

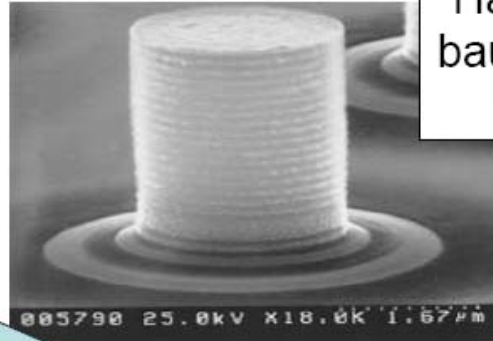
VI. Quantenphysik

VI.2 Kernphysik und medizinische Anwendungen

Mikroskopische Welt



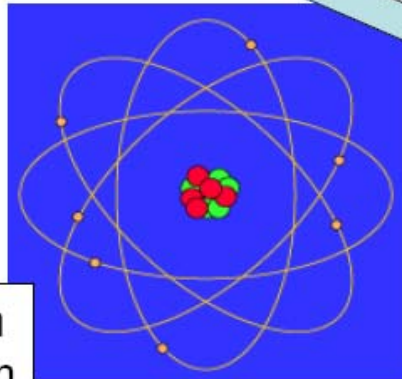
Bergkristall
 10^{-1} m



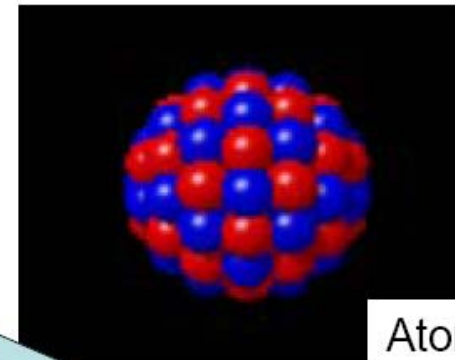
Halbleiter-
bauelement
 10^{-6} m



Schnee-
flocke
 10^{-3} m



Atom
 10^{-9} m



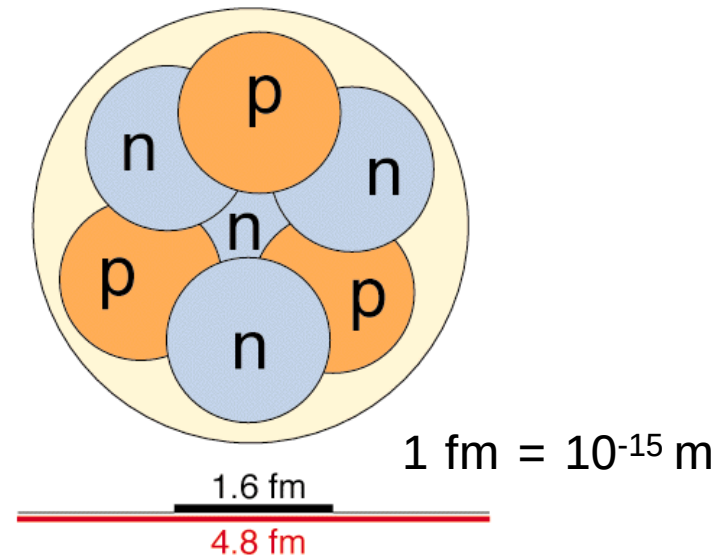
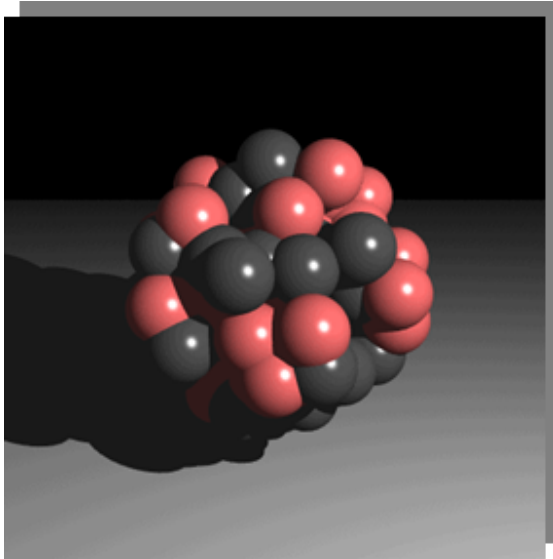
Atomkern
 10^{-15} m



Elementar-
teilchen
 10^{-18} m

Der Atomkern

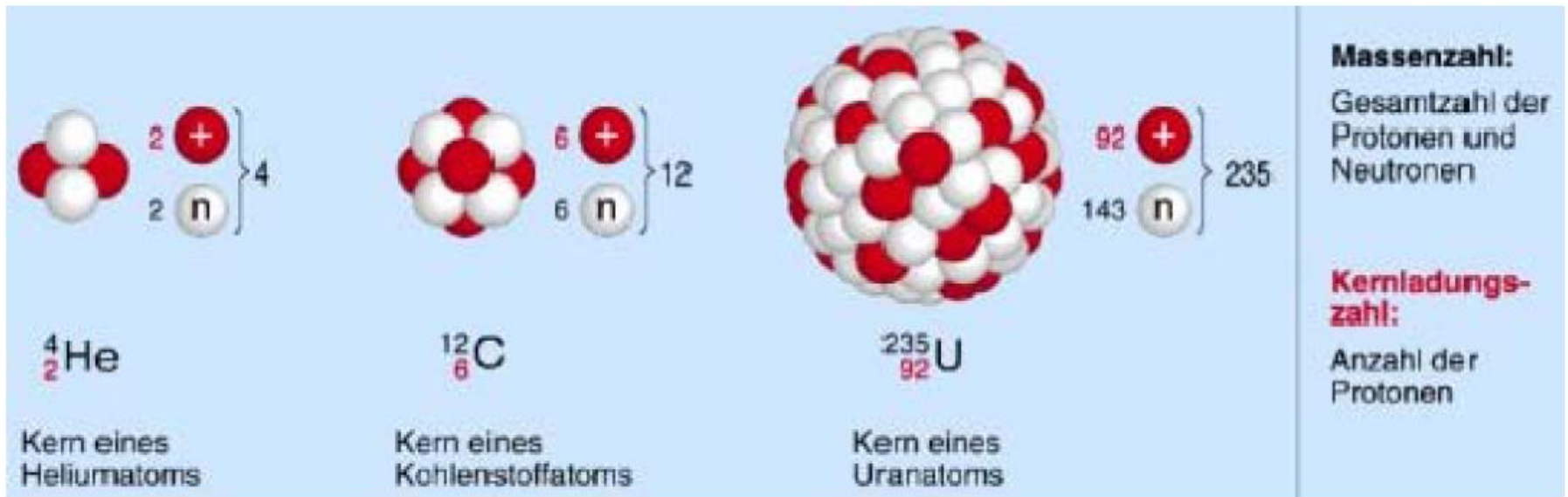
- der Atomkern ist aufgebaut aus Z Protonen (einfach positiv geladen) und N Neutronen (elektrisch neutral)
- die Gesamtzahl der Nukleonen ist $A = N + Z$
- Größe des Atomkerns: Radius $\approx$ einige fm = einige 10^{-15}m



- der Atomkern enthält fast die gesamte Masse des Atoms, obwohl er selbst ca. 10 000 mal kleiner ist als das Atom selbst.
- Wenn Sie sich auf die Waage stellen, sehen Sie die Masse aller Atomkerne in Ihrem Körper;
die Elektronenmassen sind fast vernachlässigbar: $\frac{m_e}{m_p} \approx \frac{1}{2000}$

Bezeichnung von Atomkernen

A_ZX : z.B. ${}^4_2\text{He}$, ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{238}_{92}\text{U}$



Isotope:

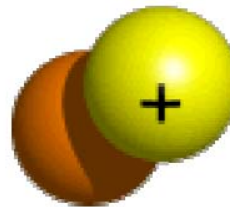
Kerne mit gleicher Protonenzahl aber anderer Neutronenzahl

Protium H
„normaler Wasserstoff“



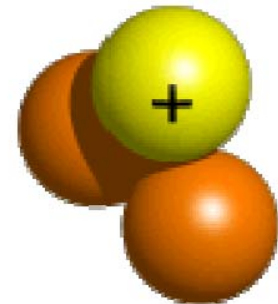
1 Proton

Deuterium D
„schwerer Wasserstoff“



1 Proton
1 Neutron

Tritium T
„überschwerer Wasserstoff“



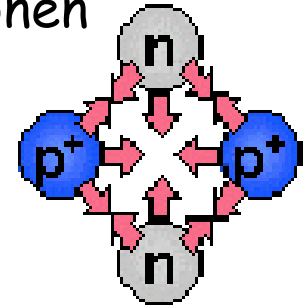
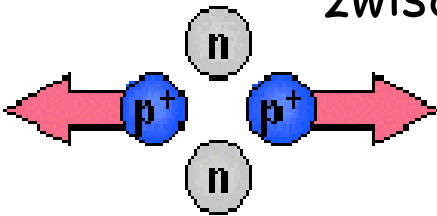
1 Proton
2 Neutronen

