



---

# **Radioaktive Strahlenquellen in der Medizin**

**Dr. R. Mini**

## In der Medizin verwendete Strahlenquellen

### Beschleunigeranlagen :

- Röntgendiagnostik
- Radio-Onkologie

### Radionuklide :

- Nuklearmedizin
- Radio-Onkologie



## In der Medizin verwendete Radionuklide

Radionuklide werden in der Medizin zu diagnostischen und therapeutischen Zwecke eingesetzt

### Nuklearmedizin

- Nuklearmedizinische Diagnostik
- Nuklearmedizinische Therapie

### Radio-Onkologie

- perkutane Strahlentherapie
- Brachytherapie



## Radioaktivität

Atomkerne heissen radioaktiv, wenn sie unter spontaner Strahlenemission und Energieabgabe aus einem instabilen Zustand in eine stabilere Konfiguration oder Struktur übergehen.

Radioaktivität umfasst alle ohne äussere Einwirkung stattfindenden Kernumwandlungsprozesse. Dazu zählen alle Umwandlungen von Atomkerne sowie isomere Übergänge, bei denen der Ausgangskern aus einem angeregten, metastabilen Anfangszustand in einen Zustand niedrigerer Energie übergeht.

Bei allen radioaktiven Zerfällen ist die Bindungsenergie der Zerfallsprodukte kleiner als die des Mutternuklides.



## In der Medizin verwendete Radionuklide

### Nuklearmedizin

Offene radioaktive Strahlenquellen

### Radio-Onkologie

Geschlossene radioaktive Strahlenquellen



## Offene radioaktive Strahlenquellen

Strahlenquellen, die radioaktive Stoffe enthalten und die sich ausbreiten und Kontamination verursachen können

nehmen am Stoffwechsel teil

## Geschlossene radioaktive Strahlenquellen

Strahlenquellen, die radioaktive Stoffe enthalten, und deren Bauart unter üblicher Beanspruchung ein Austreten radioaktiver Stoffe vollständig verhindert und so die Möglichkeit einer Kontamination ausschliesst. Die Quellenkapselung soll für die vorgesehene Anwendung den Anforderungen der ISO-Normen genügen und entsprechend klassifiziert sein.

nehmen am Stoffwechsel nicht teil; oft nur Gamma-Strahler



## Atomkerne



## Atomkern

Der Atomkern besteht aus  $Z$  Protonen und  $N$  Neutronen. Protonen und Neutronen werden zusammen als Kernteilchen (Nukleonen) bezeichnet. Die Kernladungs- oder Ordnungszahl  $Z$  gibt die Zahl positiver Elementarladungen  $e_0$  im Atomkern an. Die Gesamtzahl der Nukleonen im Kern wird durch die Nukleonen- bzw. Massenzahl  $A$  angegeben.

$$A = Z + N$$

Die Bezeichnung **Proton** für den Atomkern des einfachsten Wasserstoffatoms geht auf Lord Rutherford zurück, der diesen Namen (er kommt aus dem Griechischen und bedeutet: das Erste) 1919 einführte.

Das **Neutron** wurde 1920/21 von Lord Rutherford aus theoretischen Gründen vorhergesagt. Experimentell entdeckt wurde es 1932 durch James Chadwick (1891 - 1974), der dafür 1935 den Physiknobelpreis erhielt.

Die **Elementarladung** ist die kleinste elektrische Ladungsmenge. Freie Ladungen kommen in der Natur nur als ganzzahlige positive oder negative Vielfache der Elementarladung vor. Positive Elementarladungen befinden sich z. B. auf dem Proton, dem Pion und dem Positron, eine negative auf dem Elektron. Ladungen verschiedenen Vorzeichens neutralisieren sich. Der Zahlenwert der Elementarladung beträgt  $e_0 = 1.6021892 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .





