



# Isotope, Radioaktive Zerfälle und Strahlungen

*L. Smeller*

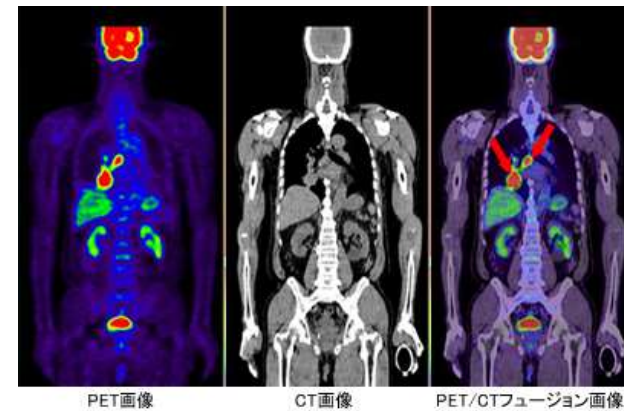
# Warum ist es interessant?

Medizinische Anwendungen der radioaktiven Strahlungen:

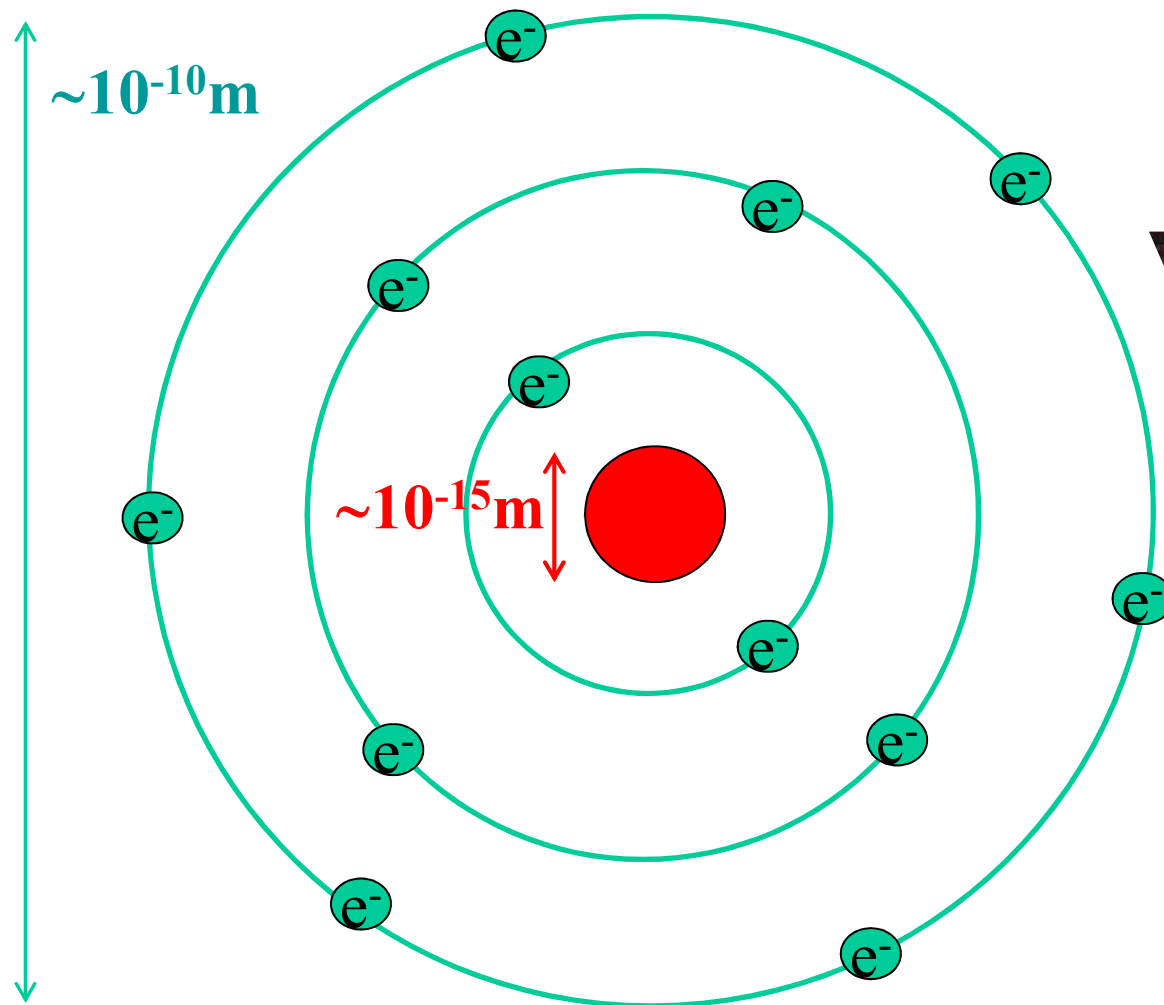
- Diagnostik  
(Isotopendiagnostik)
- Therapie (Strahlentherapie)

Pharmazeutische Anwendungen:

- Pharmakokinetische  
Untersuchungen



# Aufbau des Atoms

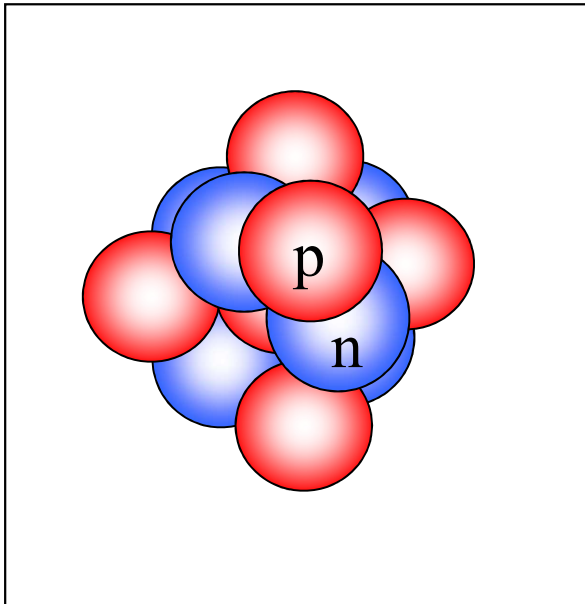


Elektronenschale  
=> chemische  
Eigenschaften



**Atomkern:**  
=> **Radioaktivität**

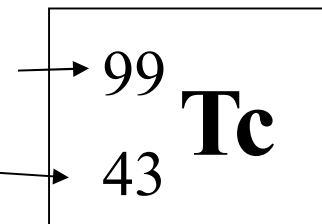
# Aufbau des Atomkernes



	Ladung	Masse
<b>Proton</b>	<b>+1 e</b>	<b>1 a.u.</b>
<b>Neutron</b>	<b>0</b>	<b>1 a.u.</b>

A (Massenzahl) = Protonenzahl + Neutronenzahl

Z (Ordnungszahl) = Protonenzahl

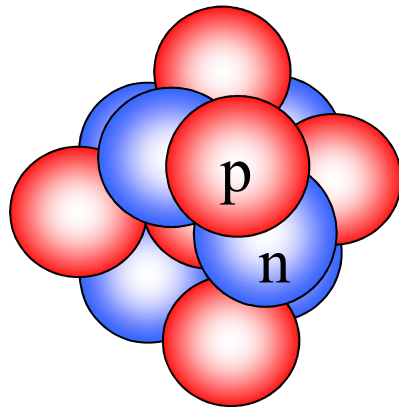


99 Nukleon: 43 Proton és 56 Neutron



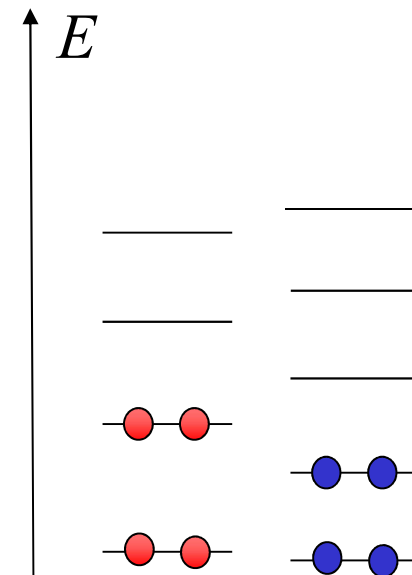
# Stabilität des Atomkernes

Coulomb-Kraft → Abstoßung zw. Protonen → destabilisiert  
Kernkraft → Ladungsunabhängig → stabilisiert  
kurze Reichweite



Diskrete Energieniveaus

Typische Übergangsenergie-  
verte: einige MeV

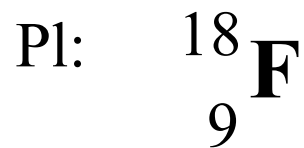


# Isotope

Atomkerne mit gleicher Ordnungszahl aber unterschiedlicher Massenzahl

=> gleiche Protonenzahl unterschiedliche Neutronenzahl

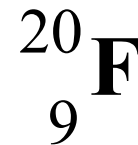
Varianten des gleichen Elementes => Chemische Eigenschaften sind identisch!



instabil  
(radioaktiv)