Stabilität der Atomkerne

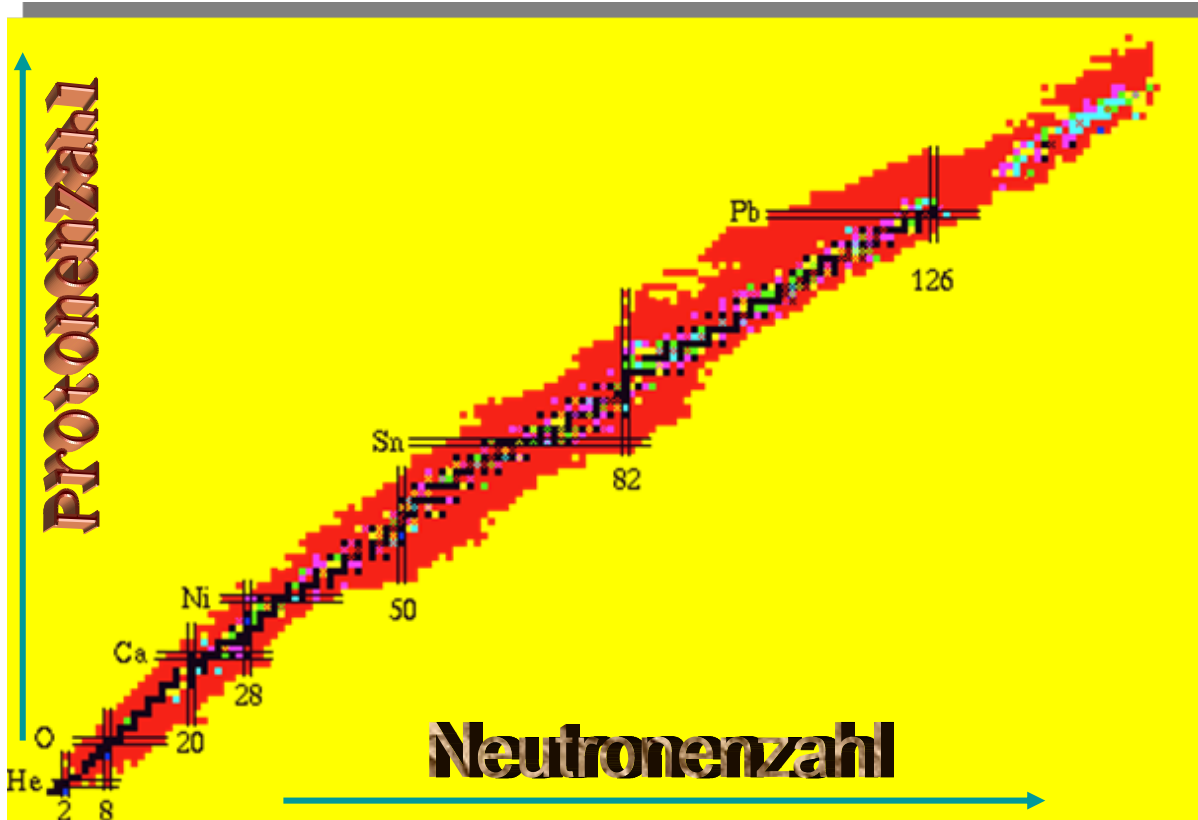
- Stabilität der Atomkerne bestimmt durch Wechselspiel zwischen:

abstoßender Coulombkraft $\sim Z^2$
zwischen den Protonen
(langreichweitig)

anziehender Kernkraft $\sim A$
zwischen allen Nukleonen
(kurzreichweitig)



Nuklidkarte

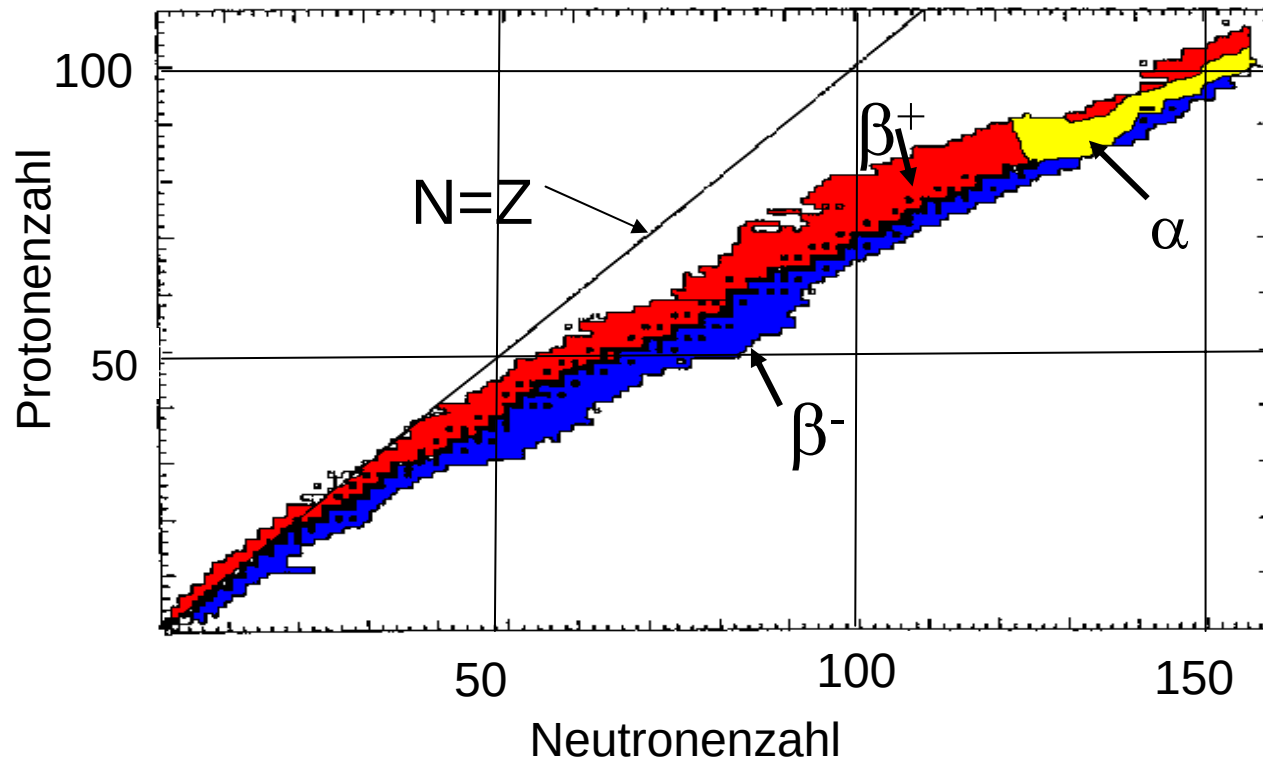


Für **leichte**
Kerne: $N \approx Z$

Für **schwere**
Kerne: $N > Z$,
um der mit Z^2
wachsenden
Coulomb-
abstoßung
entgegen zu
wirken

Radioaktivität

- Atomkerne sind **instabil (radioaktiv)**, wenn sie
 - zu schwer sind (abstoßende Coulombkraft dominiert): **α -Zerfall, Spaltung**
 - das Verhältnis von Protonenzahl/Neutronenzahl ungünstig ist
 - neutronenreiche Kerne zerfallen über **β^- (Elektronen)-Emission**
 - protonenreiche Kerne zerfallen über **β^+ (Positronen)-Emission**

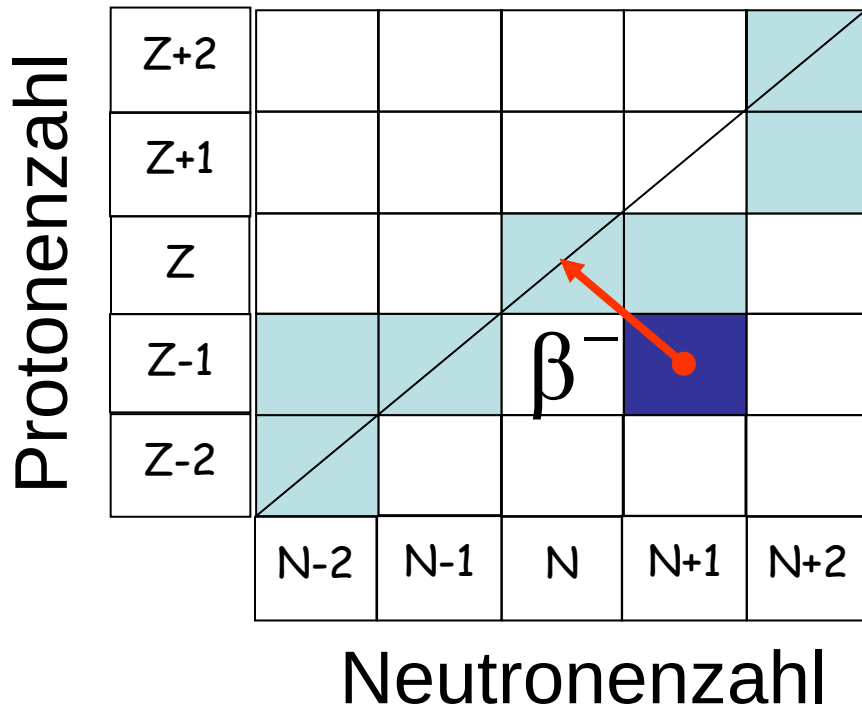


- die entstehenden Tochterkerne sind häufig angeregt und emittieren dann **γ -Strahlung** (hochenergetische Photonen)