## Atomare Masseneinheit u

$$A = Z + N$$

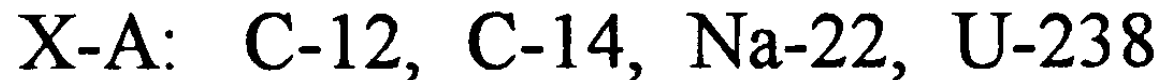
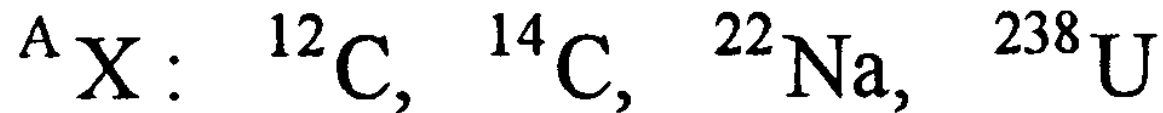
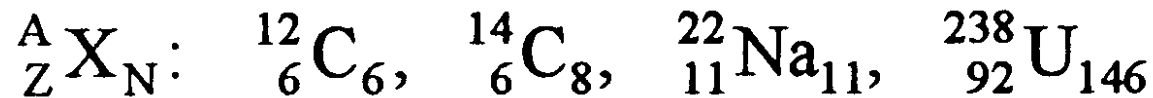
$$1u = \frac{m_C}{12} = \frac{12\text{g/mol}}{12} \cdot \frac{1}{6.022137 \cdot 10^{23} / \text{mol}} = 1.66054 \cdot 10^{-27} \text{kg}$$

$$1 \text{ u} \cdot c^2 = 931.50157 \text{ MeV}$$

**Lorenzo Romano Amedeo Carlo Avogadro** (9. 8. 1776 - 9. 7. 1858), italienischer Adliger aus Turin, Physiker, Mathematiker und Jurist, grundlegende Arbeiten zur mathematischen Physik. Die nach ihm benannte Avogadro-Konstante A ist der Quotient der Teilchenzahl in einer Stoffmenge und dieser Stoffmenge (Teilchen/Mol). Ihr Zahlenwert ist  $A = 6.022137 \cdot 10^{23} \text{mol}^{-1}$ .



## Kennzeichnung der Atomkerne



## Kerndimensionen

$$R_{\text{kern}} = r_0 \cdot A^{1/3} \quad \text{mit} \quad r_0 = 1.3 \cdot 10^{-15} \text{ m}$$

$r_0$ : Radius der Nukleonen

$$r_{\text{Hülle}}/r_{\text{Kern}} \approx 10'000 : 1 \quad \text{bis} \quad 100'000 : 1$$

Bsp.: da  $r_{\text{Hülle}} = \text{ca. } 10^{-10} \text{ m}$  gilt  
falls  $r_{\text{Kern}} = 10 \text{ cm} \rightarrow r_{\text{Hülle}} = 1 \text{ km bis } 10 \text{ km}$

**Beispiel** : Der Radius eines J-131-Atomkernes beträgt nach Gl. (2.21)  $r(131\text{-J}) = 6.6 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ , der Kernradius eines Uranatoms ist  $r(238\text{-U}) = 8.06 \cdot 10^{-15} \text{ m}$  und der Kernradius eines leichten Sauerstoff-16-Kernes ist  $r(16\text{-O}) = 3.3 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ .



## Dichte der Kernmaterie

$$m_{\text{Kem}} \approx A \cdot m_{\text{p,n}}$$

$$V_{\text{Kem}} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_{\text{Kem}}^3 = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (r_0 \cdot A^{1/3})^3 = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_0^3 \cdot A$$

$$\rho = m_{\text{Kern}} / V_{\text{Kern}} = \text{ca. } 2 \cdot 10^{14} \text{ g/cm}^3$$

Die Dichte der Kernmaterie ist ca.  $10^{14}$  mal grösser als die Dichte des Wassers



## Atomkernstruktur

- starke Wechselwirkungskräfte zwischen Nukleonen (ca. 100 mal grösser als Coulombabstossung)
- kurzreichweitige Paarkräfte zwischen einzelnen Nukleonenpaaren
- dichte Raumanordnung der Nukleonen



## Atomkernmodelle

Massendefekt:  $M(A,Z) = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - \Delta m$