stabil

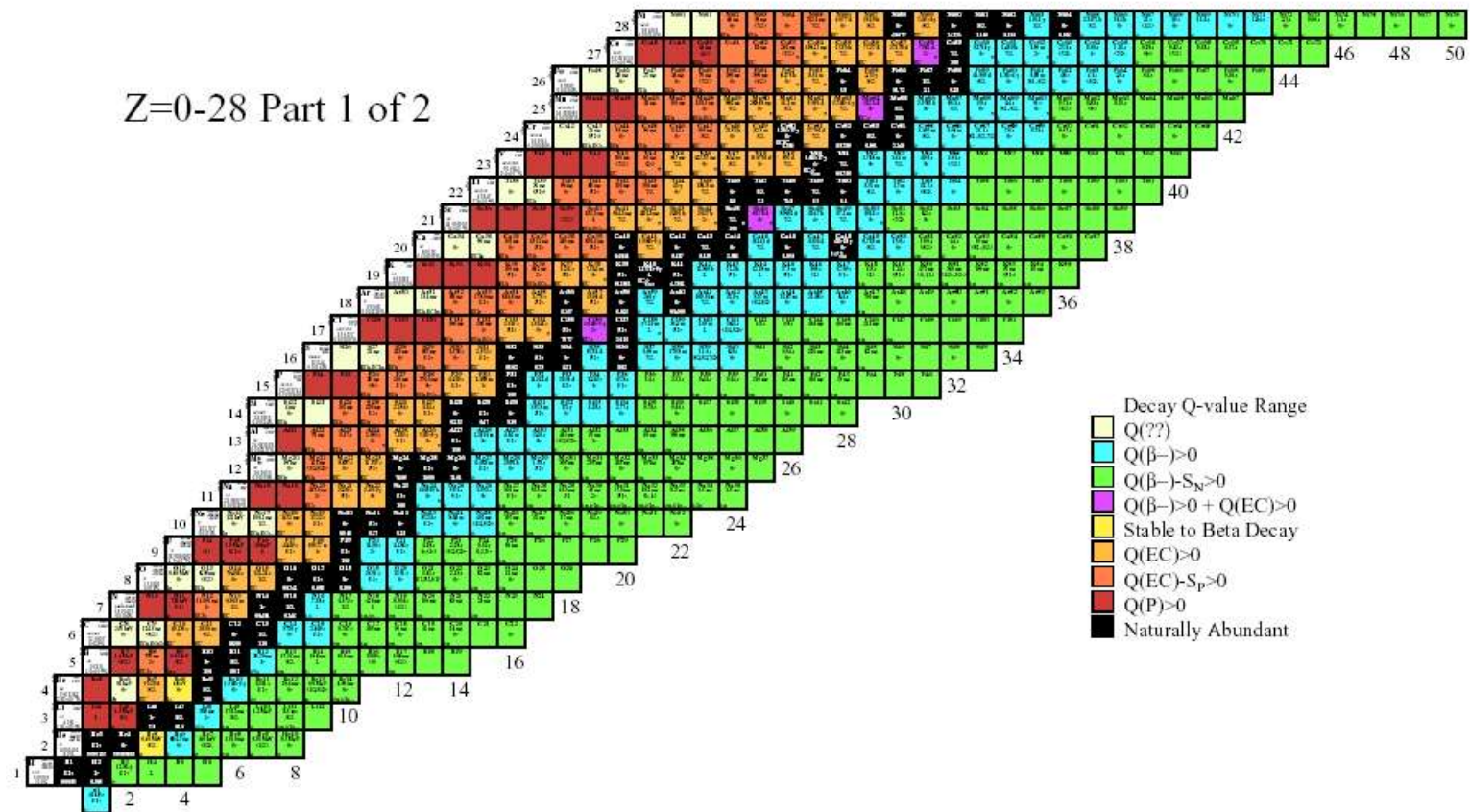


instabil  
(radioaktiv)

Isotop <-> radioaktives Isotop

# Isotoptabelle

*Table of Isotopes (1998)*





[illegible]



# Zerfälle und radioaktive Strahlungen

$\alpha$  - Zerfall                       $\alpha$  - Teilchen =  ${}^4_2\text{He}$  Atomkern

$\beta$  -Zerfall:  $\beta^-$                        $\beta^-$  Teilchen = Elektron  
                   $\beta^+$                        $\beta^+$  Teilchen = Positron

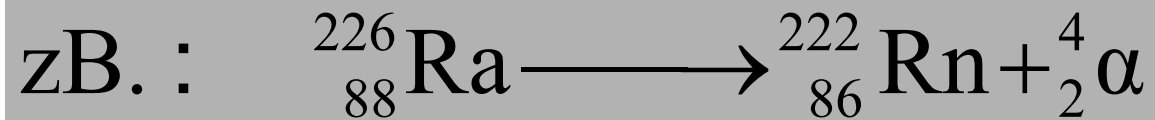
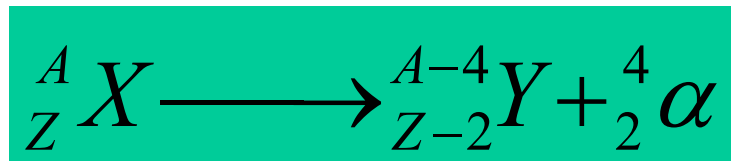
K-Einfang                                      charakteristische  
                                                          Röntgenstrahlung

Isomere Kernumwandlung                       $\gamma$ -Strahlung

# $\alpha$ - Zerfall

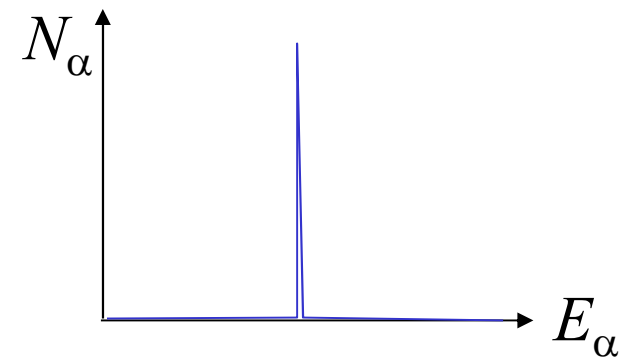
Hierbei treten  ${}^4\text{He}$  Atomkerne aus dem Atomkern aus. Damit erhöht sich die Stabilität des Kernes

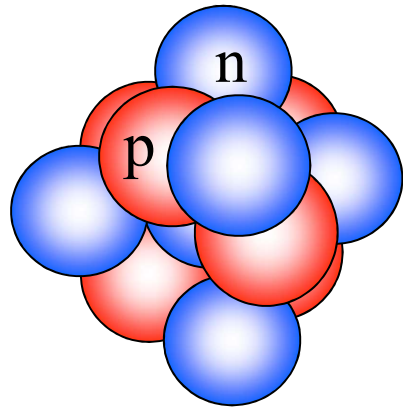
Massenzahl  $\downarrow 4$       Ordnungszahl  $\downarrow 2$



Energiespektrum: Linienspektrum

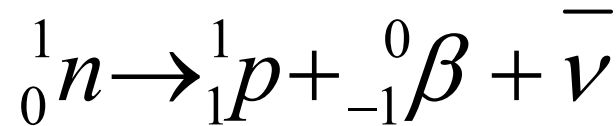
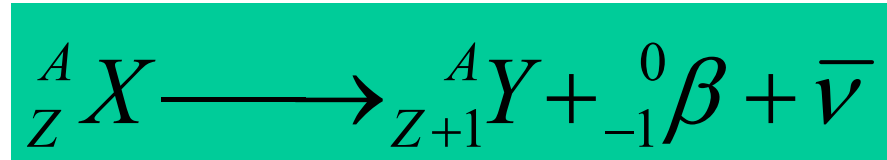
$E_\alpha \sim \text{MeV}$





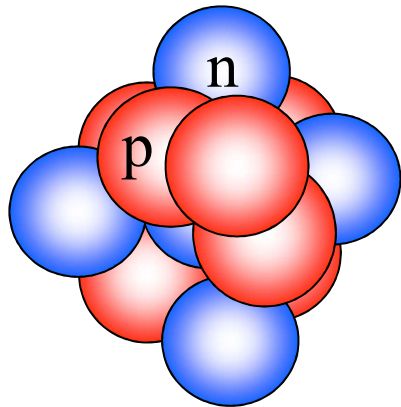
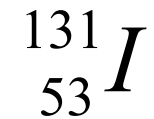
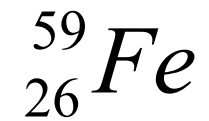
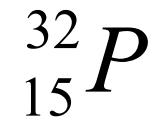
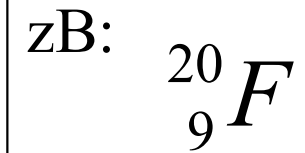
Neutronenüberschuss

# $\beta^-$ - Zerfall

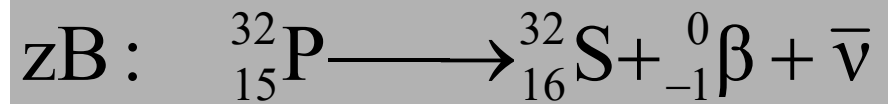


bleibt im Atomkern

treten aus

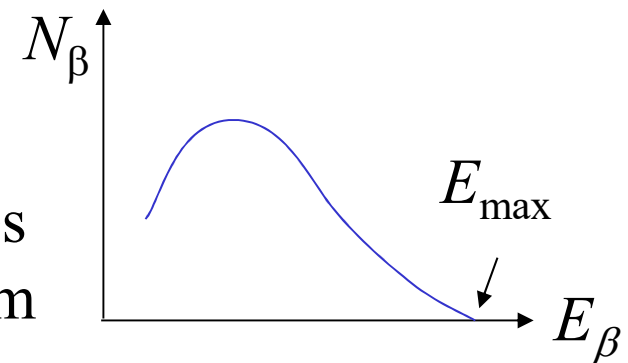


$$\beta^- = {}^0_{-1} \beta = e^-$$

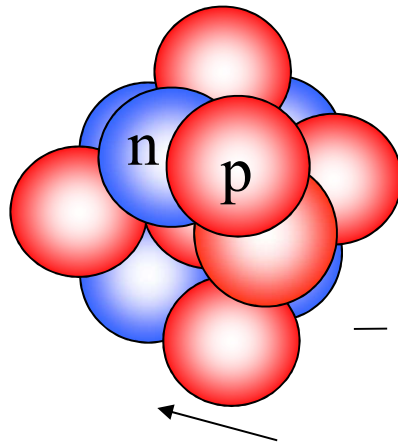


$\beta^-$ -Strahlung

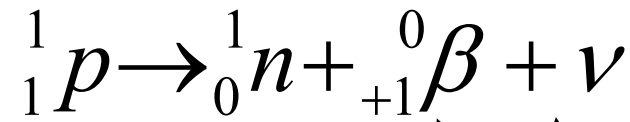
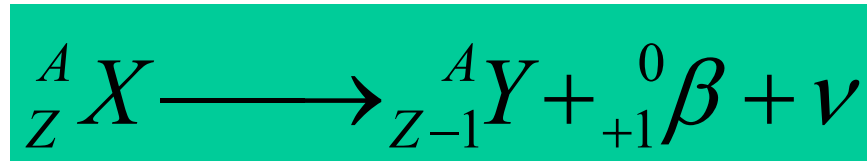
Kontinuierliches  
Energiespektrum



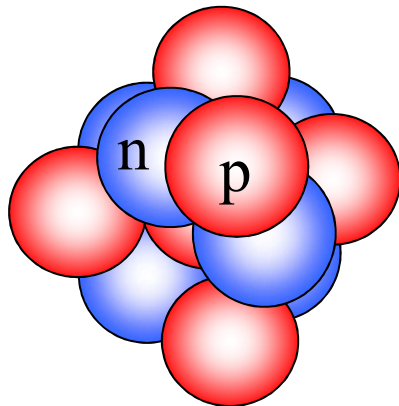
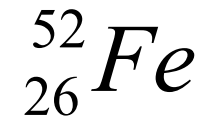
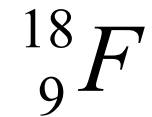
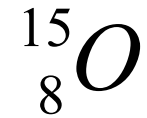
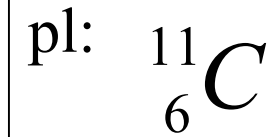
# $\beta^+$ - Zerfall



