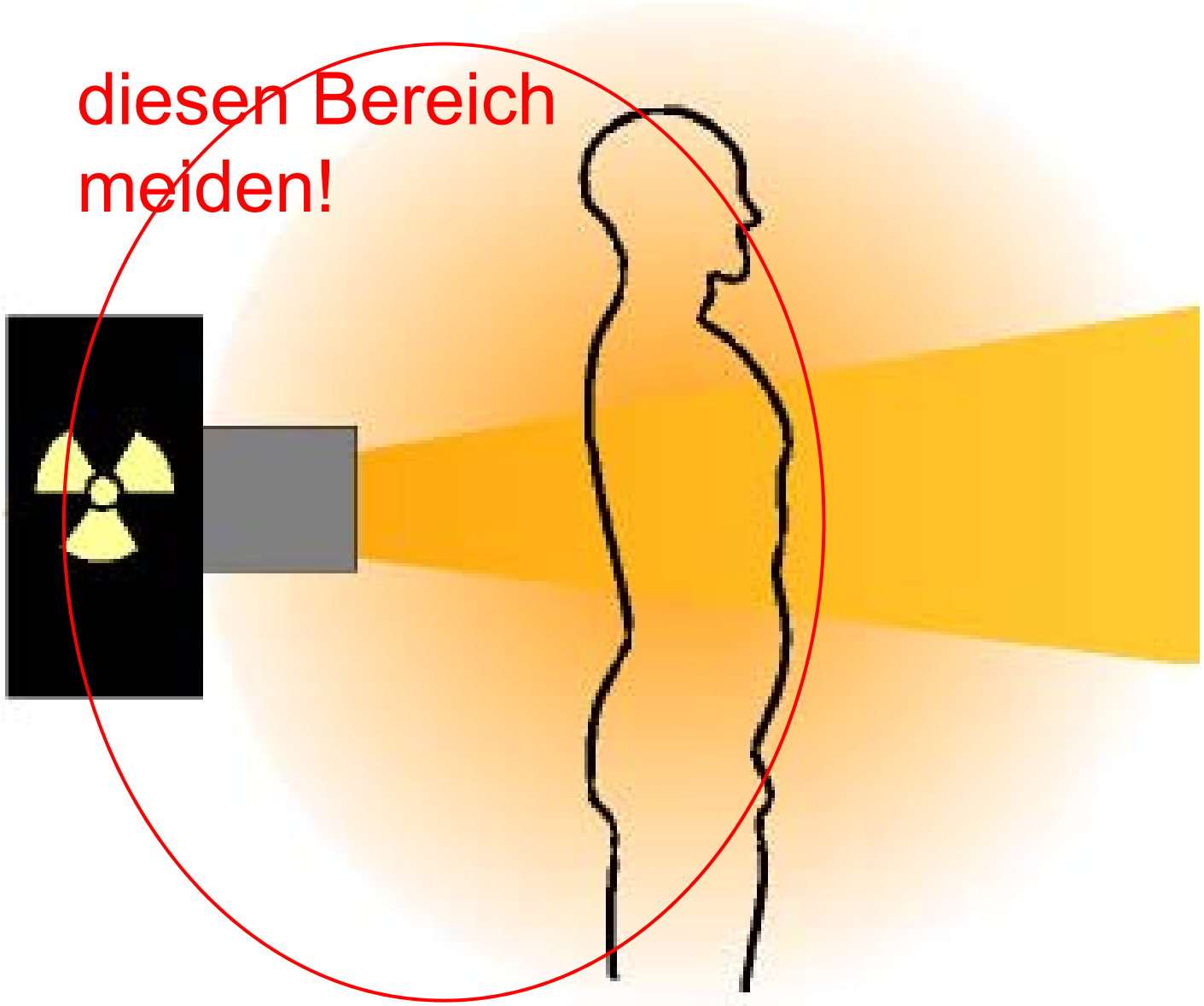
- tiefe Energien (c): Viel Rückstreuung
- hohe Energien (a): Vorwärtsstreuung dominiert