β^+ und β^- Zerfall

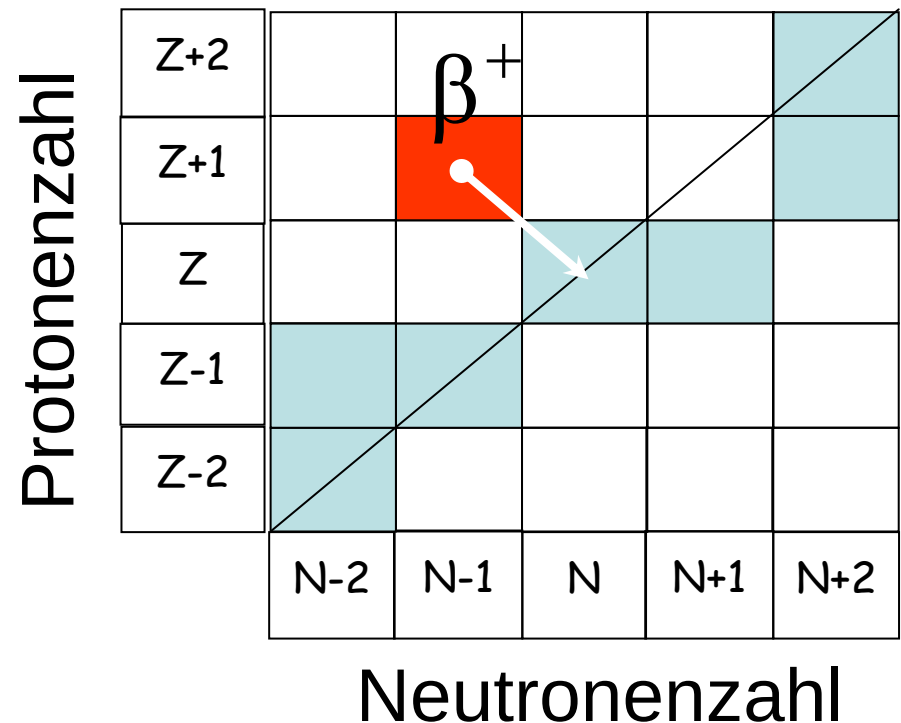
• β^- -Zerfall:

Kerne mit Neutronenüberschuss emittieren eine Elektron und ein Antineutrino. Dabei wandelt sich im Kerninnern ein Neutron in ein Proton um. Die Kernladungszahl nimmt um 1 zu: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$



• β^+ -Zerfall:

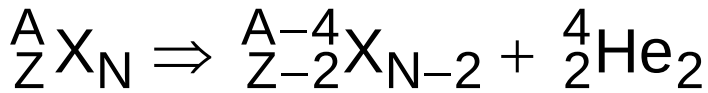
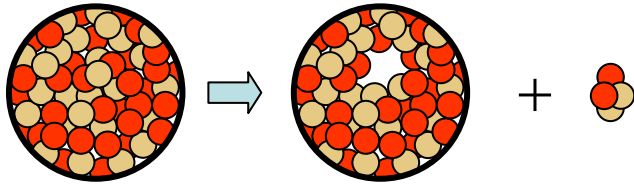
Kerne mit Protonenüberschuss emittieren ein Positron (Anti-Teilchen des Elektrons) und ein Neutrino. Dabei wandelt sich im Kerninnern ein Proton in ein Neutron um. Die Kernladungszahl nimmt um 1 ab: $p \rightarrow n + e^+ + \nu$



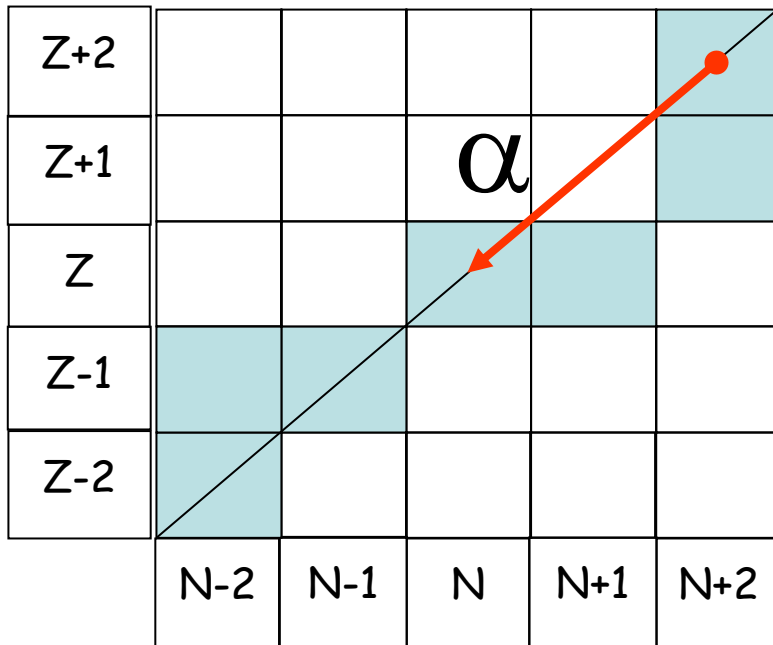
α - und γ - Zerfall

• α -Zerfall:

ein schwerer Atomkern emittiert einen ${}^4\text{He}$ -Kern (α -Teilchen)

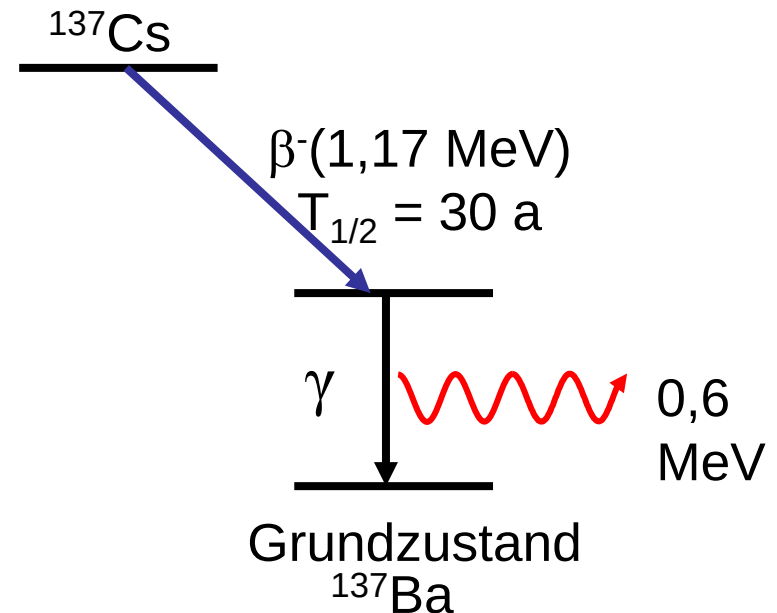


Protonenzahl



• γ -Zerfall:

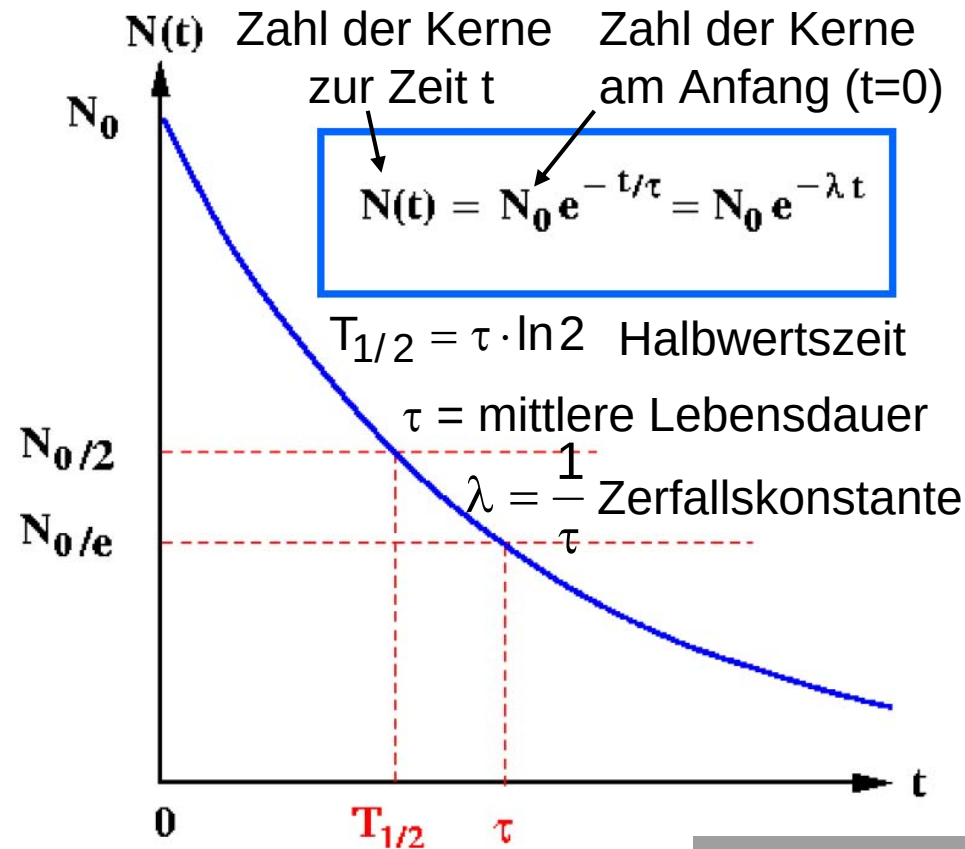
nach α - und β - Zerfall bleibt der Kern häufig für sehr kurze Zeit in einem angeregten Zustand des Tochterkerns. Er fällt in den Grundzustand durch Aussenden von elektromagnetischen Wellen, d.h. γ - Quanten: z.B.