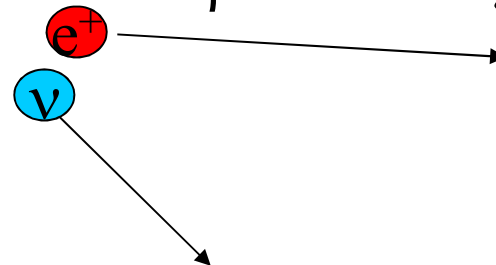
Protonenüberschuss



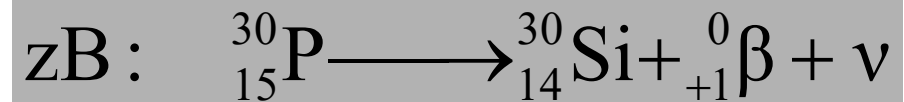
bleibt im Atomkern      treten aus



$\beta^+$  Strahlung



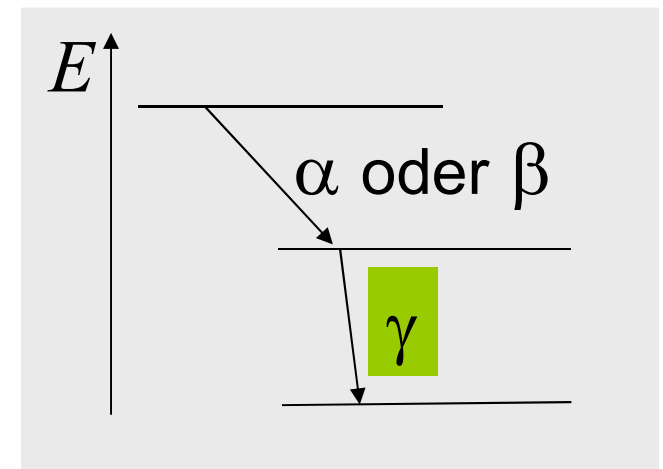
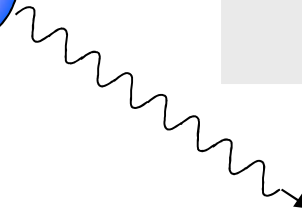
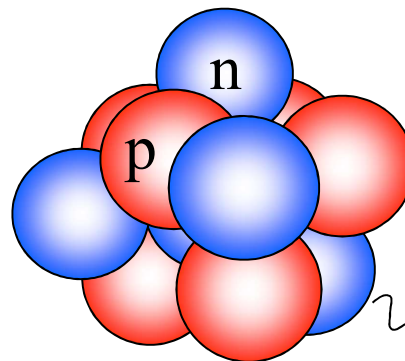
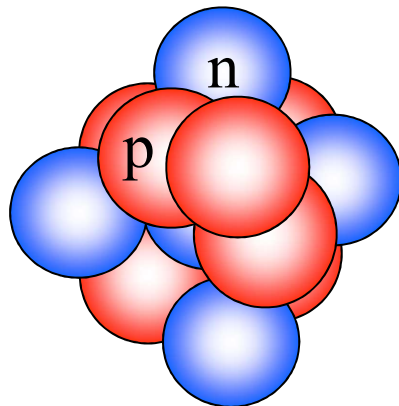
Kontinuierliches  
Energiespektrum



# Promte $\gamma$ -Strahlung

Nach dem Zerfall kann die Anordnung der Nukleonen  
**energetisch ungünstig** sein

Umordnen der Nukleonen: ein niedrigeres Energieniveau wird erreicht, (z.B. weniger coulombsche Abstoßung) => die überflüssige Energie wird in Form von  $\gamma$ -Strahlung ausgestrahlt.



Protonenzahl u. Neutronenzahl sind unverändert!

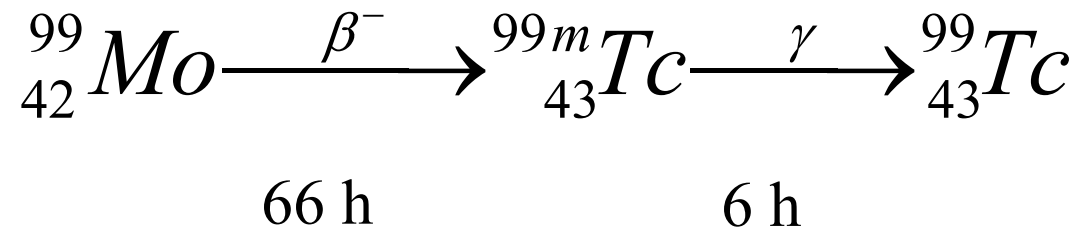
# Isomere Kernumwandlung

Wenn die Umordnen nicht einfach vor sich gehen kann, entsteht  $\gamma$ -Strahlung nicht sofort, sondern erst nach einer gut messbaren Zeit.

Die zwei Prozesse ( $\alpha$ -oder  $\beta$ -Zerfall,  $\gamma$ -Strahlungsemission) können separiert werden.

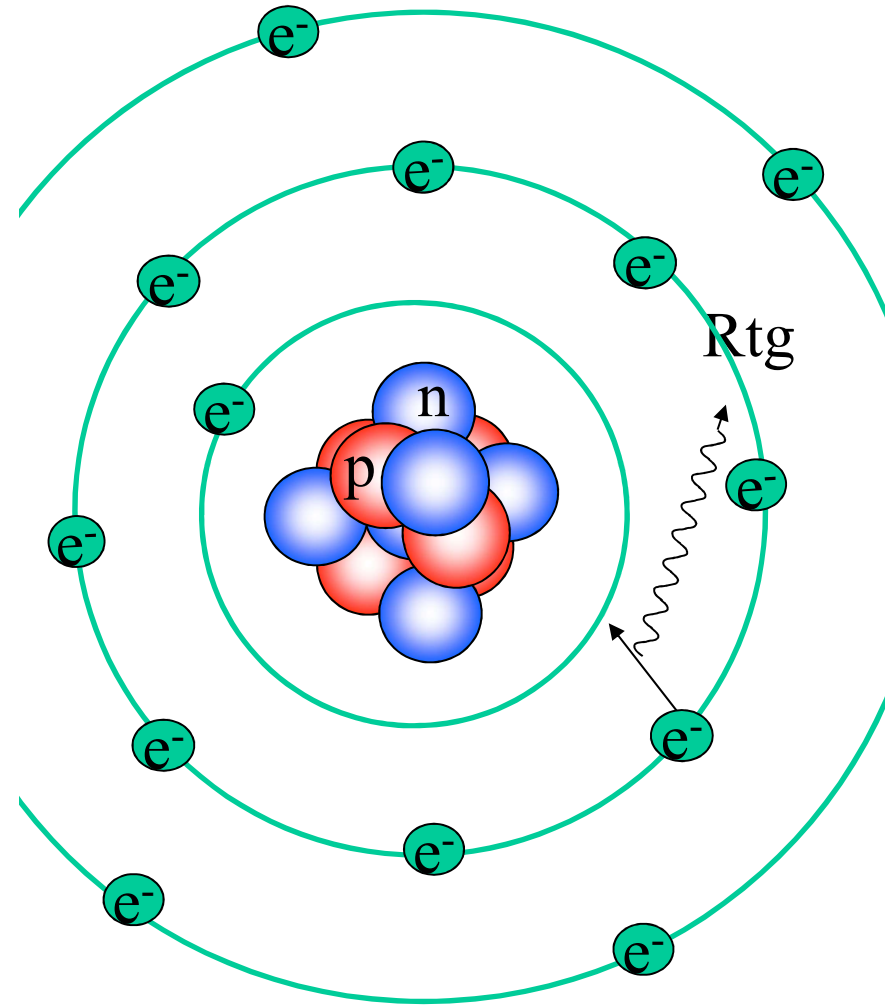
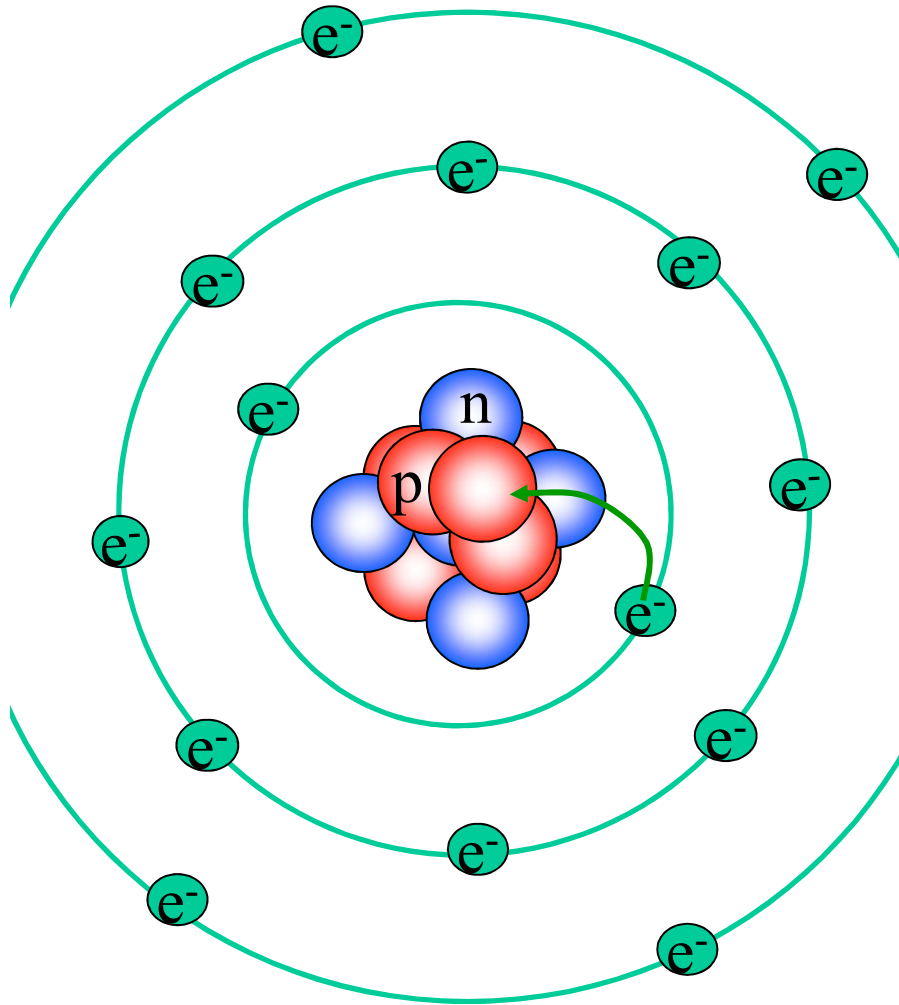
**Man kann ein reines  $\gamma$ -strahlen Isotop herstellen!**  
**=> Isotopendiagnostik**