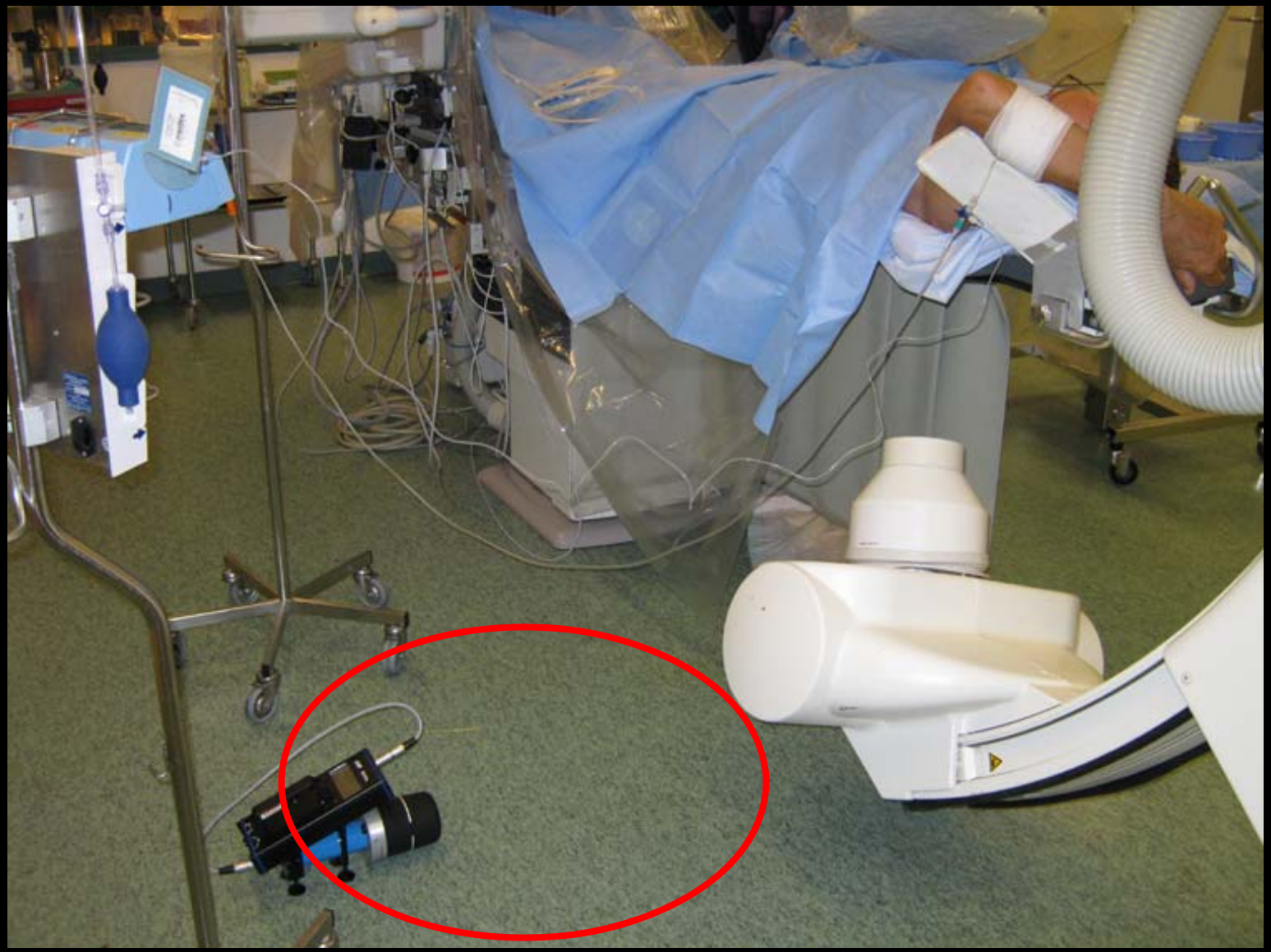
Streustrahlung



- Strahlenschutzproblem
- Einfluss auf Bildqualität

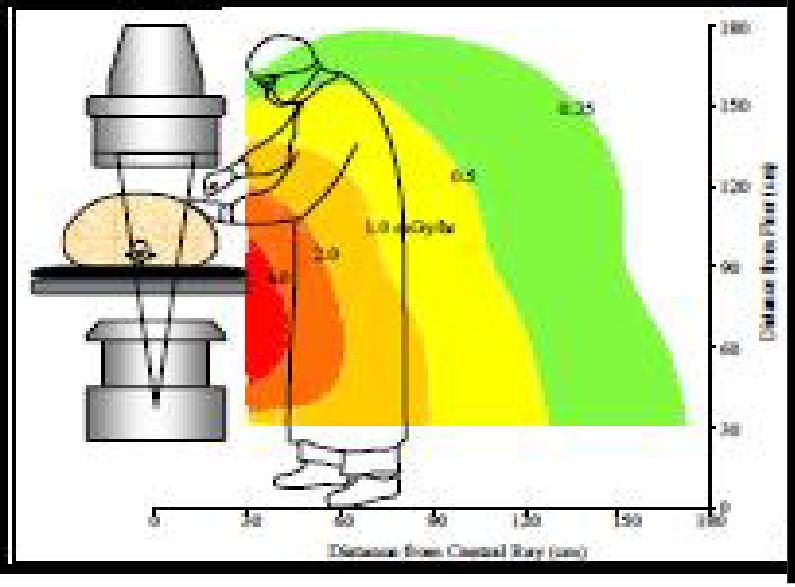
AAA… Streustrahlenbereich meiden

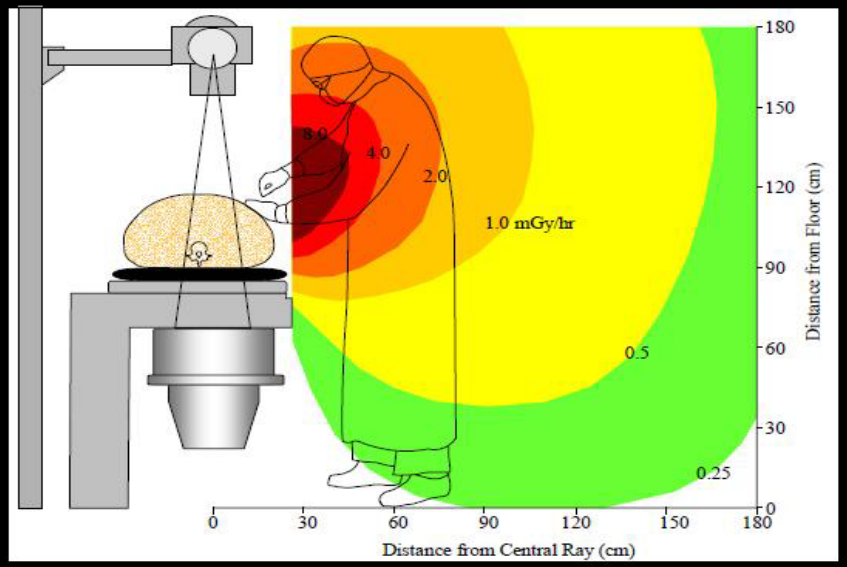




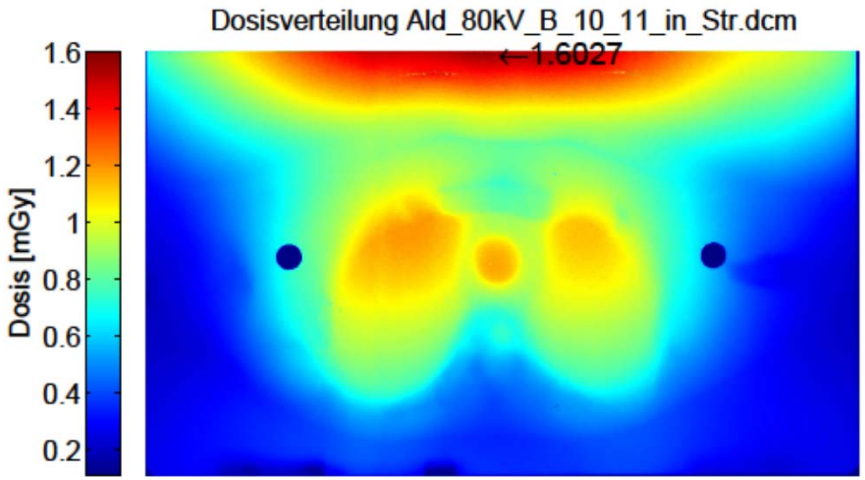
Messungen Cardangio KSA: R_{max} = 2 mSv/h;
***H**(10) = 60 μSv für ca. 5 min Untersuchung**