• bei γ -Zerfall keine Änderung von Z, A

Radioaktives Zerfallsgesetz

- radioaktive Zerfälle sind **statistische Prozesse**, d.h. bei einem einzelnen Atomkern kann man nur eine **Wahrscheinlichkeit** dafür angeben, dass er in einem bestimmten Zeitintervall zerfällt. Man kann nie genau sagen, wann der betrachtete Atomkern zerfallen wird
- bei einer großen Zahl von Kernen gilt das **exponentielle Zerfallsgesetz**



Halbwertszeit = Zeitspanne, nach der die Hälfte der instabilen Kerne zerfallen ist

Radionuklid	Halbwertszeit
Polonium-214	160 Mikrosekunden
Wismut-214	19.9 Minuten
Radon-222	3.8 Tage
Blei-210	22 Jahre
Radium-226	1600 Jahre
Kohlenstoff-14	5370 Jahre
Uran-235	700 Millionen Jahre
Kalium-40	1.3 Milliarden Jahre
Uran-238	4.5 Milliarden Jahre



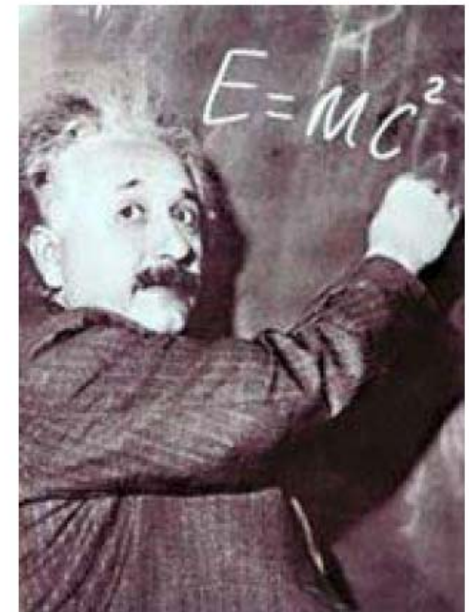
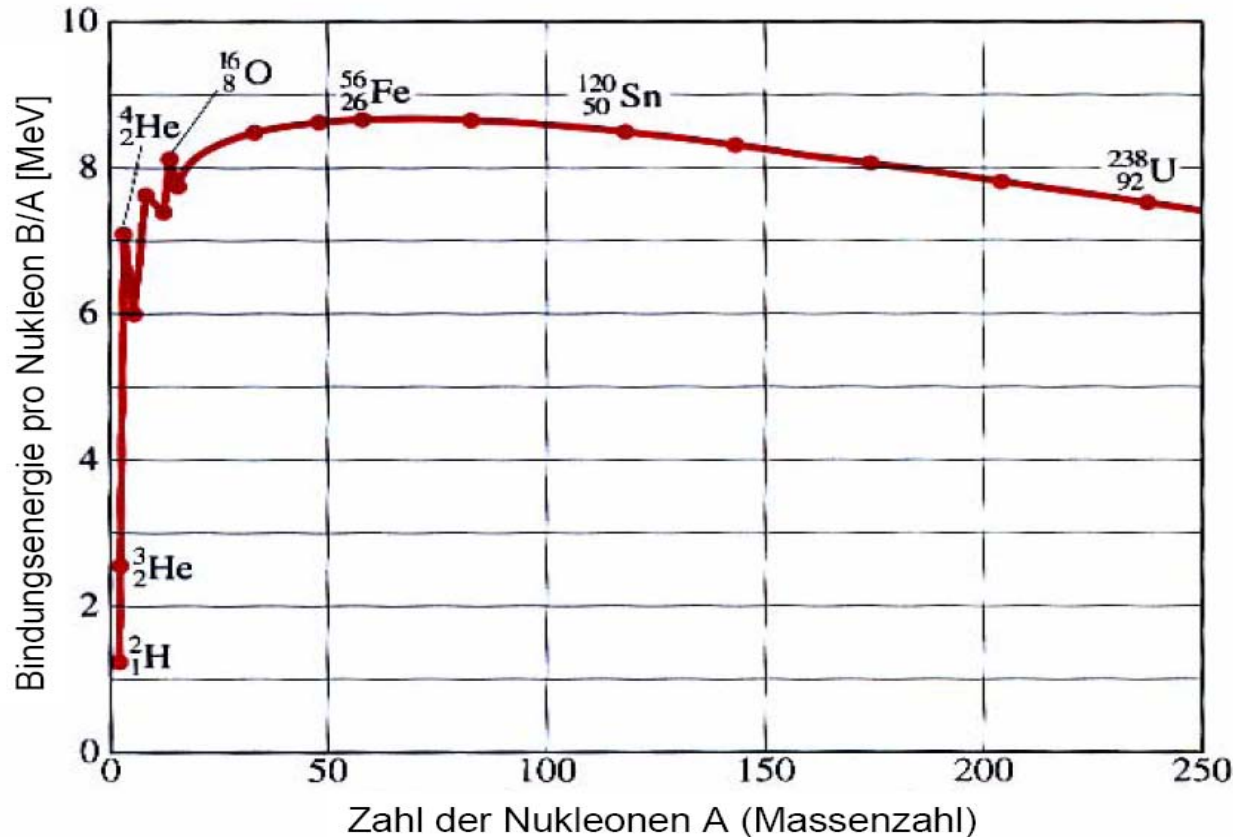
Bindungsenergie von Atomkernen

- Die Nukleonen werden durch Kernkräfte zum Atomkern gebunden
- Masse eines Atomkerns ist kleiner als die Summe der Nukleonenmassen

$$m_{\text{Kern}} + \Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n \quad \Delta m = \text{Massendefekt}$$

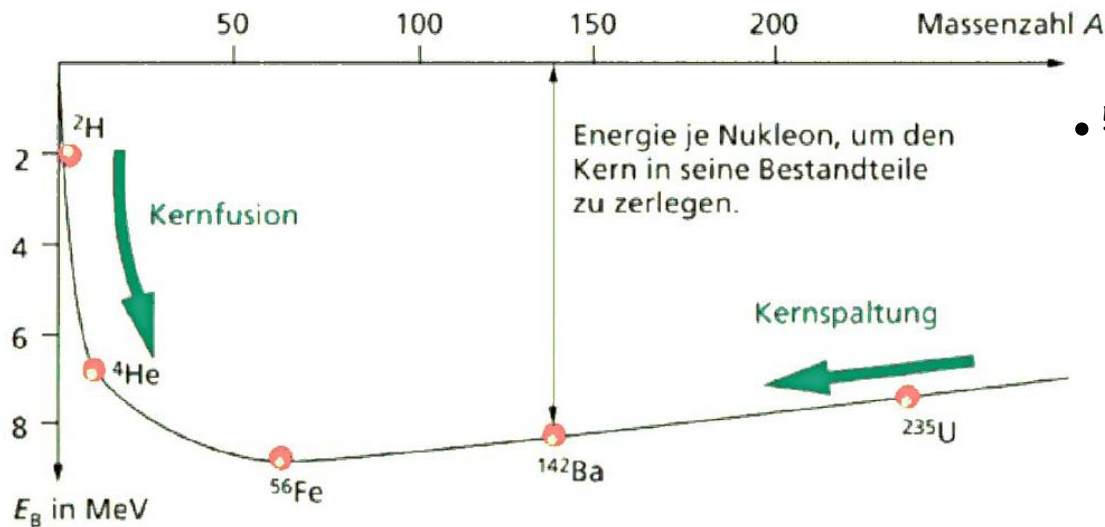
- **Äquivalenz von Masse und Energie:** $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$

$\Delta E = \text{Bindungsenergie}$ = Energie, die aufzuwenden ist, um einen Atomkern in einzelne Nukleonen zu zerlegen



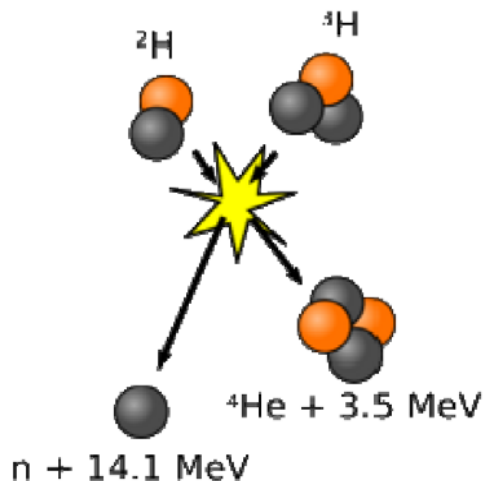
Für die meisten Kerne liegen die Bindungsenergien bei 8 – 9 MeV

Energiegewinnung aus Kernfusion und Kernspaltung

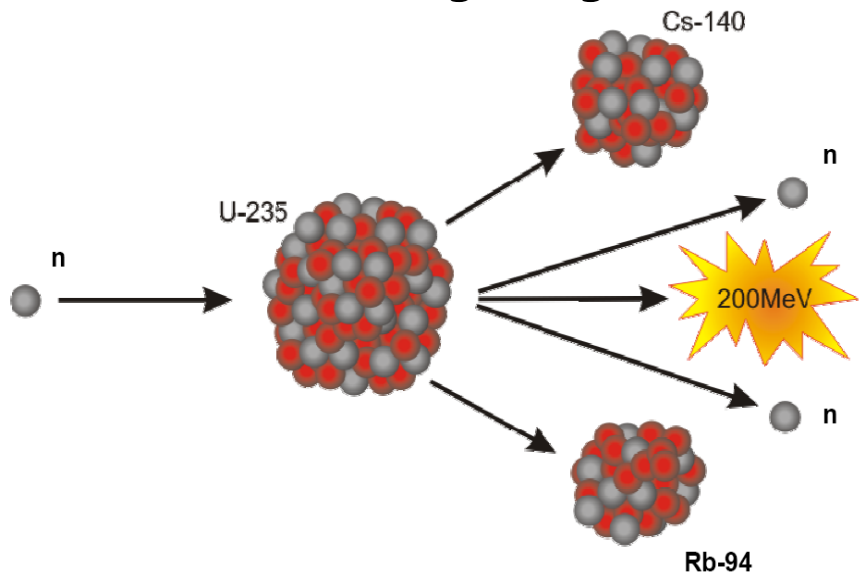


- ^{56}Fe ist der am stärksten gebundene Atomkern: man muss ca. 9 MeV pro Nukleon aufwenden, um ihn in Protonen und Neutronen zu zerlegen.