zB:  $^{99m}\text{Tc}$

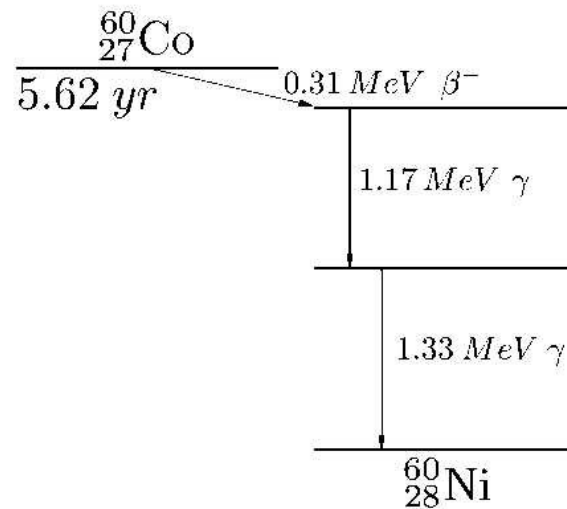
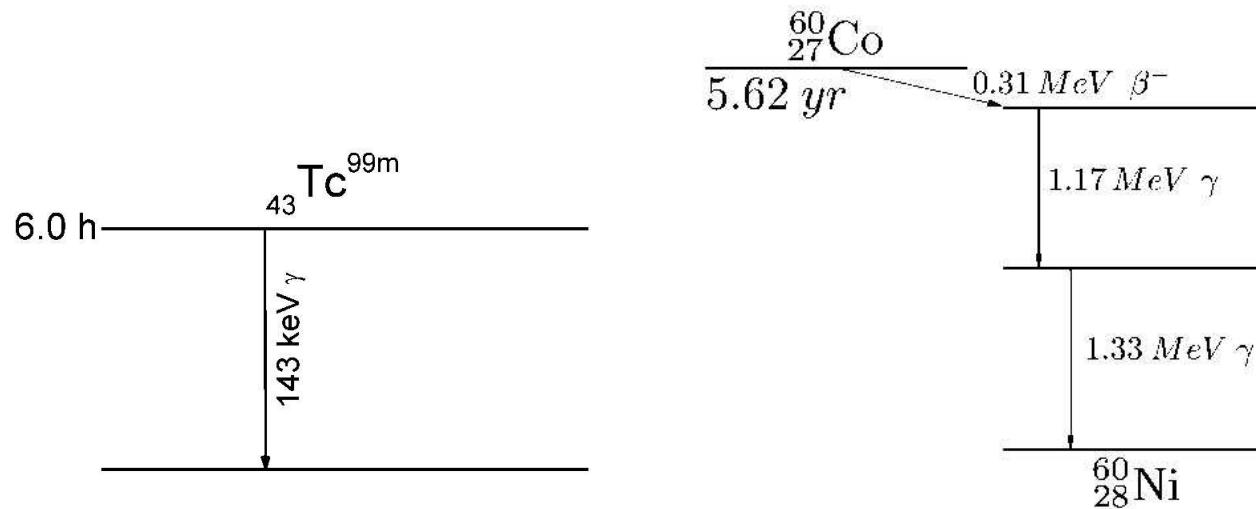
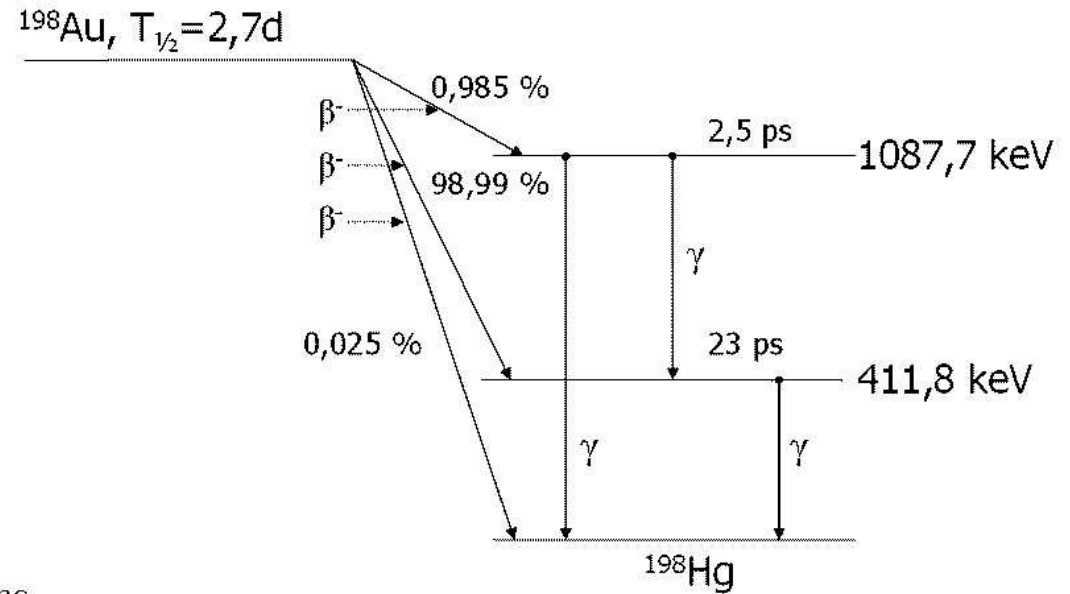
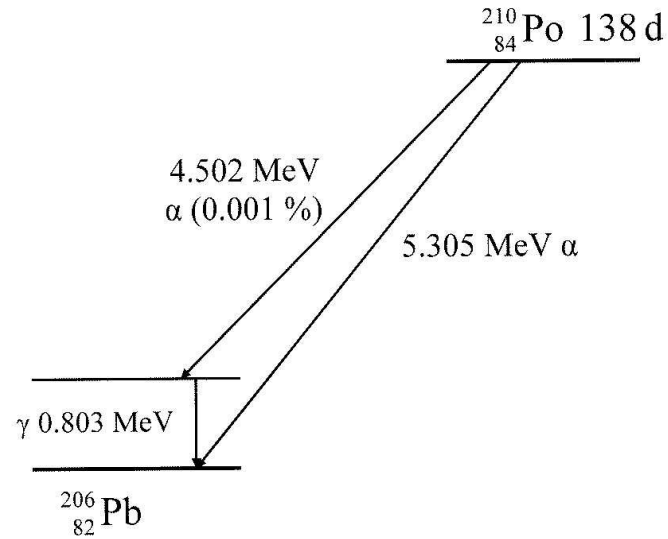




# K-Einfang



# Beispiele



# Aktivität

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| \quad \left( = \left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right| \right)$$

N = Anzahl der Zerfallsfähigen Atomkerne

t = Zeit

$\Delta N$  die Anzahl der während  $\Delta t$  Zeit zerfallenen Atomkerne

Einheit: Becquerel Bq

1 Bq = 1 Zerfall/sec

Bq, kBq, MBq, GBq, TBq, PBq

# Zerfallsgesetz

$\Delta N \sim N$        $N$  Anzahl der zerfallsfähigen Kerne

$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$        $\lambda$ : Zerfallskonstante  
Zerfallswahrscheinlichkeit[1/s]  
 $1/\lambda = \tau$  Zeit! durchschnittlicher Lebensdauer

Differentialgleichung

Lösung:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad \text{Exponentialfunktion!}$$

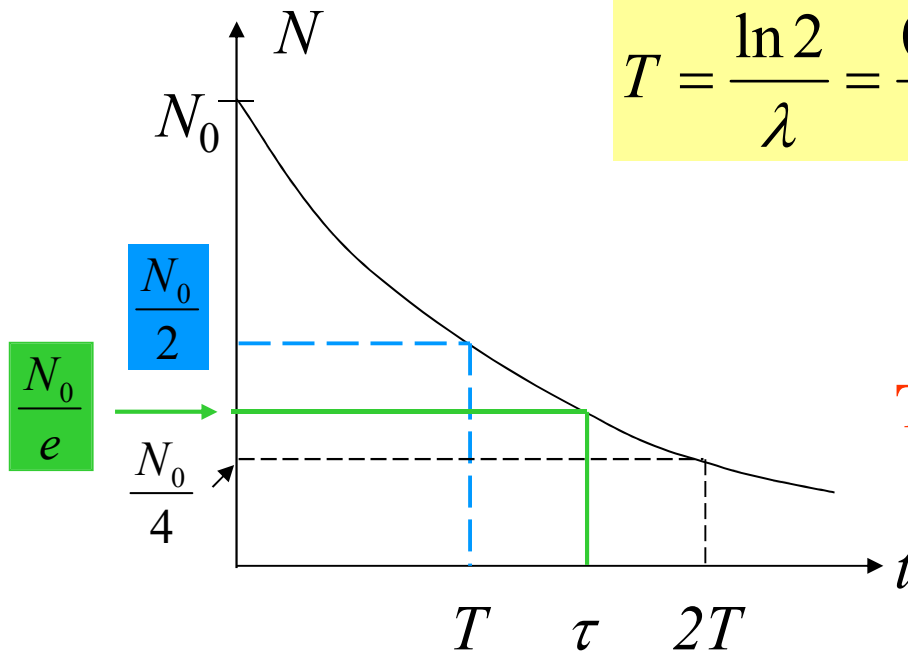
$N_0$  Anzahl der zerfallsfähigen Kerne am Anfang ( $t=0$ )