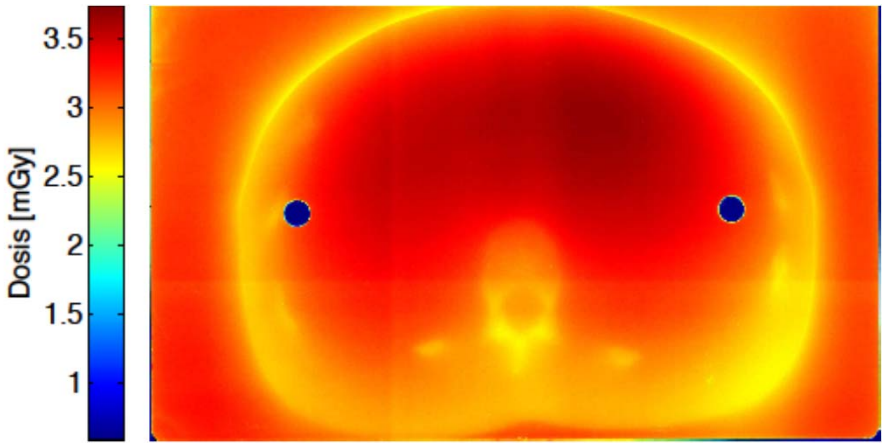
Durchleuchtung – Röhrenplatzierung





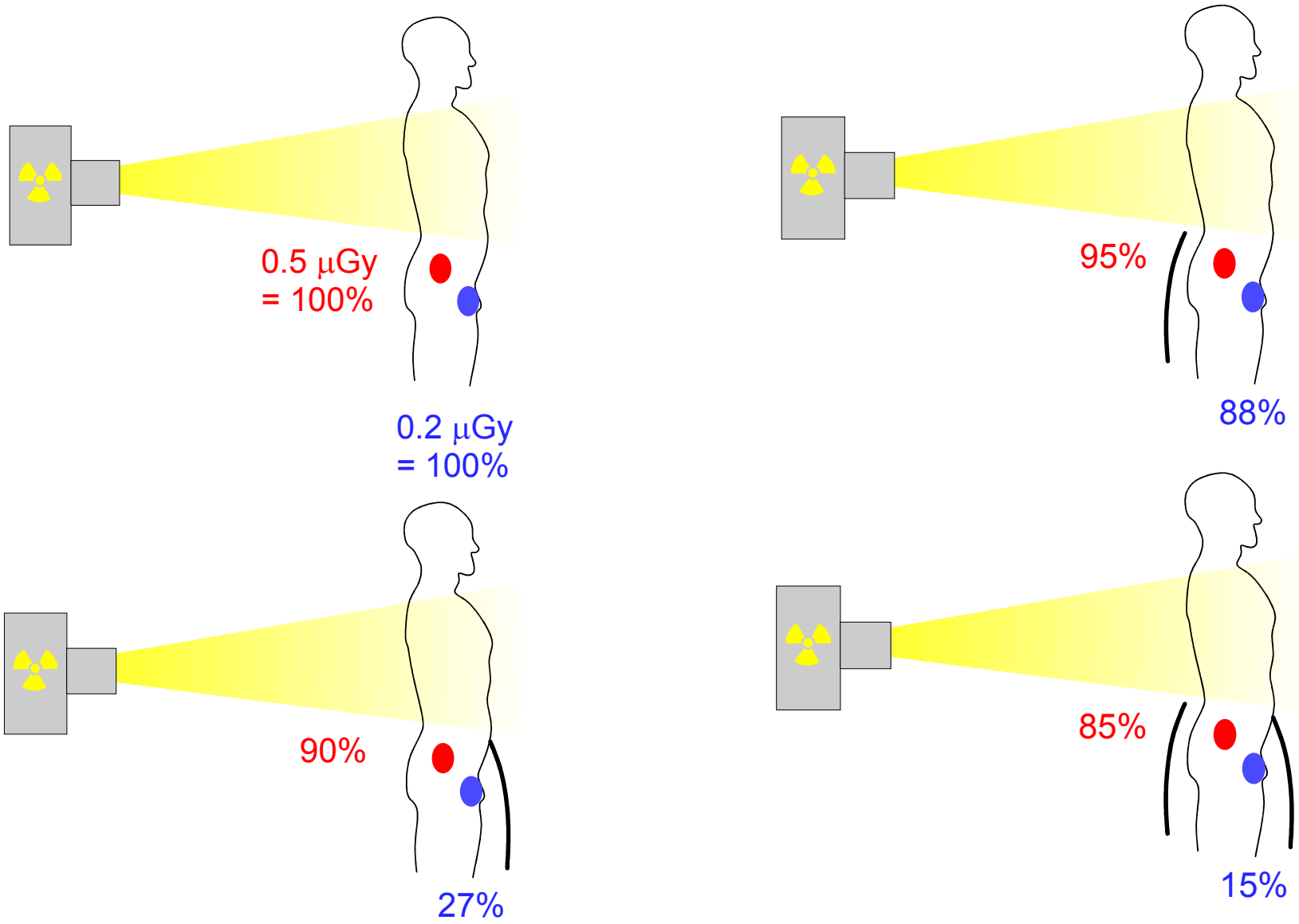
Streuung im Patienten



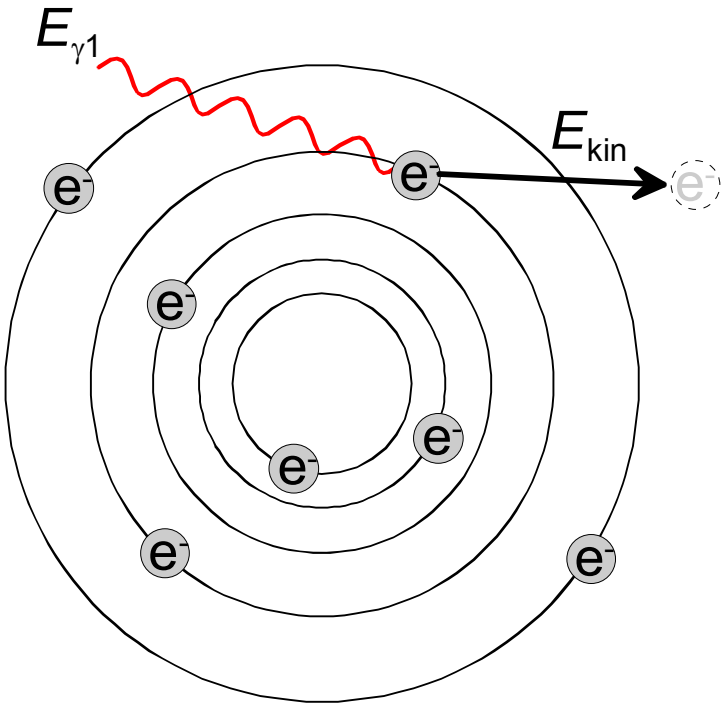


Verschiedene Fälle, ausserhalb Nutzsttrahlenfeld

- Fluoro-Feld ap
- CT

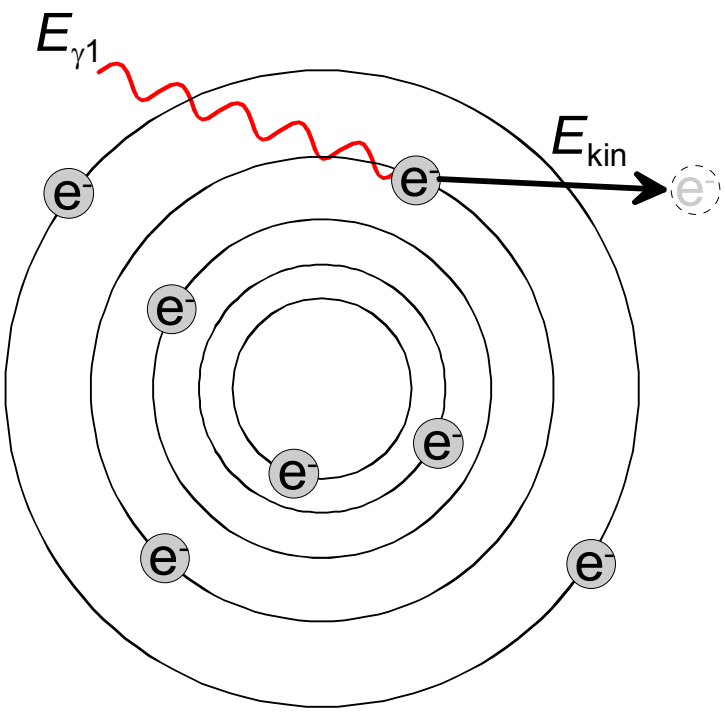

0.5 μGy
= 100%
0.2 μGy
= 100%
95%
88%
90%
27%
85%
15%

Photoeffekt



- Energieübertragung auf Hüllenelektron: **ALLE** Energie des Photons in kinetische Energie des Elektrons umgewandelt