- Kernfusion** (z.B. Sonne)
leichte Kerne vereinigen sich zu größeren stabileren Kernen unter Energieabgabe:

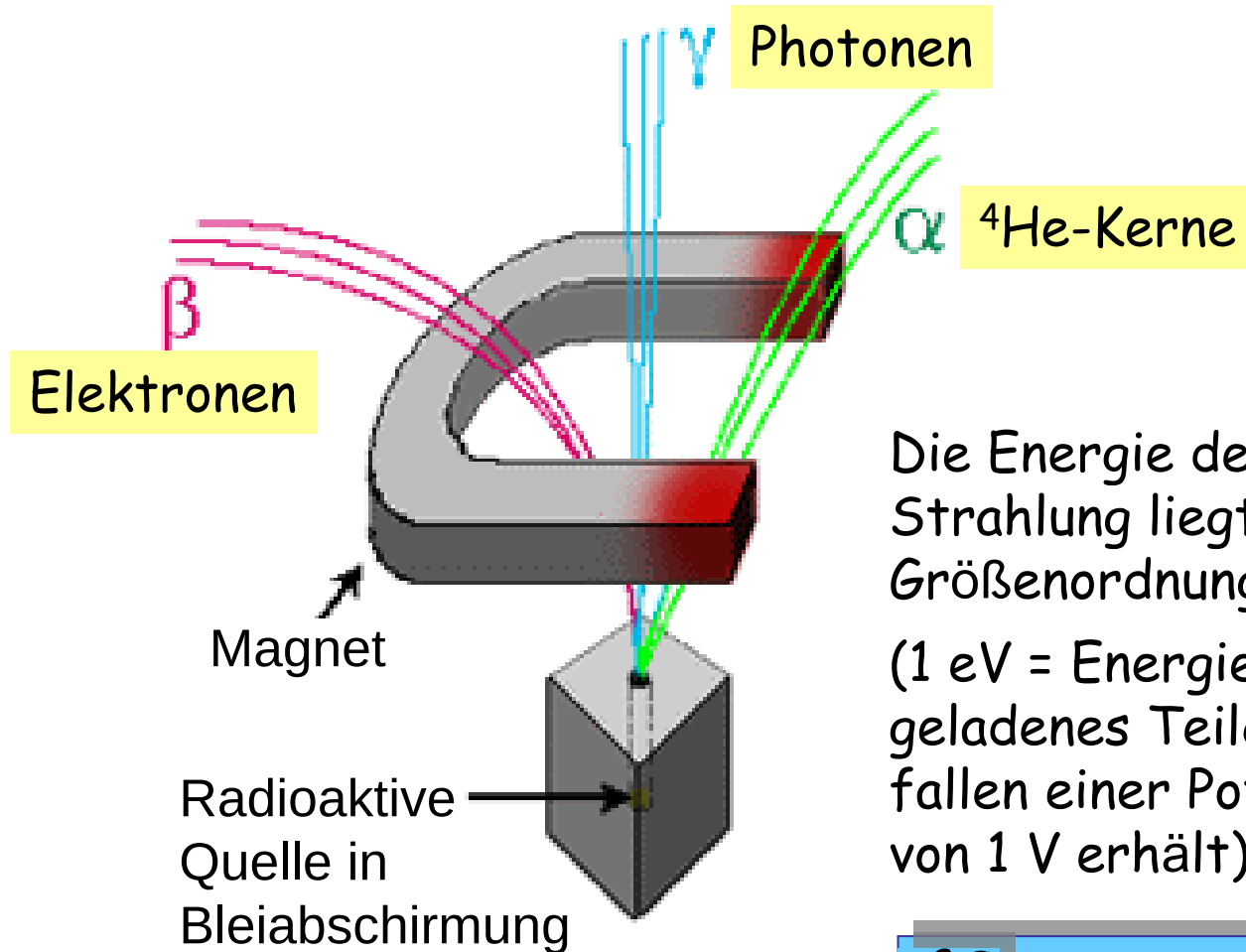


- Kernspaltung:**
Schwere Kerne zerfallen in kleinere Kerne unter Energieabgabe:



α , β , γ -Strahlung

- Unterscheidung von α (^4He -Kerne), β und γ -Strahlung durch unterschiedliches Verhalten im Magnetfeld



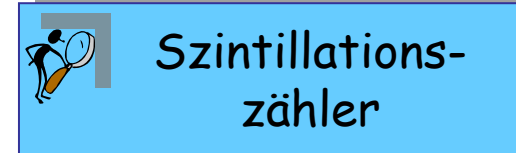
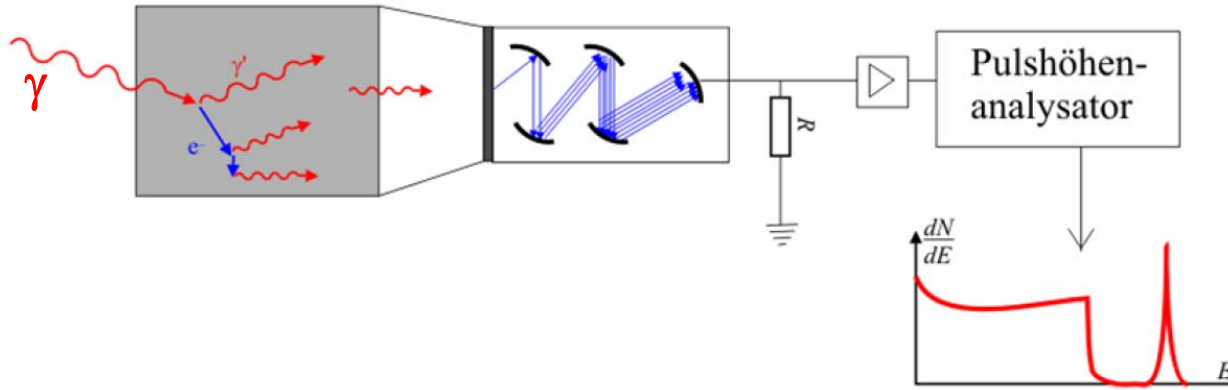
Die Energie der emittierten Strahlung liegt in der Größenordnung von $\text{MeV} = 10^6 \text{eV}$ (1 eV = Energie, die ein einfach geladenes Teilchen bei Durchfallen einer Potenzialdifferenz von 1 V erhält)



Ablenkung von β -Strahlen im Magnetfeld

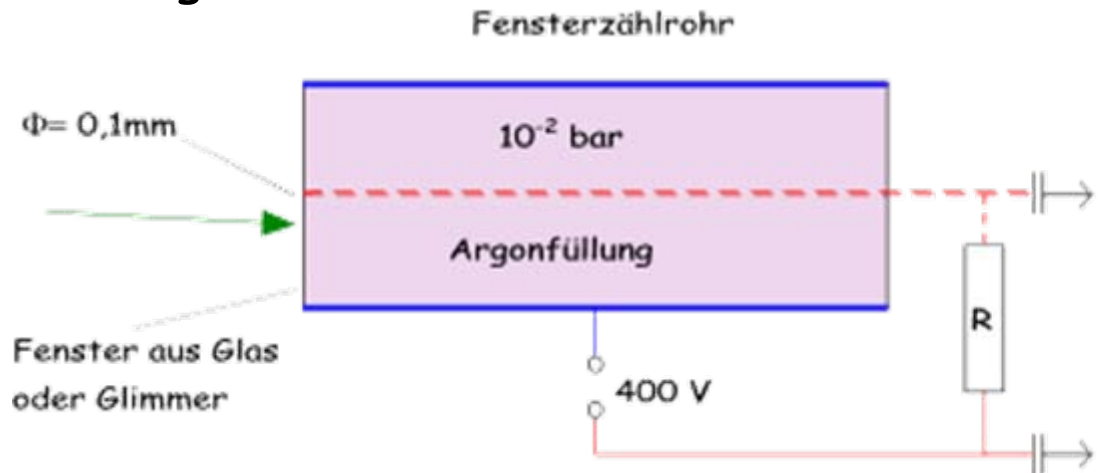
Detektoren für α , β , γ -Strahlung

- **Szintillationsdetektor**: Strahlung regt Atome des Detektors an; bei Abregung der Atome emittiertes Licht wird in elektrisches Signal umgesetzt und verstärkt