# Zerfallsgesetz

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 2^{-\frac{t}{T}}$$

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

$\lambda$  Zerfallskonstante  
 $T$  Halbwertszeit



**Theoretisch erreicht es nie 0 !**

# Beispiel

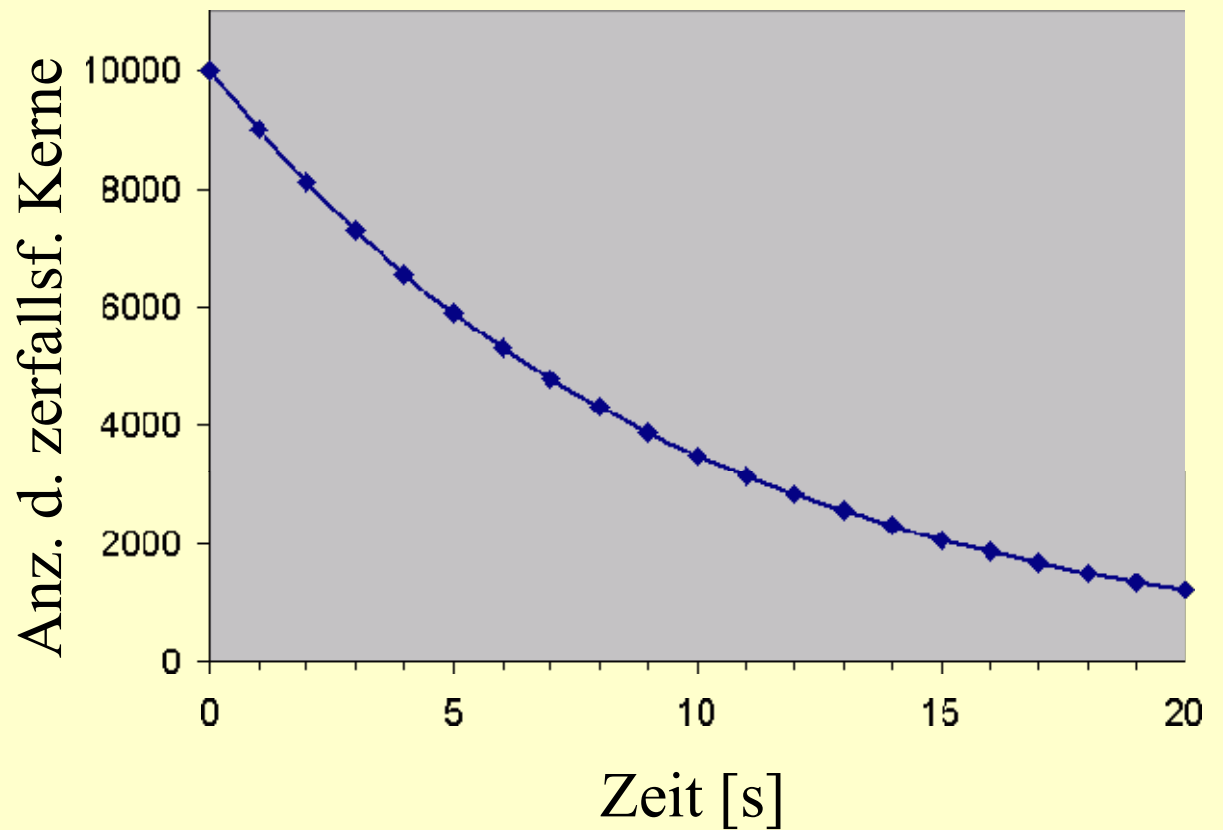
- Sei  $N_0=10000$      $\lambda=0,1 \text{ } ^1/\text{s}$
- nach 1 sec: 9000    (10000x0,1=1000 sind zerfallen)
- nach 2 sec: 8100    (9000x0,1=900 sind zerfallen)
- nach 3 sec: 7290    (8100x0,1=810 sind zerfallen)
- nach 4 sec: 6561    (7290x0,1=729 sind zerfallen)
- ....





# Beispiel

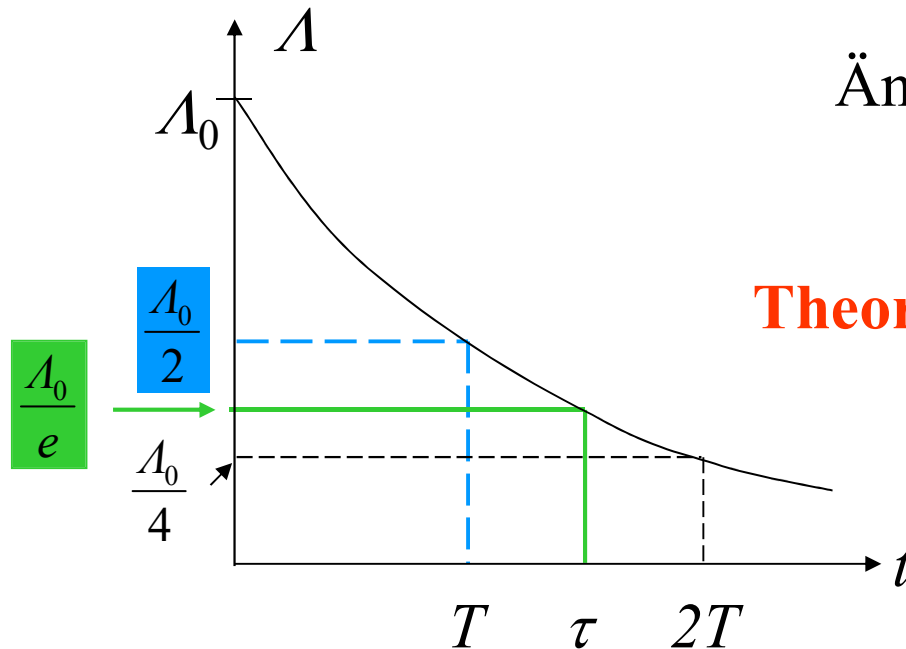
- Sei  $N_0=10000$      $\lambda=0,1 \text{ } ^1/\text{s}$
- 1 sec 9000
- 2 sec 8100
- 3 sec 7290
- 4 sec 6561
- ....



# Zeitliche Änderung der Aktivität

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 2^{-\frac{t}{T}}$$

Änderung wie bei N!



**Theoretisch erreicht es nie 0!**

ca.  $10 T \Rightarrow$  zerfällt auf  
1/1000 Teil!

# Einige Beispiele für Halbwertszeit

$^{232}\text{Th}$	$1,4 \cdot 10^{10} \text{ J}$
-------------------	-------------------------------

$^{238}\text{U}$	$4,5 \cdot 10^9 \text{ J}$
------------------	----------------------------

$^{40}\text{K}$	$1,3 \cdot 10^9 \text{ J}$
-----------------	----------------------------

$^{14}\text{C}$	$5736 \text{ J}$
-----------------	------------------

$^{137}\text{Cs}$	$30 \text{ J}$
-------------------	----------------

$^3\text{H}$	$12,3 \text{ J}$
--------------	------------------

$^{60}\text{Co}$	$5,3 \text{ J}$
------------------	-----------------

$^{59}\text{Fe}$	$1,5 \text{ M}$
------------------	-----------------

$^{56}\text{Cr}$	$1 \text{ M (28 T)}$
------------------	----------------------

$^{131}\text{I}$	$8 \text{ T}$
------------------	---------------

$^{99\text{m}}\text{Tc}$	$6 \text{ h}$
--------------------------	---------------

$^{18}\text{F}$	$110 \text{ min}$
-----------------	-------------------

$^{11}\text{C}$	$20 \text{ min}$
-----------------	------------------

$^{15}\text{O}$	$2 \text{ min}$
-----------------	-----------------

$^{222}\text{Th}$	$2,8 \text{ ms}$
-------------------	------------------

Nicht auswendig lernen!

# Teilchenenergie

Gemessen in Elektronenvolt (eV).

$$\text{eV} = \text{Ladung eines Elektrons} \times 1 \text{ Volt} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Typische Teilchenenergiewerte (die bei Kernumwandlungen freigesetzte Energie) bewegen sich in **MeV** Größenordnungen.

$$\alpha \text{ und } \beta: E = E_{\text{kin}}$$

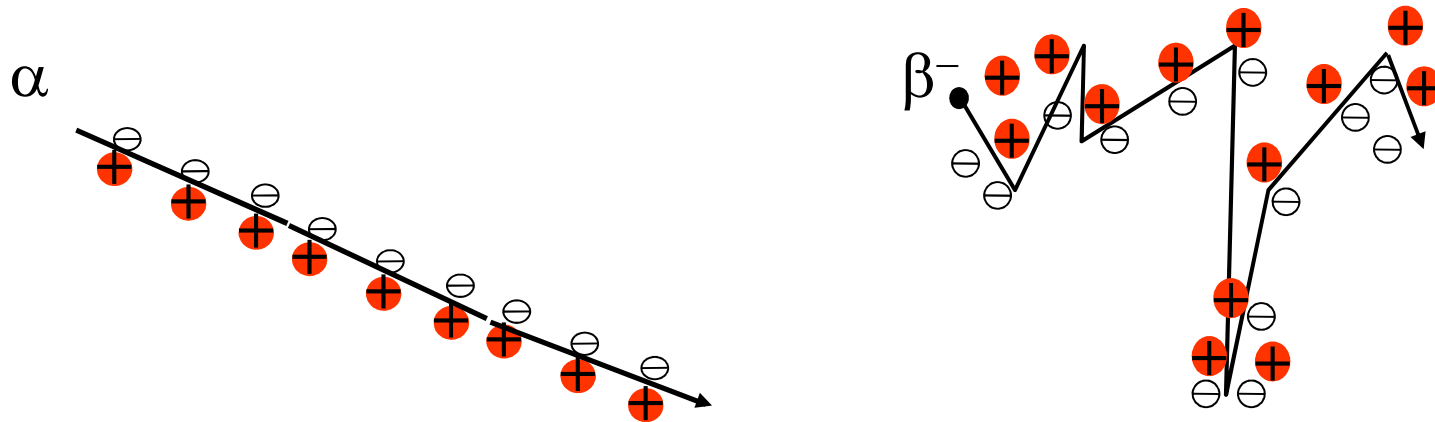
je höher ist die Teilchenenergie desto größer Reichweite

# Absorption von radioaktiven Strahlungen

$\alpha$	}	haben elektrische Ladung
$\beta^+$		
$\beta^-$		
$\gamma$	}	ungeladene Teilchen (elektromagnetische Strahlung)
Rtg		
$\nu$		

# Schwächung der geladenen Teilchen

Ionisieren: ihre Energie wird auf einem bestimmten Weg verbraucht  
**Reichweite**



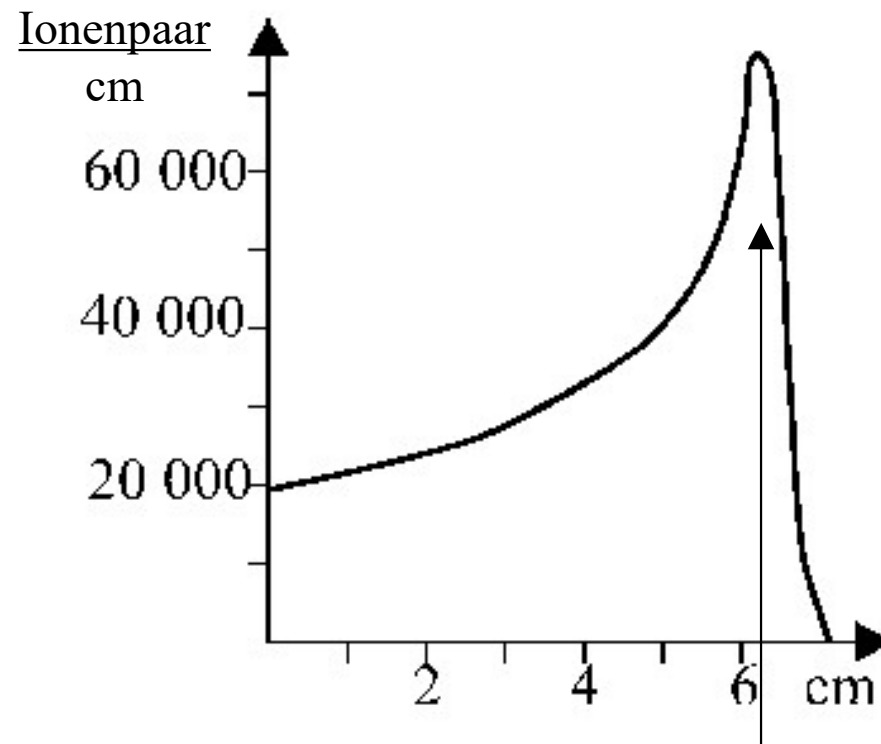


## Lineare Energieübertragung (**LET**, Linear Energy Transfer)

$$\text{LET} = (\text{lineare Ionendichte}) \cdot (\text{zur Ionisation notwendige Energie})$$