- Hüllenelektron fliegt weg
- **KEIN** gestreutes Photon

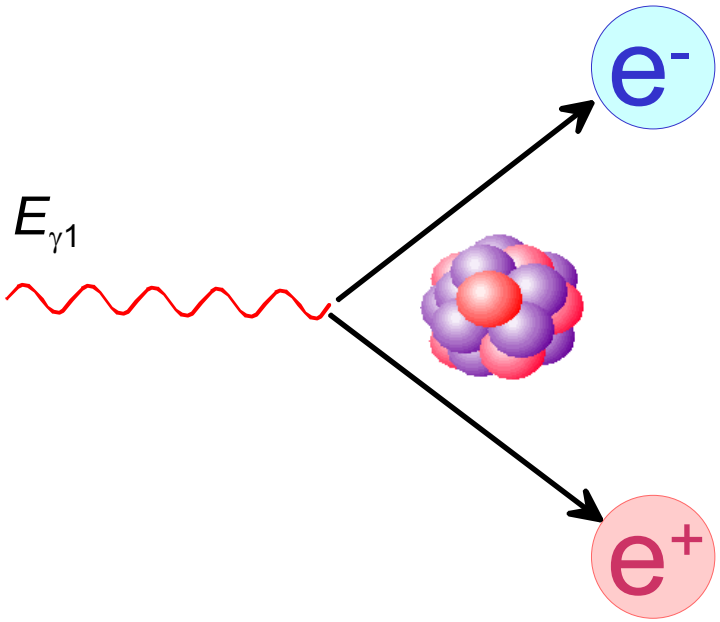
Photoeffekt



- vorwiegend innere Hüllenelektronen betroffen
- häufig bei tiefen Energien (unterhalb 100 keV)
- vorwiegend bei schweren Elementen:

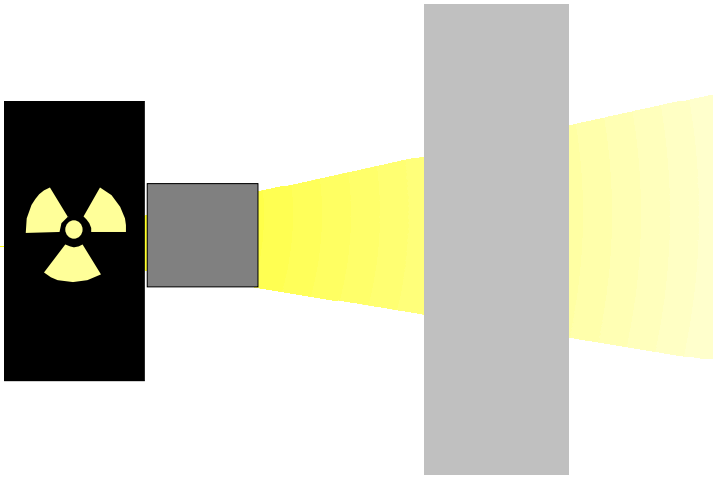
  Calcium → Knochenkontrast im Röntgenbild

Paarbildung



- Äquivalenz zwischen Energie und Masse ($E = mc^2$)
- Photonenenergie grösser 1.022 MeV
- Elektron-Positron-Paar entsteht