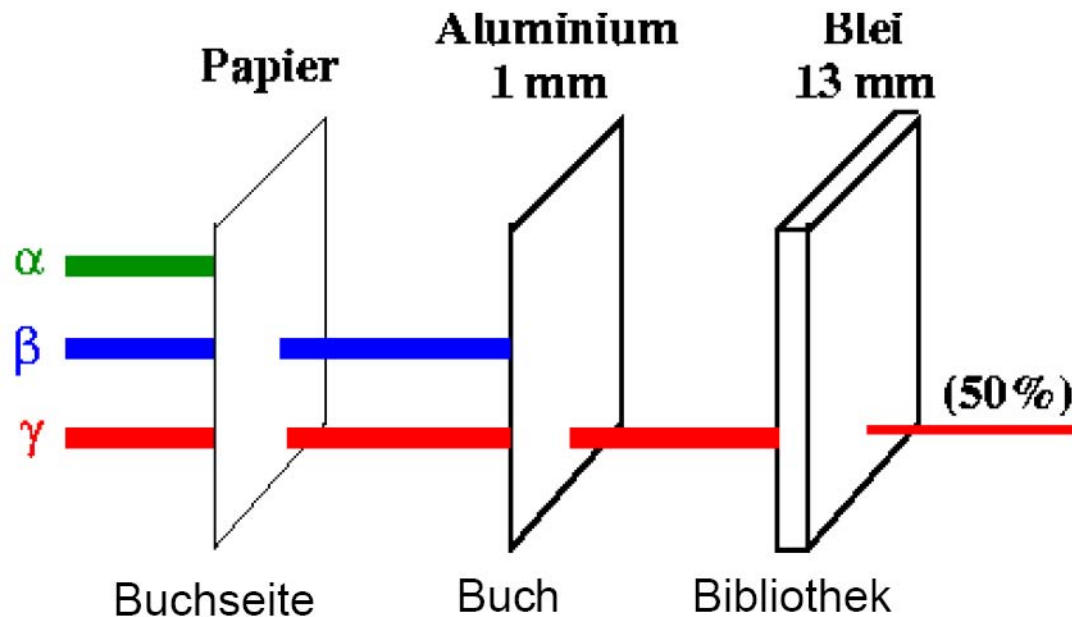


- **Ionisationsdetektor**: Strahlung ionisiert Atome des Zählergases; Ladungsvervielfachung durch sekundäre Ionisationsprozesse im $\vec{E}$ Feld
Ladungslawine $\Rightarrow$ elektrisches Signal

Geiger-Müller-Zählrohr:

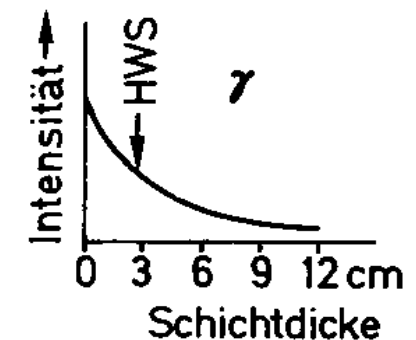
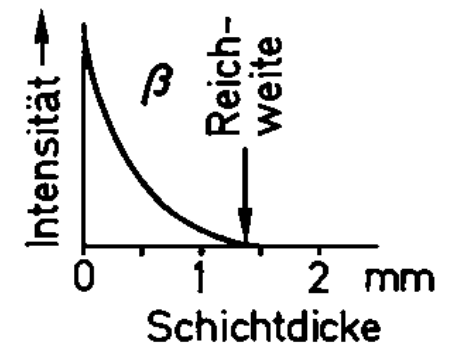
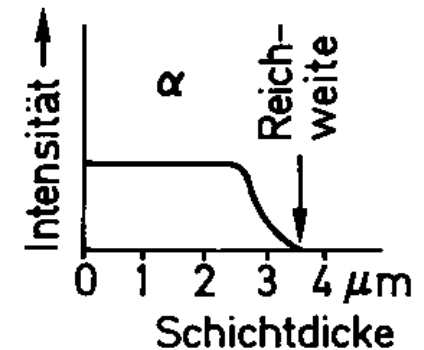


Wechselwirkung von Strahlung mit Materie



 Reichweite: α, β, γ

Unterschiedliche Abschwächung in Materie



Strahlung	Energie	Reichweite	Abschirmung
α -Strahlung	einige MeV	gering	Papier
β -Strahlung	bis zu 1 MeV	relativ gering	Aluminium
γ -Strahlung	etwa 1 MeV	groß	Blei

Biologische Wirkung ionisierender Strahlung

- radioaktive Strahlung führt zu Anregung, Ionisation und Umlagerung von Molekülen, Bildung chemischer Radikale, Mutationen von Genen.
⇒ **Akutschäden**
⇒ **Spätschäden**: Krebs, Erbschäden durch genetische Veränderungen
- entscheidende Größen: Dosis, Art der Strahlung, Dauer der Einwirkung
- Dosisgrößen:
 - Energiedosis: die pro Masseneinheit deponierte Energie: $1\text{G} = \frac{1\text{J}}{1\text{kg}}$
Einheit: 1 Gray;
 - Äquivalentdosis: um die unterschiedliche biologische Wirksamkeit der Strahlensorten zu berücksichtigen wird die Energiedosis mit einem **RBW-Faktor** (**R**adio-**B**iologische **W**irksamkeit) multipliziert:

$$\text{Äquivalentdosis} = \text{Energiedosis} \times \text{RBW}$$

Einheit: 1 Sievert, 1 Sv

Strahlungsart	RBW
Photonen, Elektronen	1
Protonen	10
α -Teilchen, Schwerionen	20

Strahlenschäden bei kurzzeitiger Ganzkörperbestrahlung

akute Strahlenschäden:

(nach kurzzeitiger Ganzkörperbestrahlung des Menschen)

< 0.5 Sv	geringe vorübergehende Blutbildveränderungen
0,8 – 1,2 Sv	Übelkeit und Erbrechen in 10% der Fälle
4 – 5 Sv	50% der Todesfälle innerhalb von 30 Tagen, Erholung der Überlebenden nach $\frac{1}{2}$ Jahr
5,5 – 7,5 Sv	Letale Dosis, 100% Todesfälle
> 50 Sv	Schwere Nervenschädigungen, Tod innerhalb einer Woche

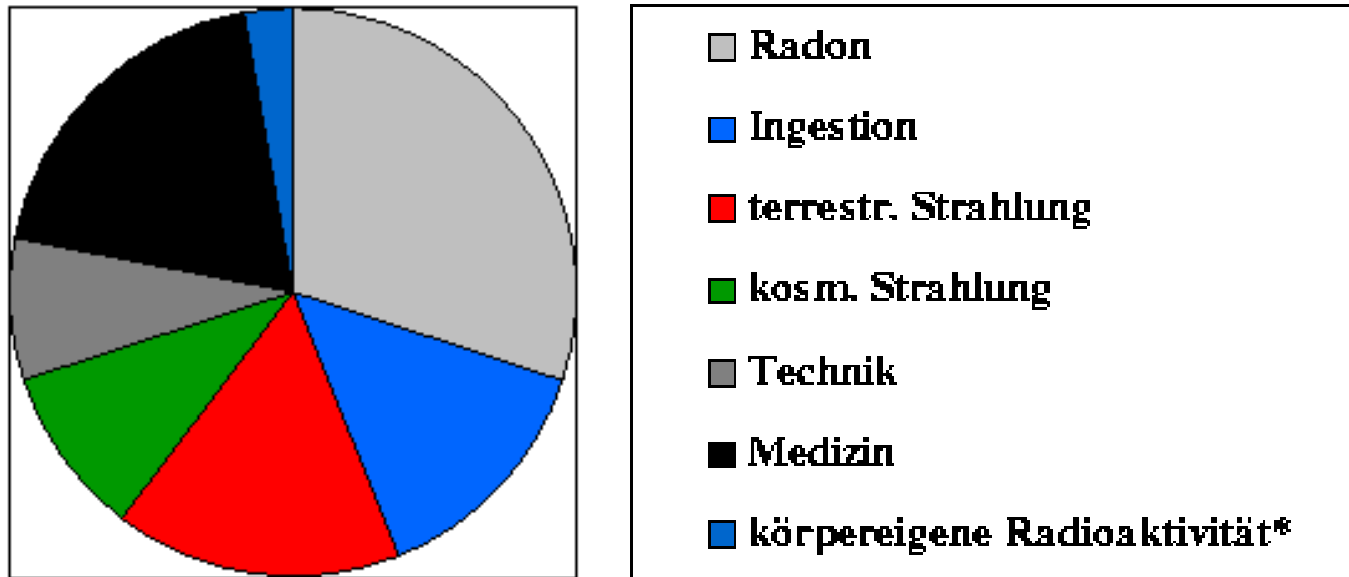
Spätschäden

(Erfahrungen nach Atombombenabwurf in Hiroshima / Nagasaki)

Ganzkörperdosis 1 - 2 Sv Verdoppelung der Tumorraten

Künstliche und natürliche Strahlenbelastung

Gesamtstrahlenbelastung $\approx 4 \text{ mSv/Jahr}$



- die **natürliche Strahlenbelastung** beträgt für eine Bewohner der Bundesrepublik Deutschland im Mittel nicht mehr als **3,5 mSv pro Jahr**
- die **künstliche und zivilisatorische Strahlenbelastung** beträgt für Bewohner der Bundesrepublik Deutschland im Mittel nicht mehr als **0,6 mSv pro Jahr**
- die Obergrenze für beruflich strahlenexponierte Personen beträgt **20 mSv pro Jahr**

Natürliche Strahlenbelastung

- **Kosmische Strahlung:**
Die Erde ist einem ständigen Beschuss mit hochenergetischen Protonen aus dem Kosmos ausgesetzt.
- Beim Zusammenprall mit den Gasatomen der Atmosphäre werden Sekundärteilchen erzeugt $\Rightarrow$ **Teilchenschauer**



Höhenstrahlung

- **natürliche Radioaktivität** in unserem Körper: ^{40}K , ^{14}C
- in unserem Körper zerfallen pro Sekunde etwa 5000 ^{40}K -Kerne und ca. 4000 ^{14}C -Kerne d.h. insgesamt ca 9000 Bq