Lineare Ionendichte für  
ein  $\alpha$ -Teilchen in Luft

Bragg Spitze



# Reichweite

$\alpha$ -Teilchen

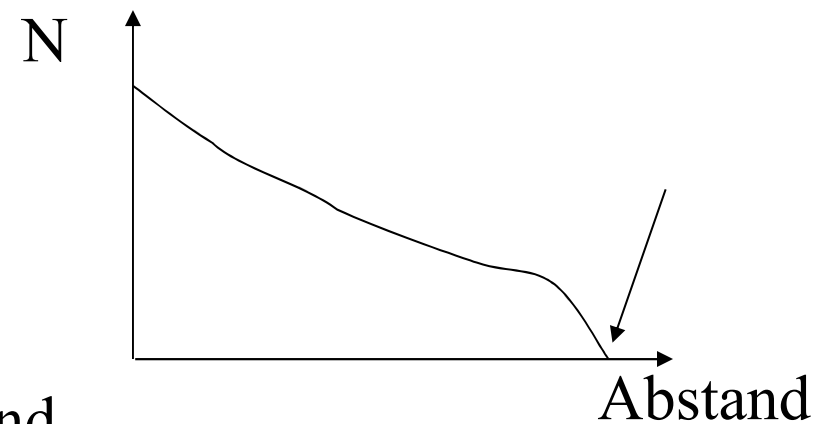
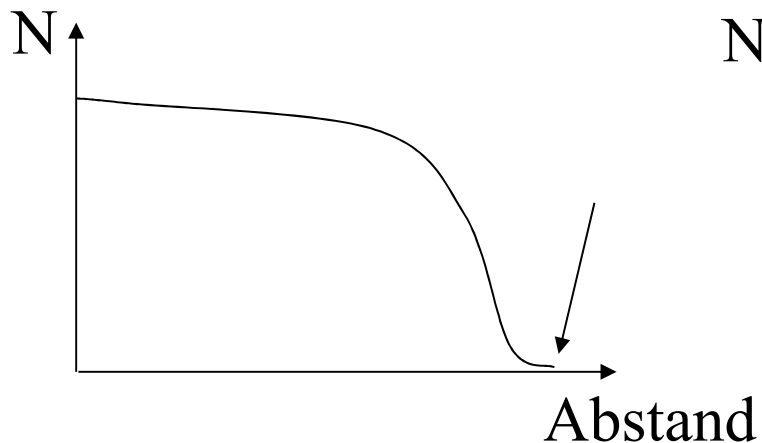
$\beta^-$ -Teilchen

in Luft **einige cm**

in Luft **m**

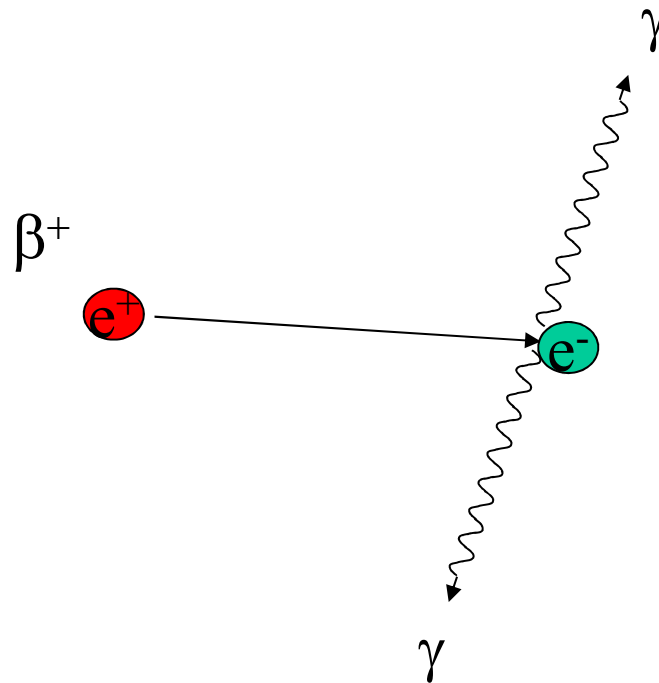
in Gewebe **0,01-0,1 mm**

in Gewebe **cm**



# $\beta^+$ -Strahlung

Annihilation



Medizinische Anwendung: Positron Emissionstomographie (PET)

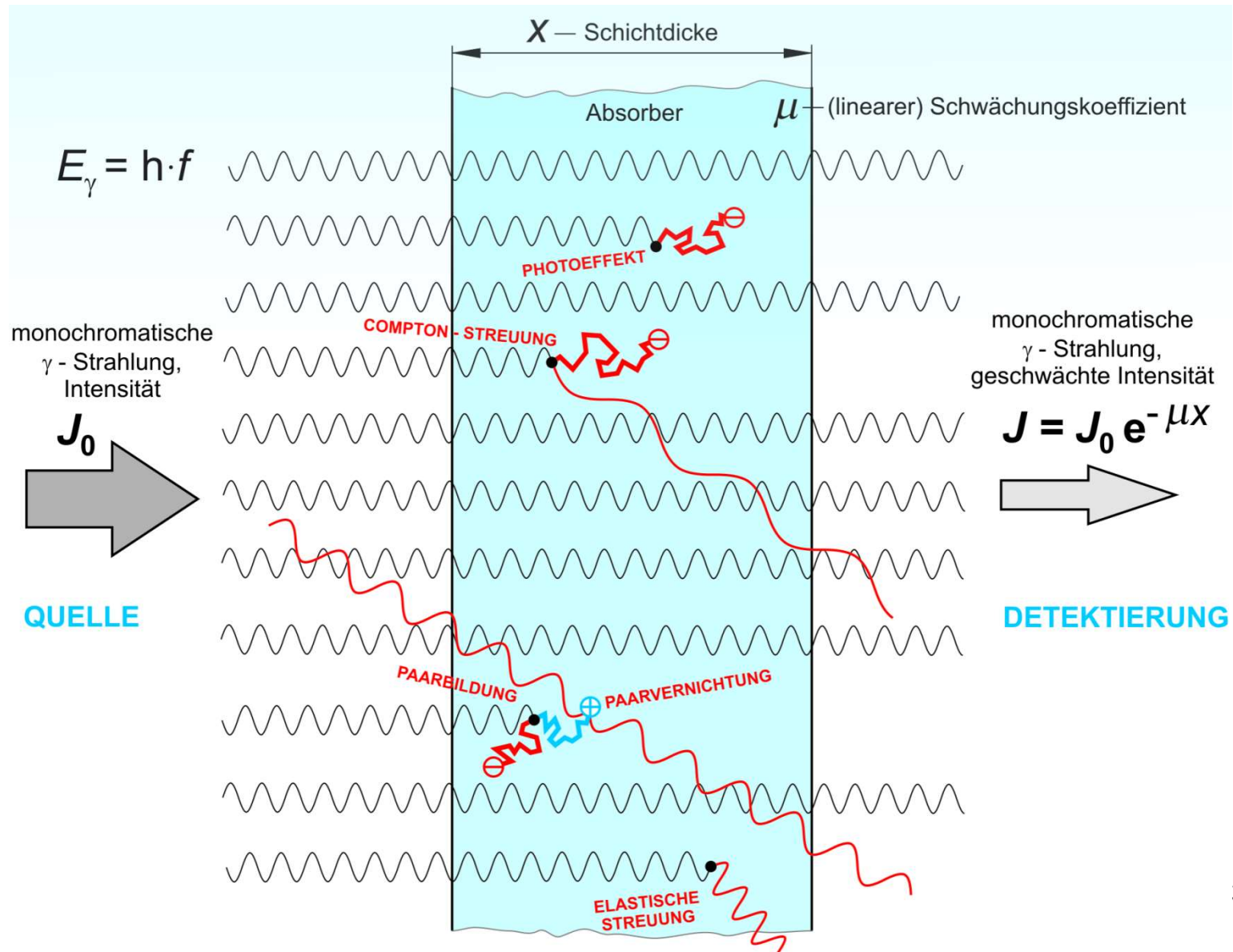
# Einsteinsche Formel:

$$E=mc^2$$

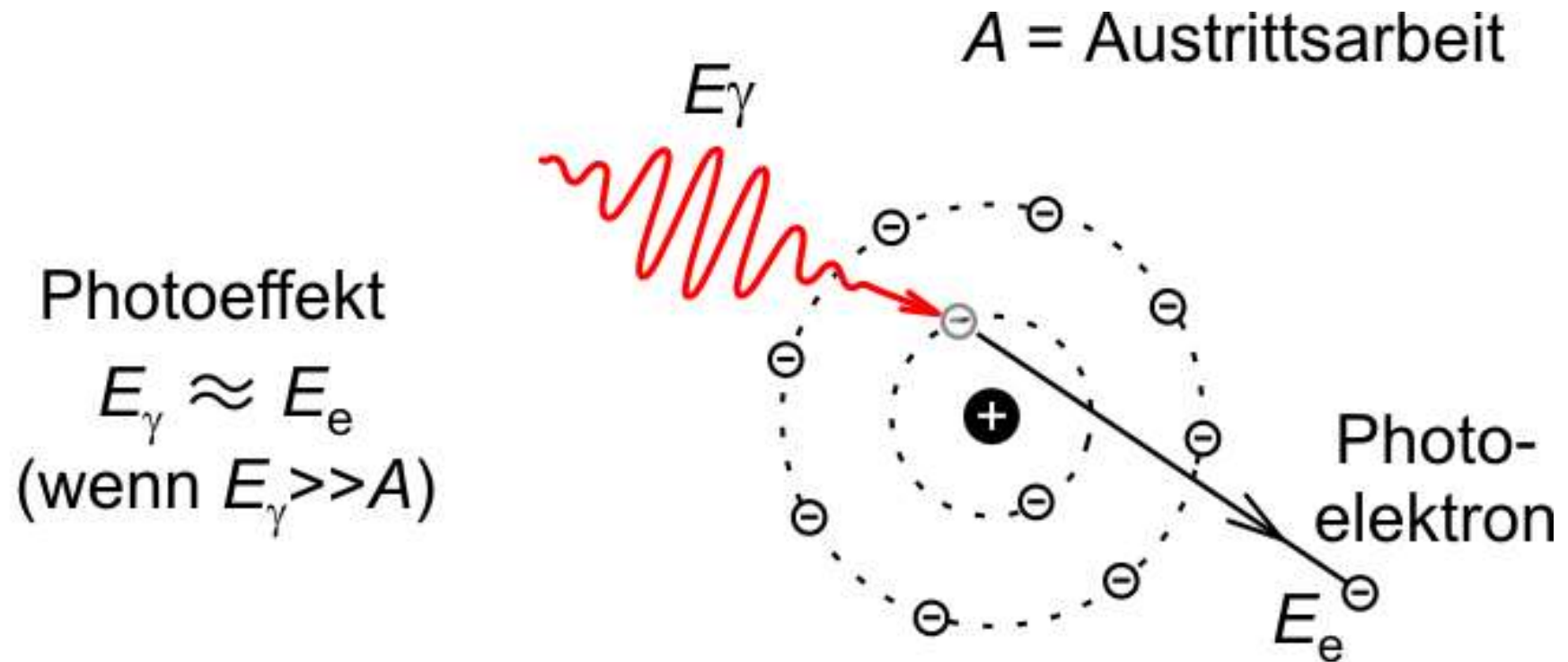
Energie - Masse Equivalenz !

~~Umwandlung~~

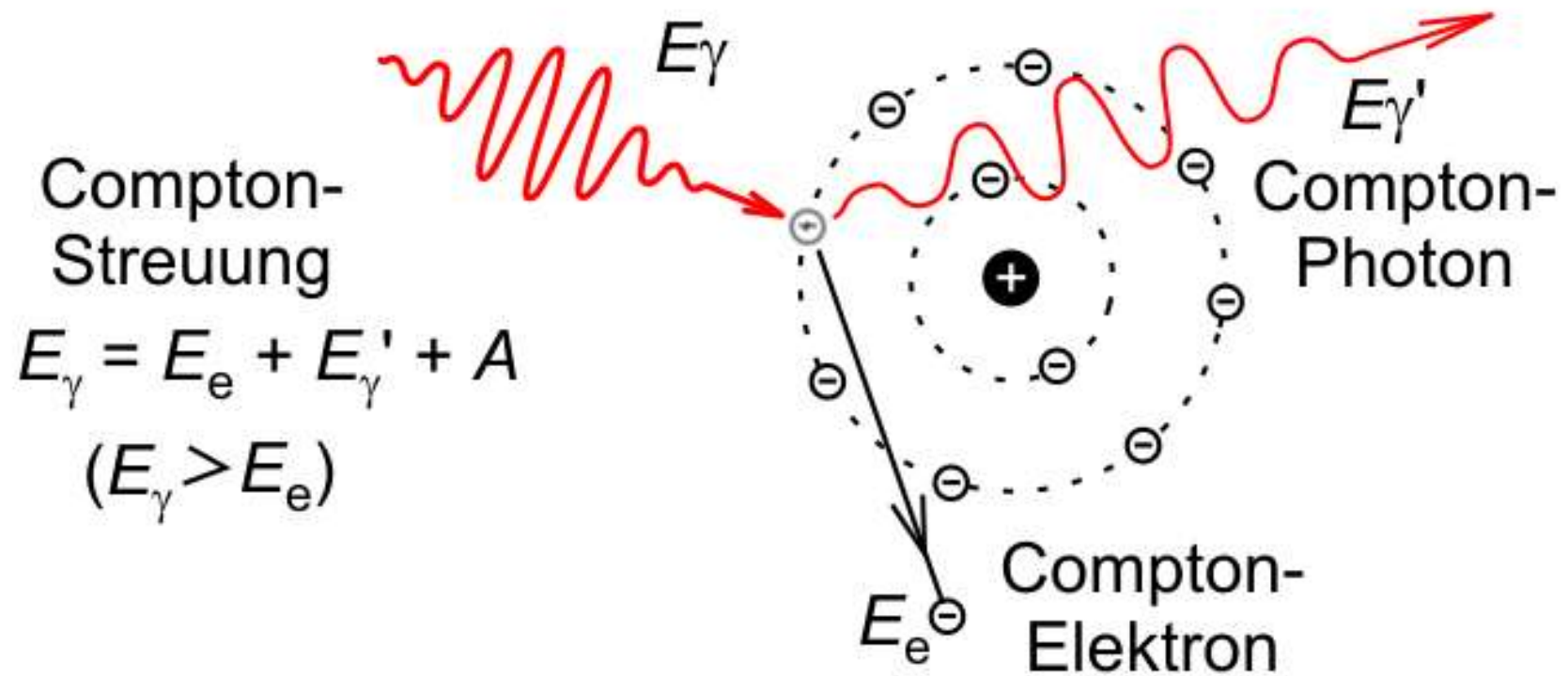
# Wechselwirkung der Röntgen- und Gamma-Strahlung mit der Materie