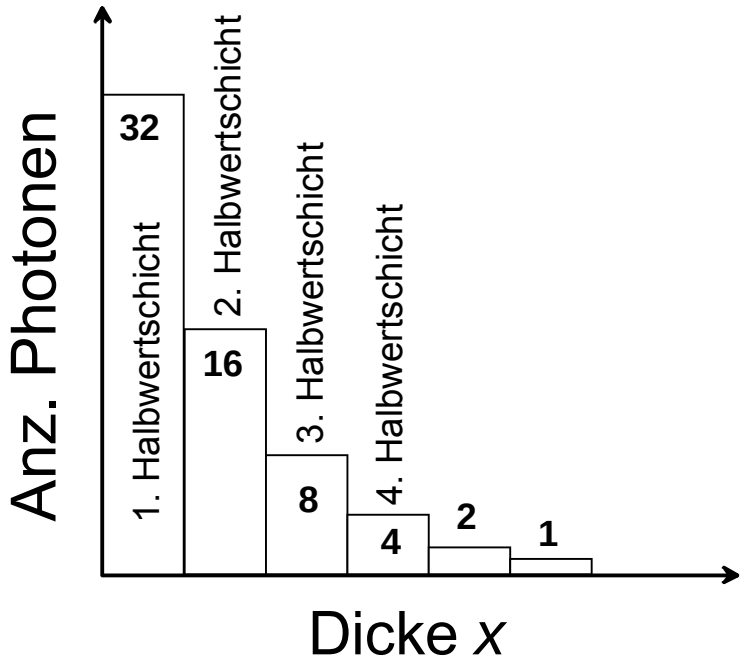
Absorption / Schwächung



- Schwächung stark bei
  → schweren und dichten Materialien
  → niedrigen Photonenenergien

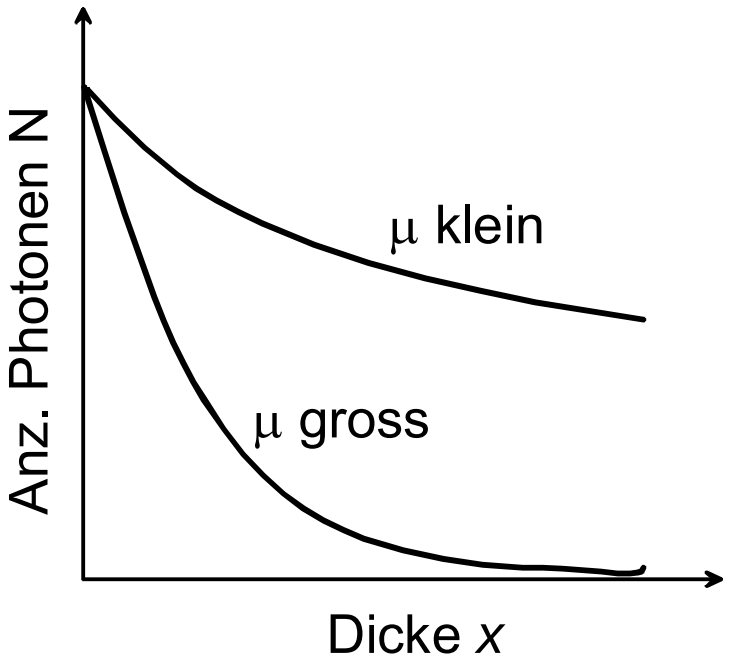
- je dicker der Absorber, desto stärker die Schwächung

Beer-Lambertsches Gesetz



- konstante Schichtdicke, bei der 50% der Photonen absorbiert werden:
  → Halbwertschicht
- nach 2 Halbwertsschichten ¼ der Strahlungsintensität
- exponentielle Abschwächung