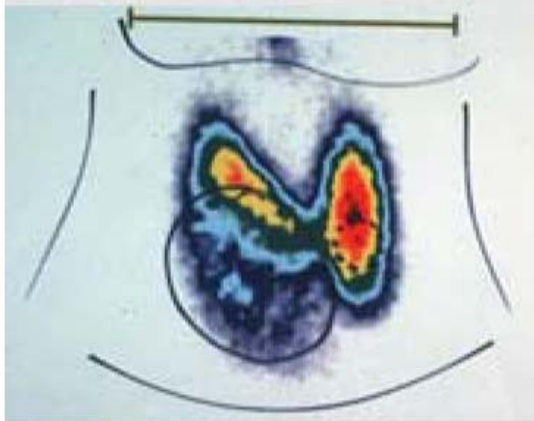
Einheit: **1 Bequerel (Bq)** =
1 Zerfall pro Sekunde



- Verwendung von **Radionukliden** (γ -Strahler, z.B. ^{99}Tc) als **Tracer**.
Es werden Nuklide verwendet, die sich in bestimmten Organen anreichern



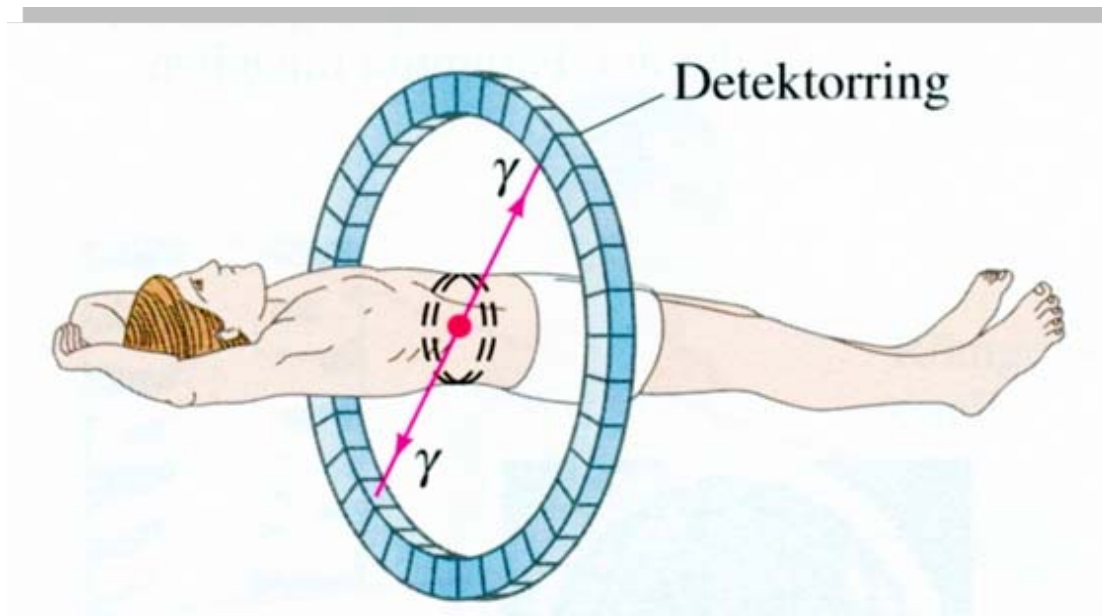
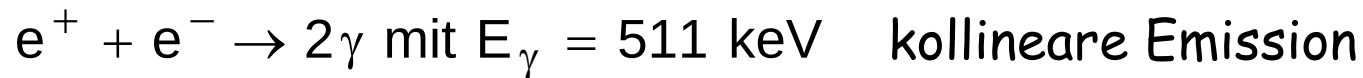
Krankhaft vergrößerte Schilddrüse (Struma)



- Die Position der γ -Quellen wird durch Nachweis der γ -Strahlen bestimmt
⇒ **Emissions-Computer-Tomographie (ECT)**
- **Szintigraphie und Szintigramme:**
Bildgebendes Verfahren bzw. Bild auf Basis der nachgewiesenen γ -Strahlung von Tracern
- Anwendungen:
 - Blut- und Harnflussbestimmungen
 - Tumorlokalisation
 - Stoffwechseluntersuchungen
 - Knoten in Schilddrüse

Positronen-Emissions-Tomographie (PET)

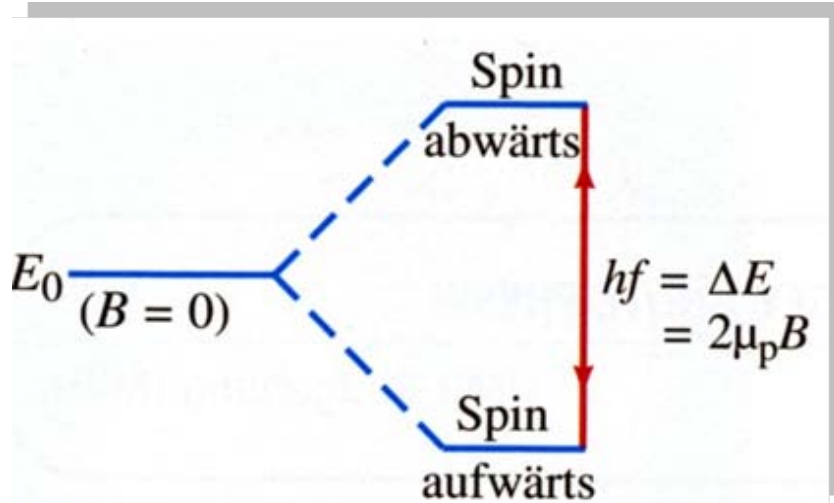
- Positronen-Emitter wie $^{11}_6\text{C}$, $^{13}_7\text{N}$, $^{15}_8\text{O}$, $^{15}_9\text{F}$ werden inhaliert oder injiziert und in dem zu untersuchenden Organ akkumuliert
- e^+ bewegen sich höchstens um einige mm bis sie auf e^- treffen und dann zerstrahlen (Antimaterie-Materie-Zerstrahlung: Äquivalenz von Masse und Energie: $E=mc^2$)



Kollineare
Photonenemission

Magnet-Resonanz-Tomographie

- Protonen und Atomkerne haben einen **Spin** (Eigendrehimpuls) und damit verbunden ein **magnetisches Moment** wie Elektronen

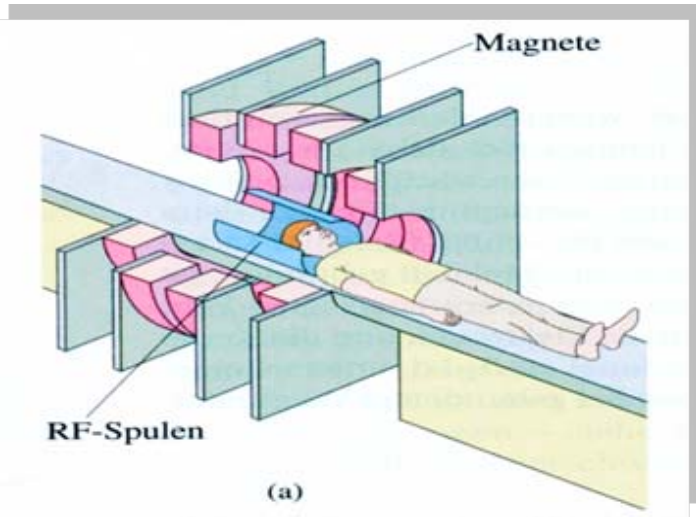


- in einem äußeren Magnetfeld richten sich die Spins aus: parallel oder anti-parallel (Zeemanaufspaltung in zwei Zustände, abhängig von $\vec{B}$ -Feldstärke)
- durch Einstrahlung einer elektromagnetischen Welle der richtigen Frequenz (Resonanzfrequenz) klappen die Spins um

- ortsaufgelöste Vermessung dieser Resonanzabsorption ist die Grundlage der **Kernspin-Resonanz-Tomographie**:
- Dazu wird der Körper in ein inhomogenes Magnetfeld eingeführt, so dass die Resonanzbedingung immer nur für eine bestimmte Schicht erfüllt ist.
⇒ **Nachweis der Verteilung der Kernspins des Wasserstoffs im Gewebe**

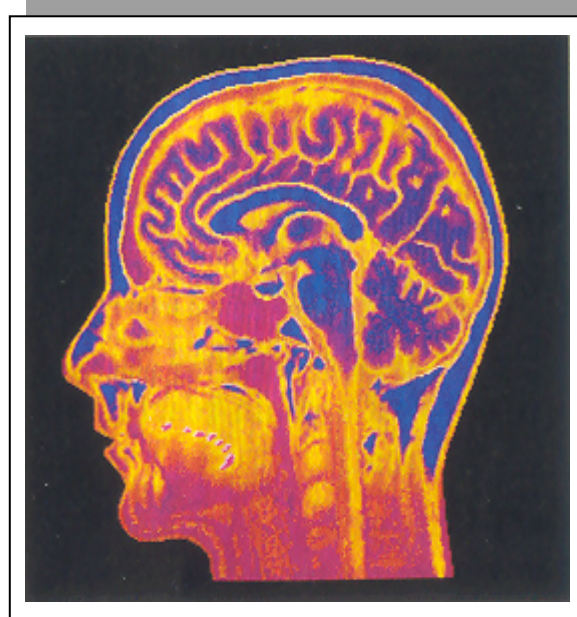
Magnet-Resonanz-Tomographie

- drei-dimensionale Bilder des menschlichen Körpers ohne Strahlenbelastung



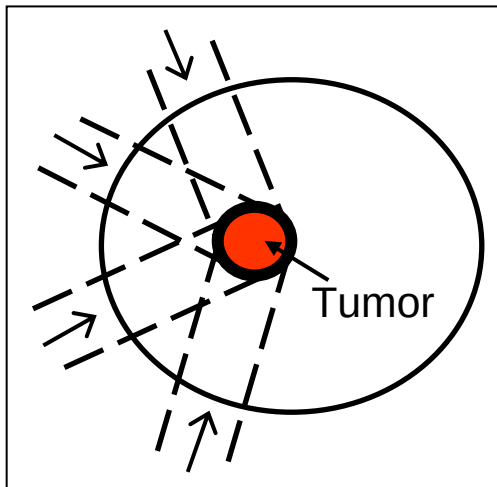
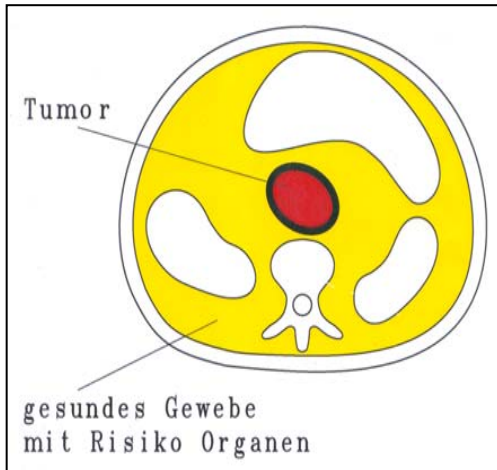
Schnittzeichnung