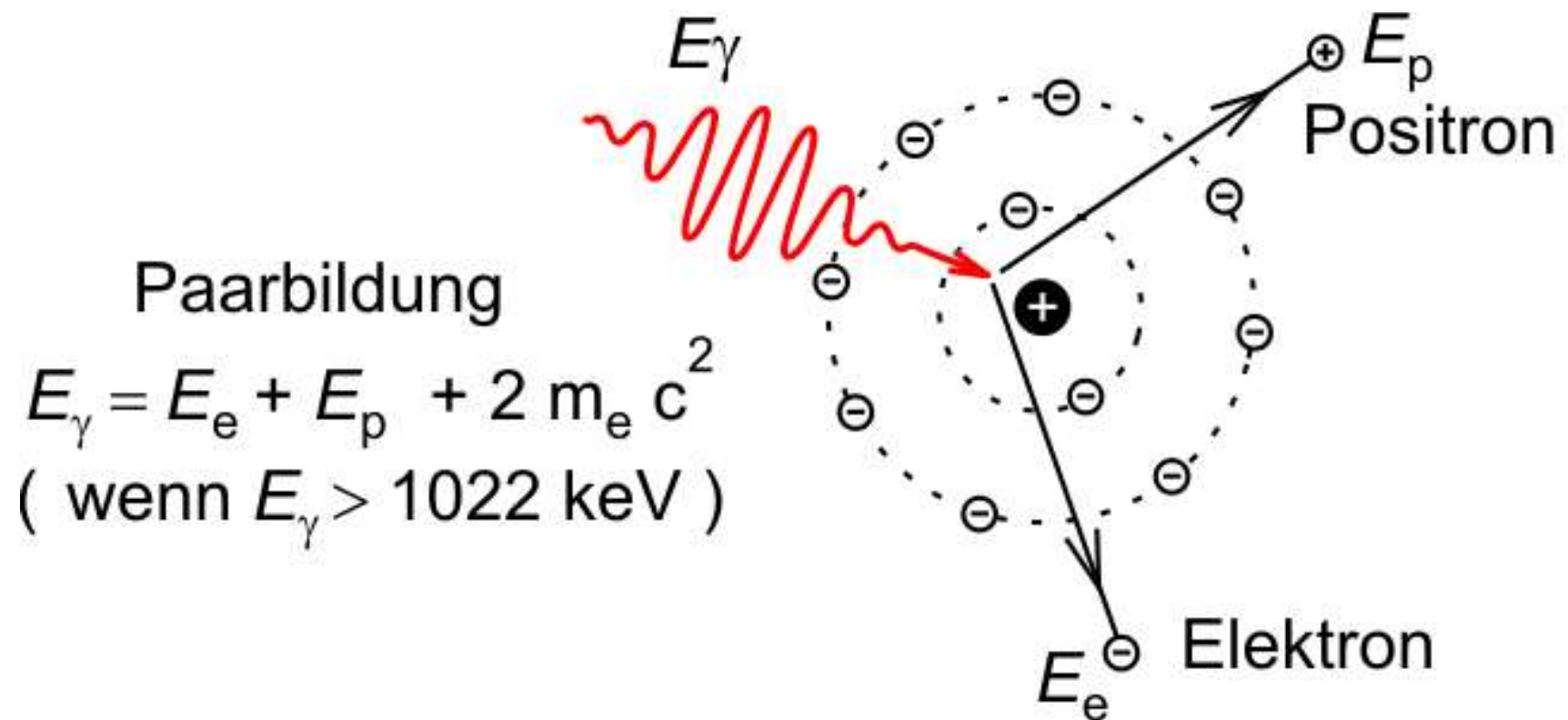
# Photoelektrischer Effekt



# Compton Effekt



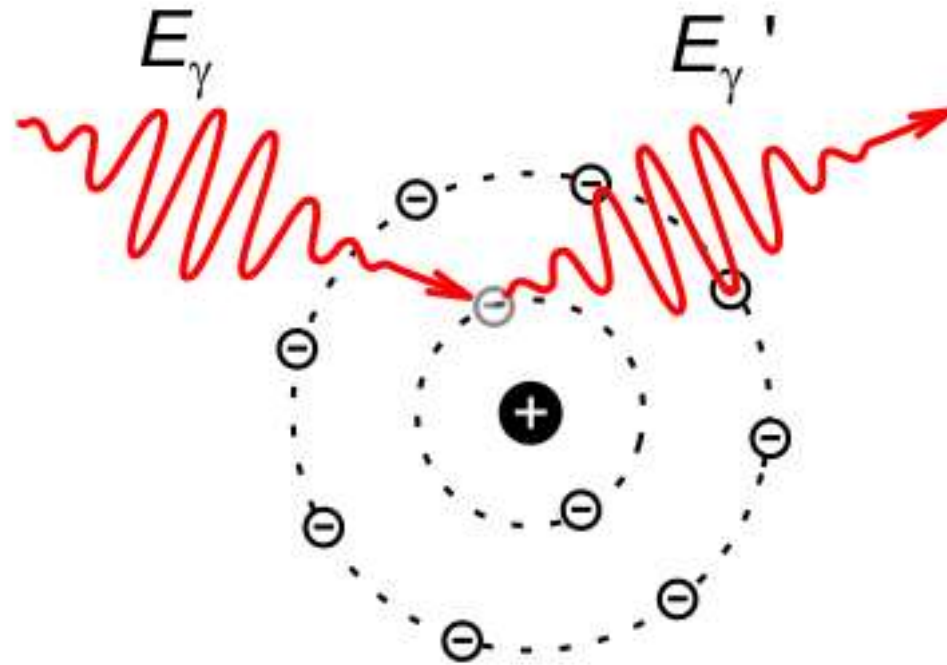
# Paarbildung



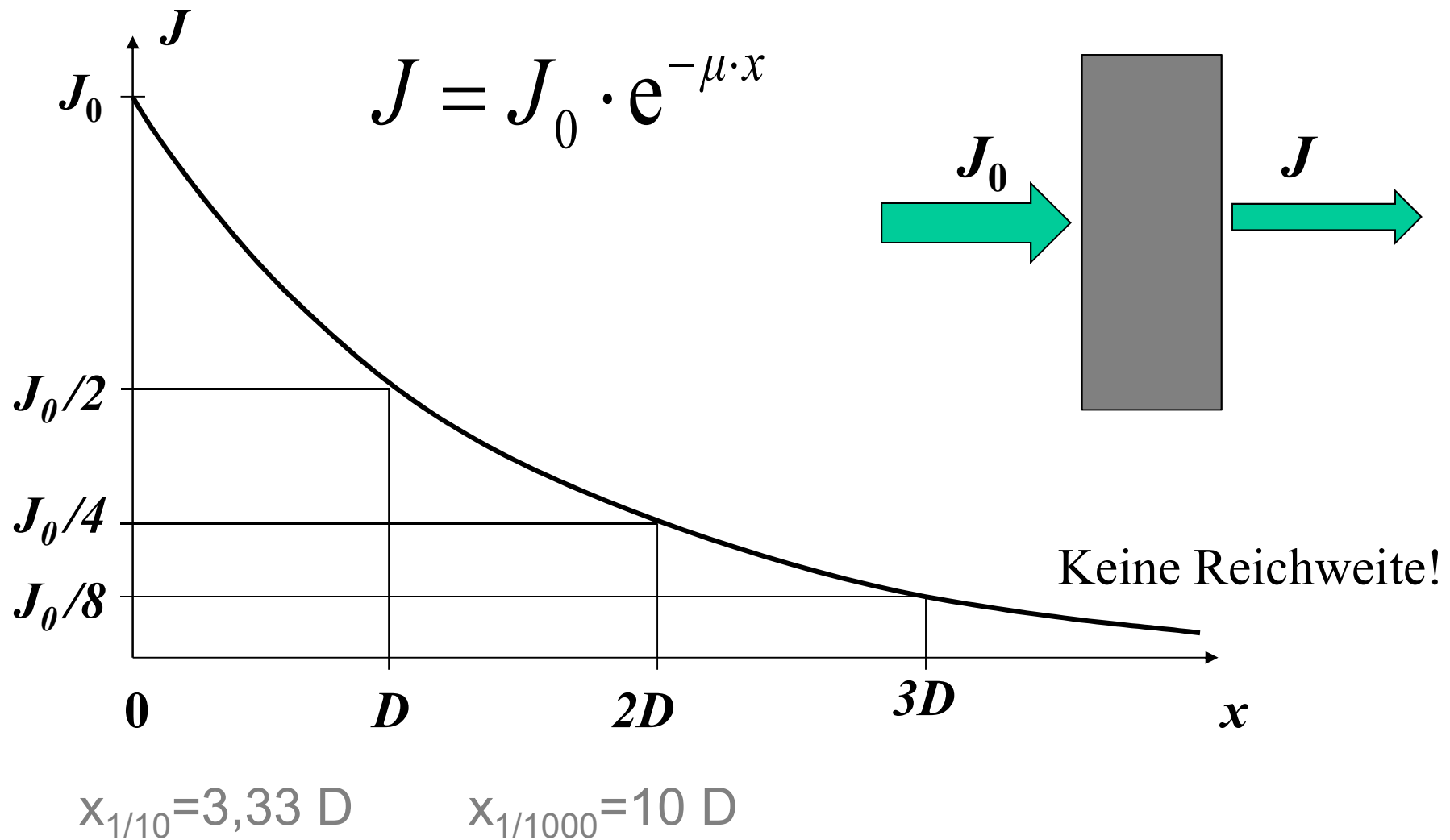


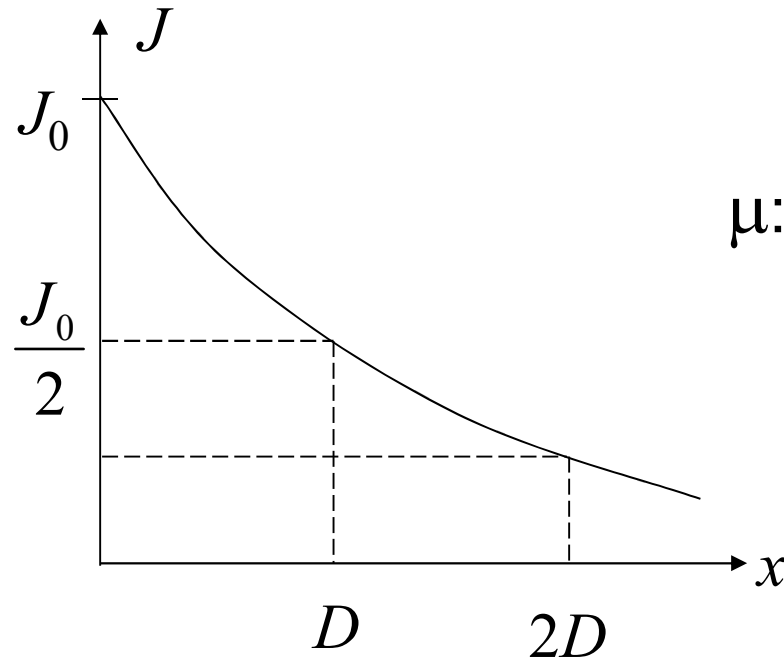
# Elastische Streuung

$$E_{\gamma} = E_{\gamma}'$$



# Schwächung der $\gamma$ - und Röntgenstrahlung





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

$\mu$ : (linearer) Schwächungskoeffizient

Maßeinheit: 1/m, 1/cm

$$\delta = \frac{1}{\mu} \quad \text{„Eindringtiefe“}$$

Die Intensität sinkt auf  
den e-ten Teil des  
Anfangswertes ( $\approx 37\%$ )

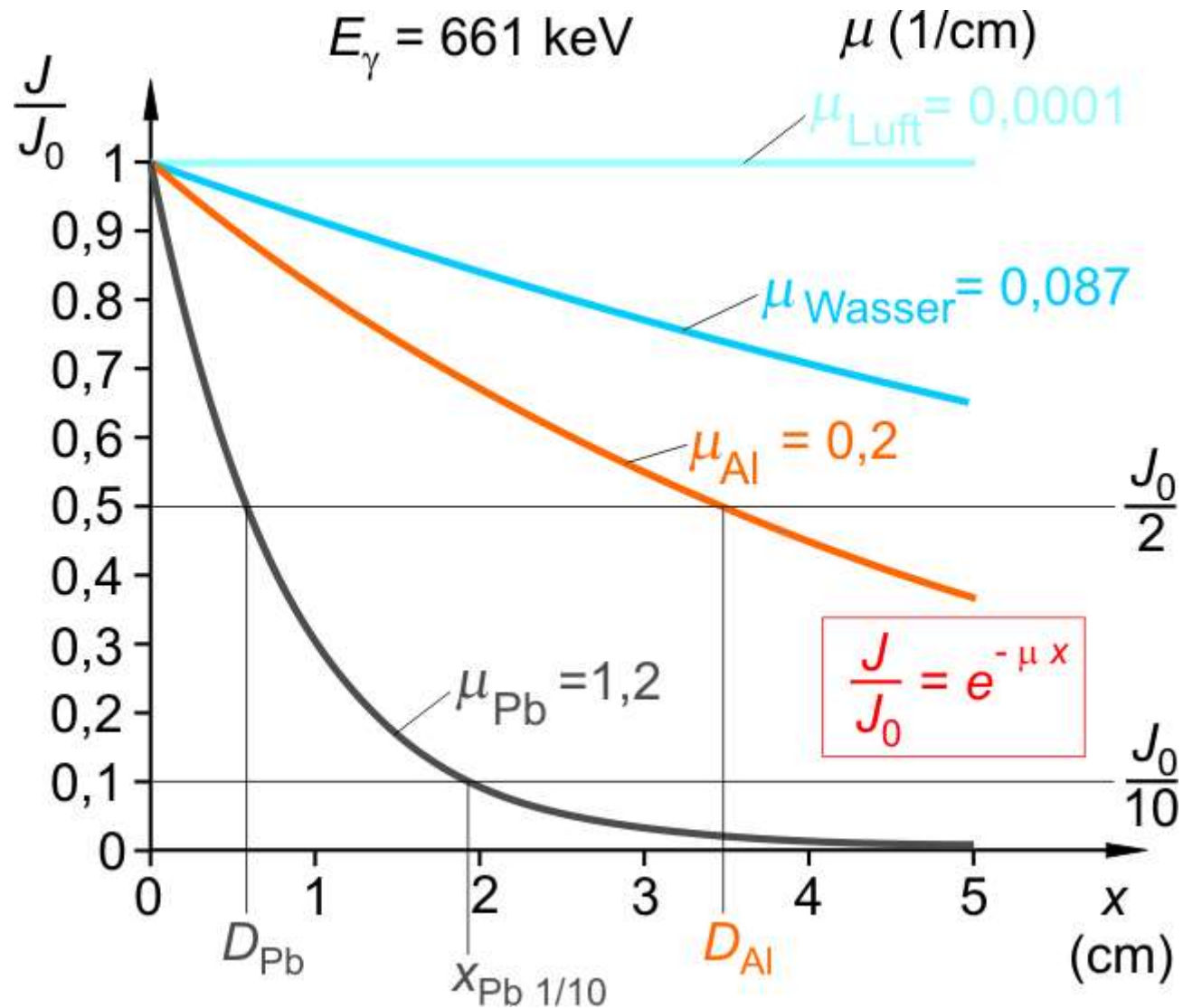
$$\mu(\text{Stoffart, Dichte, Energie der Strahlung}) = \mu(\text{Stoffart}, \rho, E_{\text{foton}}) \sim \rho$$

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$$

Massenschwächungskoeffizient

Maßeinheit:  $\text{cm}^2/\text{g}$

# Schwächung der $\gamma$ - und Röntgenstrahlung



Massenschwächungs-  
koeffizient:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$$

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

$$\tau_m = c \lambda^3 Z^3$$