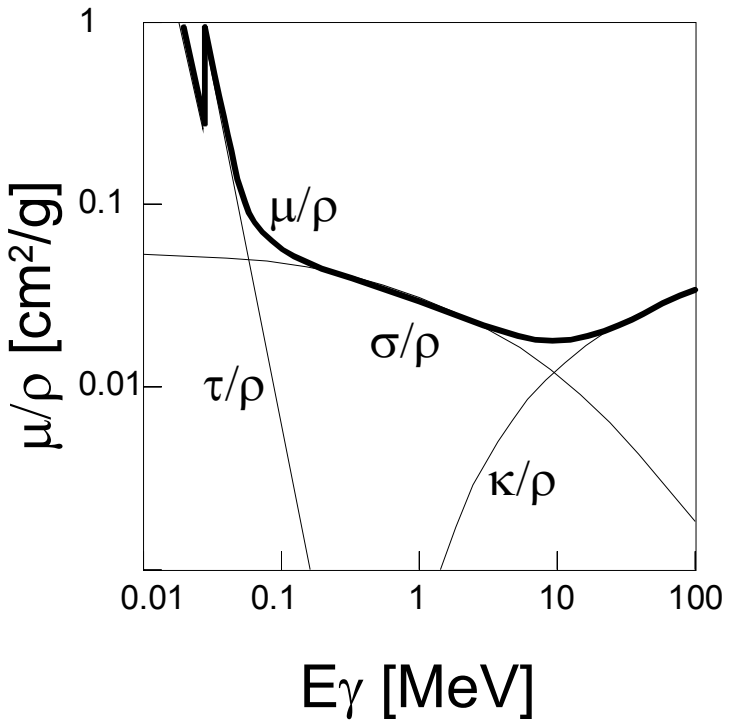
Absorptionskoeffizient μ



- grosses μ
  → kleine Halbwertschicht
- kleines μ
  → grosse Halbwertschicht

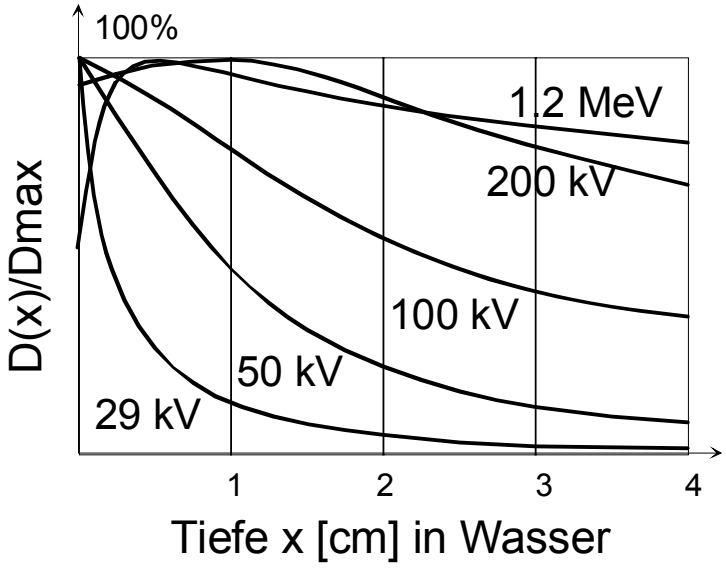
$$N(x) = N_0 e^{-\mu x}$$

Energieabhängigkeit



- bei tiefen Energien dominiert der Photoeffekt (τ/ρ)
- zwischen 100 keV und ca. 2 MeV dominiert der Comptoneffekt (σ/ρ)
- Paarbildung (κ/ρ) findet oberhalb 1.022 MeV statt

Energieabhängigkeit



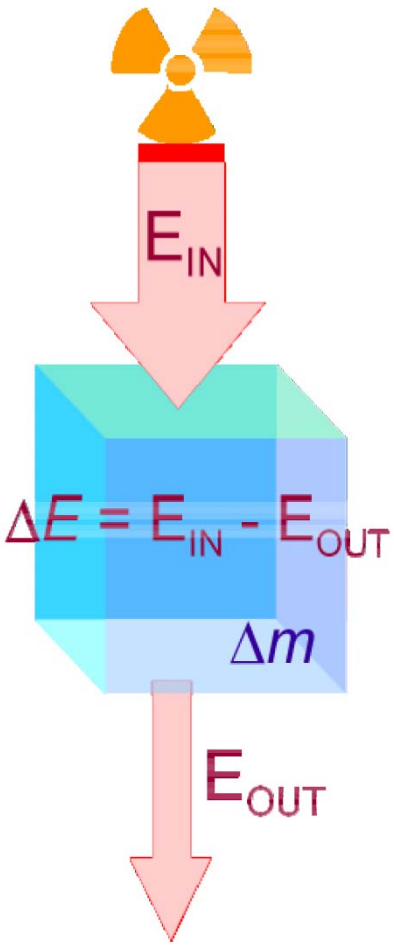
- Beer-Lambertsches Gesetz gilt nicht immer!
- Faustregel für Röntgen-strahlung unterhalb 150 keV:

  je höher die Photonen-energie, desto grösser die Durchdringungsfähigkeit

Inhalt

- Grundbegriffe
- Erzeugung ionisierender Strahlung
- Wechselwirkungen
- Die Energiedosis

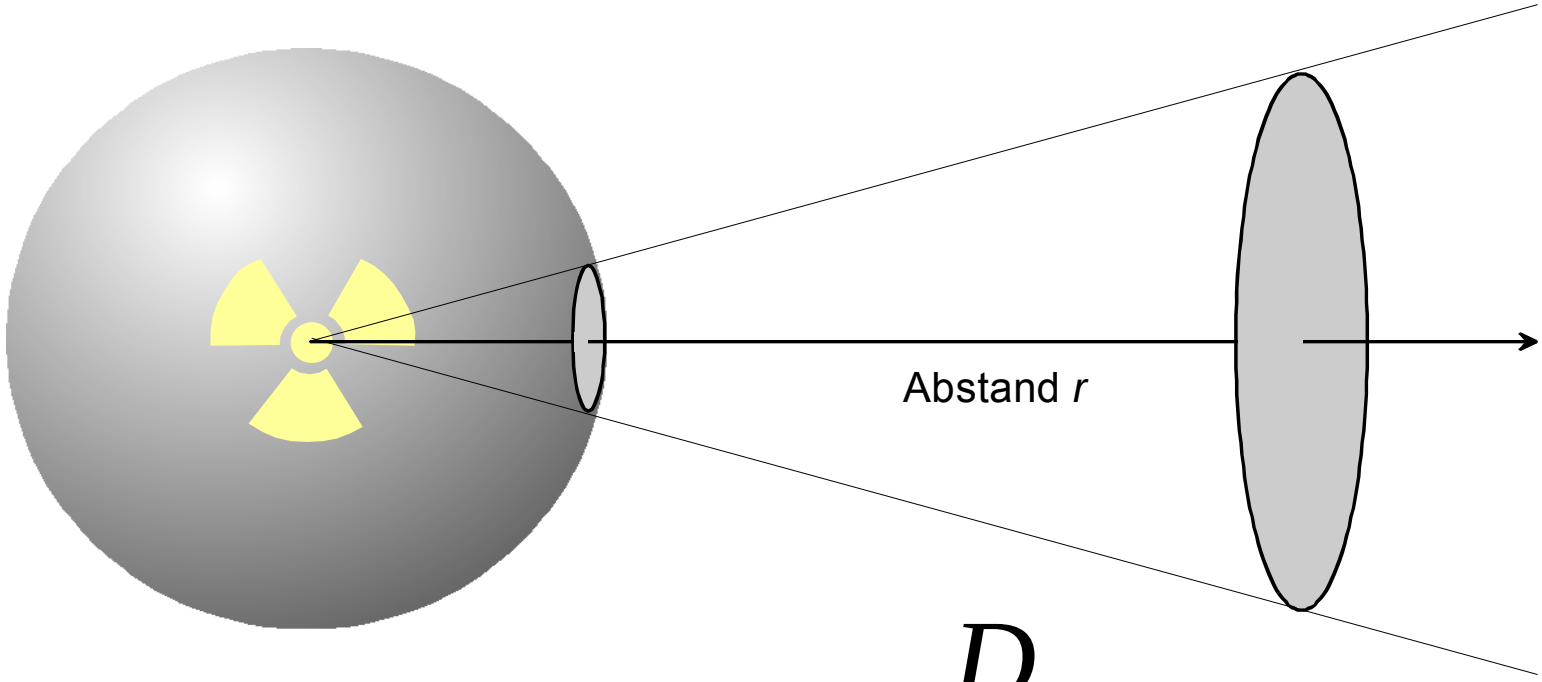
Definition



- Strahlungsenergie ΔE, die pro Masse Δm absorbiert wird.
- SI-Einheit: Joule / kg = Gy