MRT-Falschfarben-
Bild eines Schnitts
durch das Gehirn

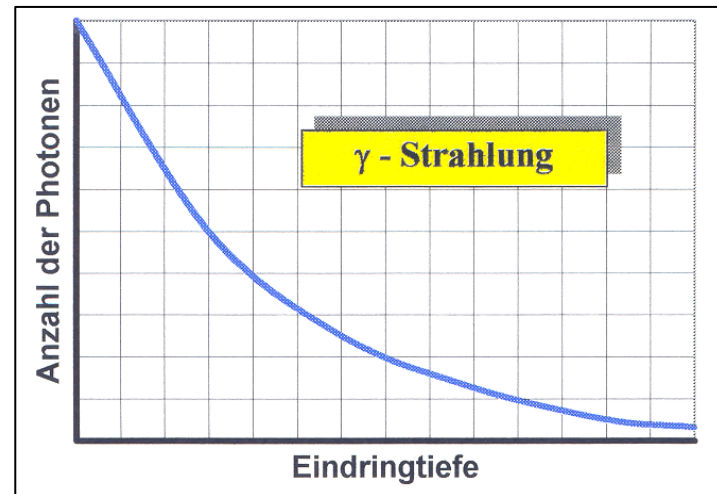


Strahlentherapie von tieferliegenden Tumoren

- **Ziel:** Zerstörung von Tumorzellen (Doppelstrangbruch der DNS) durch Energiedeposition im Tumor
- **Problem:** Wie kann man Tumorzellen abtöten, ohne zugleich gesundes Gewebe zu schädigen?



Heutiger Standard in Krankenhäusern:
Bestrahlung mit γ -Strahlen

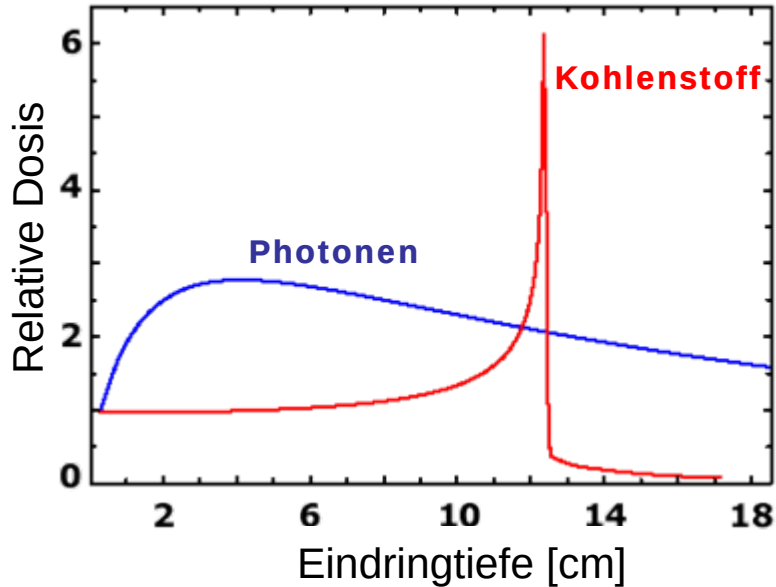


Nachteil: Mehr Energiedeposition im
gesunden Gewebe als im Tumor !

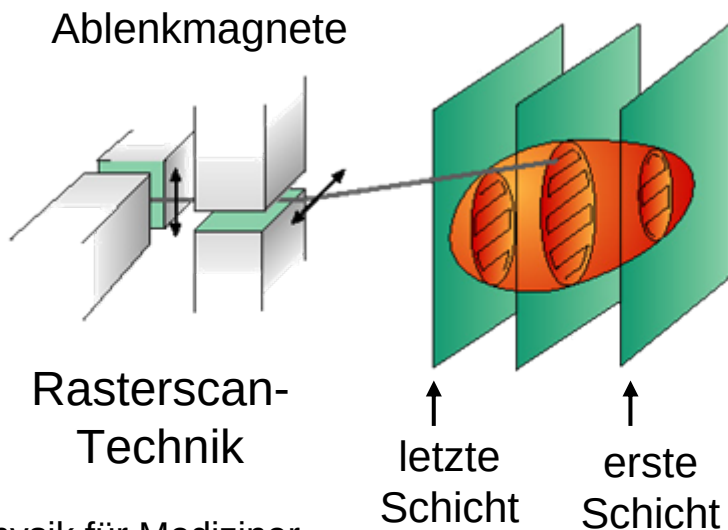
durch verschiedene Einstrahlungsrichtungen
(**Vielfeldbestrahlung**) wird der Strahlungs-
Schaden im gesunden Gewebe gering gehalten

Krebstherapie mit Schwerionenstrahlen (^{12}C -Ionen)

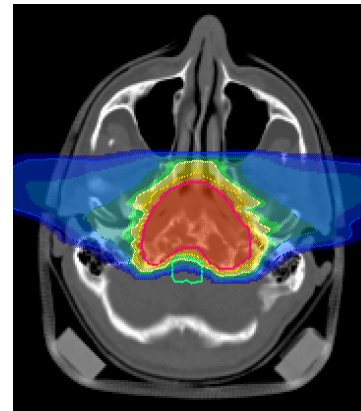
- **Invertiertes Dosisprofil:** mit C-Ionen höchste Energiedeposition am Ende der Ionenbahn mit Millimeter-Genauigkeit !



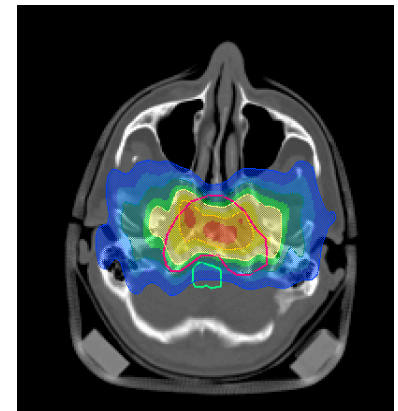
genaue Positionierung des Patienten



Bestrahlungsplan



Verifikation durch PET



Erfolgsbilanz des Pilotprojekts bei der GSI

- Dezember 1997: erste Bestrahlung
bis Oktober 2007: insgesamt 370 Patienten mit inoperablen Tumoren in ca. 7 000 Bestrahlungen behandelt
- Tumore erfolgreich abgetötet;
keine Neubildung von Tumoren in bestrahlten Bereichen;
keine oder **nur geringfügige Nebenwirkungen**
- Ziel: statistisch abgesicherter Beweis für Überlegenheit des neuartigen Bestrahlungsverfahrens
- Konstruktion und Bau eines dedizierten, kompakten Klinikbeschleunigers für 1000 Patienten pro Jahr (Radiologische Universitätsklinik Heidelberg)
Fertigstellung 2007; erste Bestrahlung 2008
- Bau eines Beschleunigers zur Partikeltherapie am Universitätsklinikum Gießen/Marburg (Standort Marburg):
Inbetriebnahme: 2010

Zusammenfassung

- **Atomkerne** bestehen aus **Protonen** und **Neutronen** und enthalten fast die ganze Masse des Atoms
- die **Stabilität von Atomkernen** wird bestimmt durch das Wechselspiel von attraktiver starker Wechselwirkung zwischen allen Nukleonen und der Coulombabstoßung zwischen den Protonen
- **radioaktive Strahlung** entsteht bei der Umwandlung von Atomkernen:
 - **α -Strahlung** (^4He -Kerne)
 - **β -Strahlung**: Emission negativer Elektronen oder positiver Positronen
 - **γ -Strahlung**: energiereiche elektromagnetische Wellen (Photonen)
- radioaktive Strahlung ist so energiereich, dass sie Materie ionisieren kann: $\Rightarrow$ **Strahlenschäden, Strahlenschutz**
- unter Ausnutzung der **Äquivalenz von Masse und Energie ($E=mc^2$)** lässt sich Energie freisetzen durch Verschmelzen (**Fusion**) leichter Atomkerne oder durch **Spaltung schwerer Atomkerne**
- die Physik der Atomkerne ermöglicht viele medizinische Anwendungen:
z.B. **Szintigraphie, Positronen-Emissions-Tomographie (PET), Magnet-Resonanz-Tomographie (MRT); Tumorthherapie mit Ionenstrahlen**