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m}$$

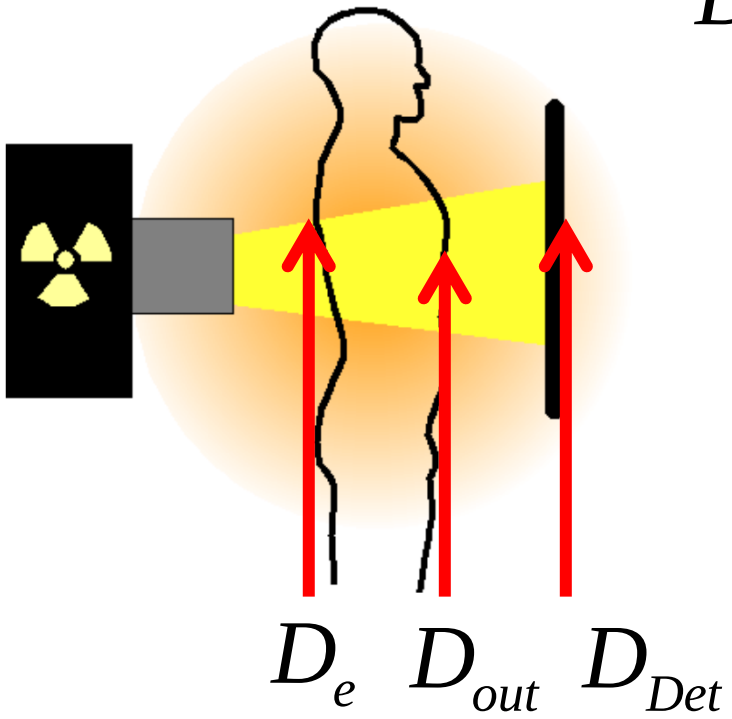
Quadrat. Abstandsgesetz



$$D(r) = \frac{D_0}{r^2}$$

Eintritts- vs. Austrittsdosis

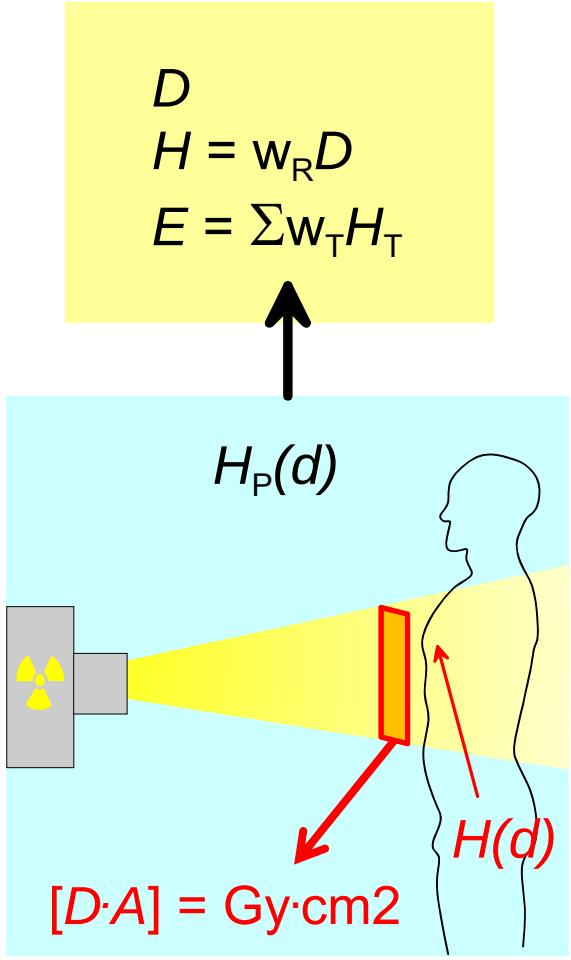
$$\frac{D_e}{D_{Det}} = ?$$



Koenig et al. 2001,
Am J Roentgenol.

Wagner, 2007:Biomed Imaging Interv J

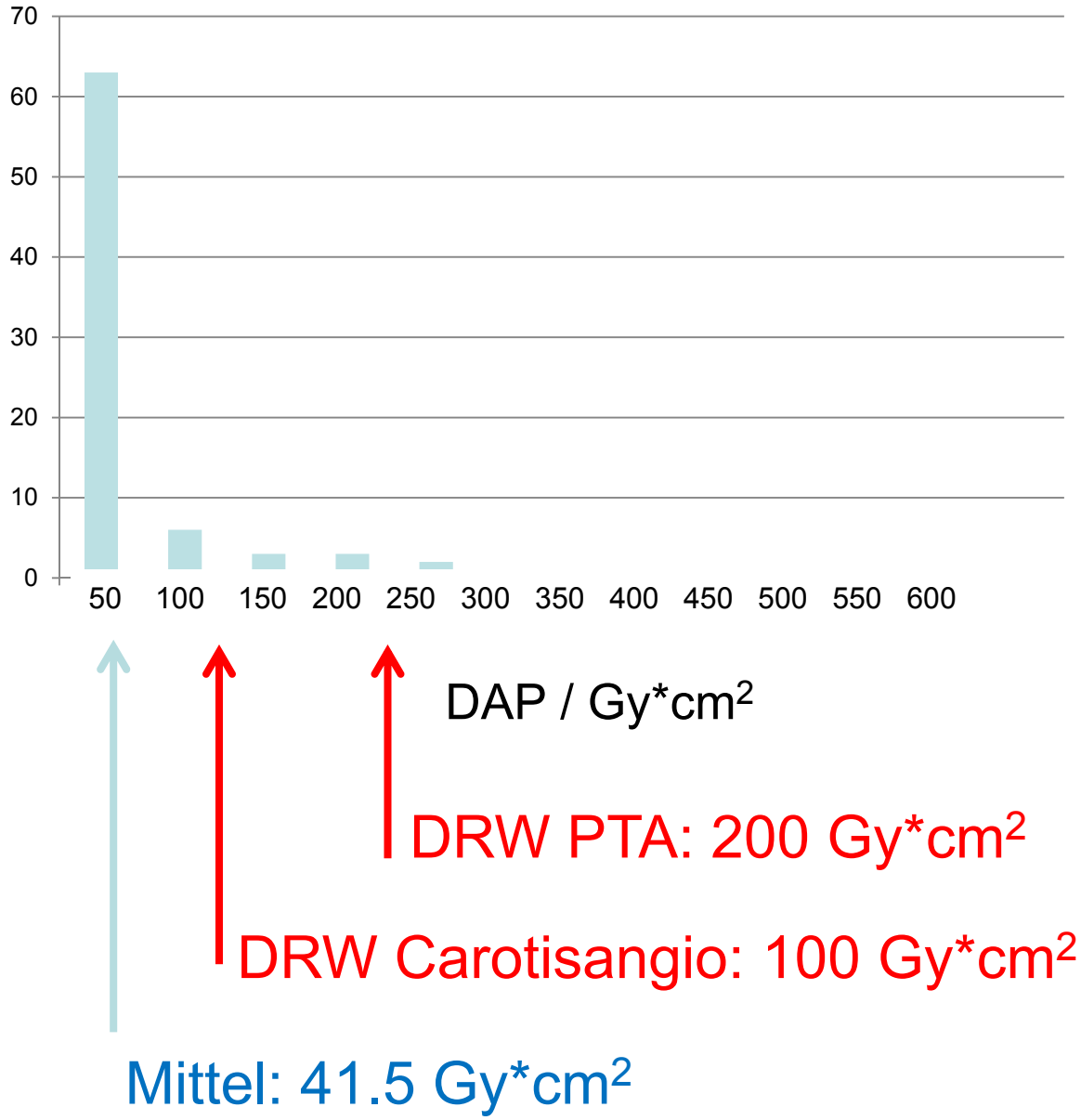
Dosis-Flächenprodukt DAP

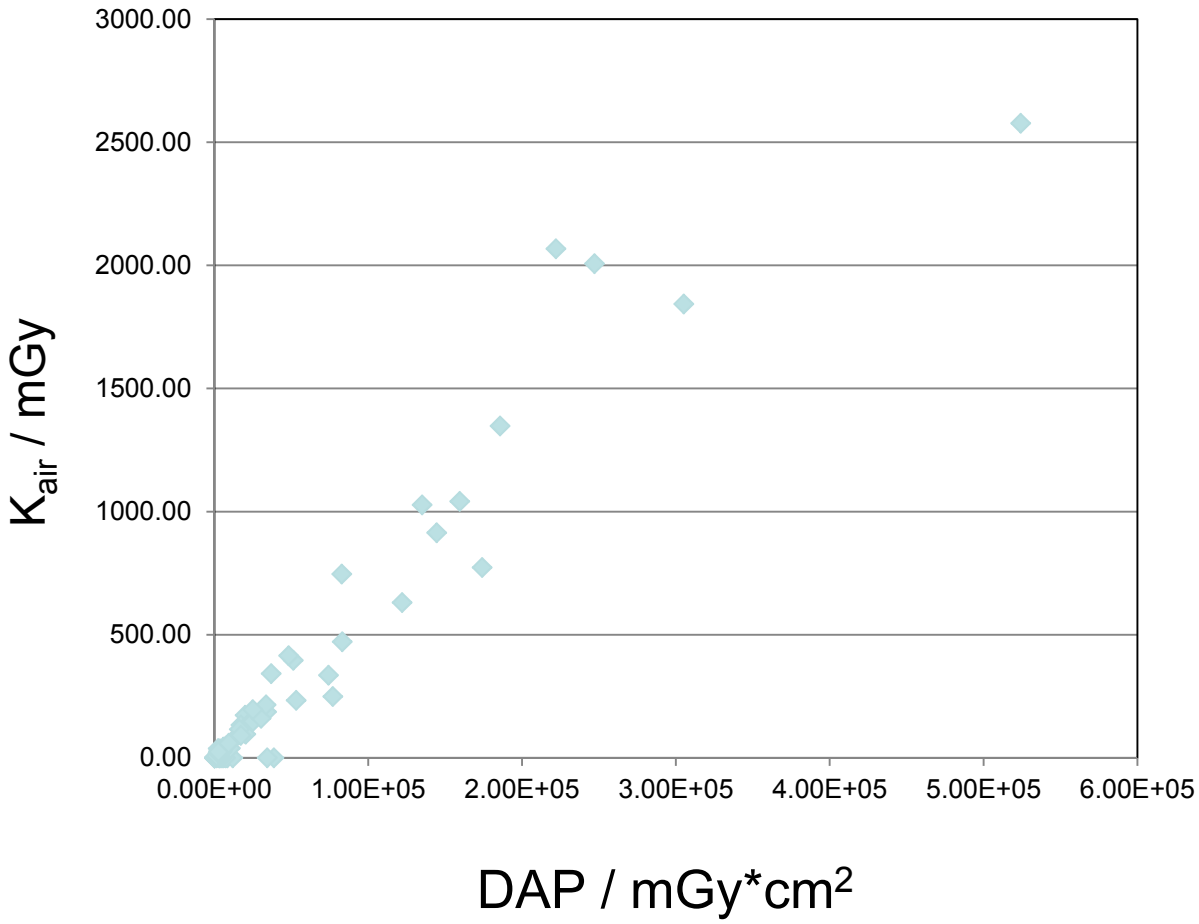


DAP vs. effekt. Dosis

- Nieren-Angio: 300 Gy·cm^2
  Dauer: 20 min
  E = 90 mSv

- Nephrostomie: 50 Gy·cm^2
  Dauer: 20 min
  E = 15 mSv


70
60
50
40
30
20
10
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
550
600
DAP / Gy*cm2
DRW PTA: 200 Gy*cm2
DRW Carotisangio: 100 Gy*cm2
Mittel: 41.5 Gy*cm2


3000.00
2500.00
2000.00
1500.00
1000.00
500.00
0.00
0.00E+00
1.00E+05
2.00E+05
3.00E+05
4.00E+05
5.00E+05
6.00E+05
K_air / mGy
DAP / mGy*cm²