Bindungsenergie  $B = \Delta mc^2$

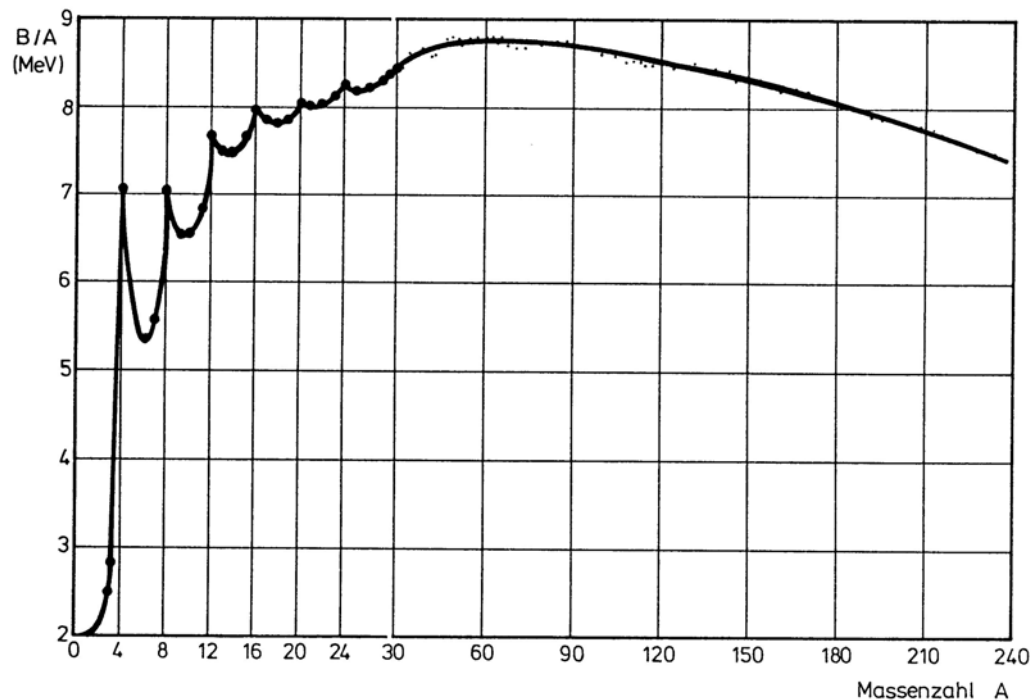
- Flüssigkeitströpfchen-Modell
- Kernschalenmodell
- Fermigas-Modell
- Kollektives Kernmodell
- Optische Kernmodell



## Bindeenergie verschiedener Elemente

### Tröpfchenmodell (liquid drop model)

$$B_{\text{tot}} = 15.85 \cdot A - 18.34 \cdot A^{2/3} - 0.67 \cdot A^{-1/3} \cdot Z^2 - 92.86 \frac{(N-Z)^2}{4A} + \frac{a_{\text{paar}}}{\sqrt{A}}$$



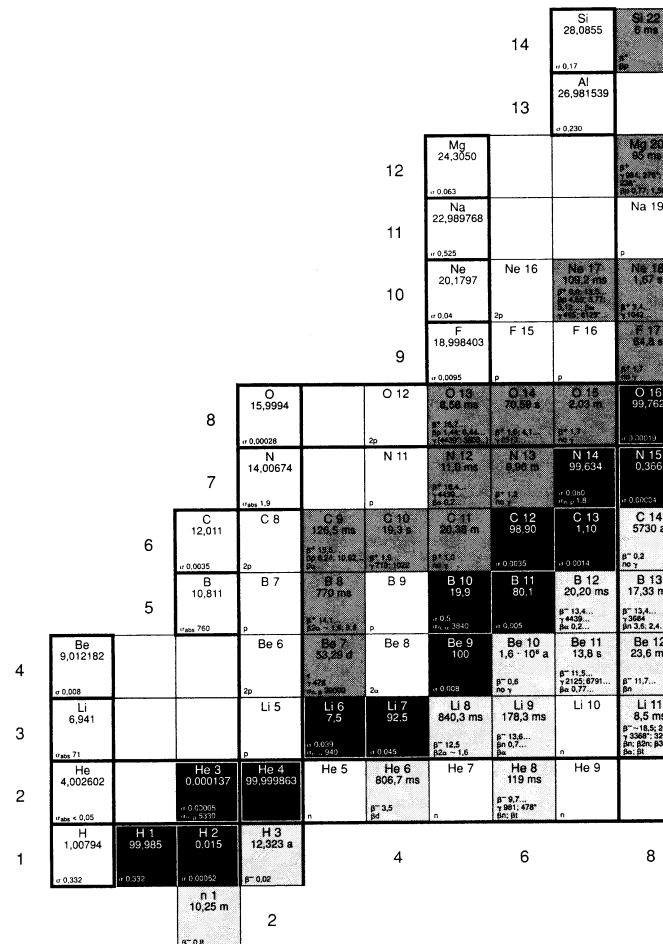
## Atomkernstabilität

- Atomkerne sind stabil wenn ihre Bindungsenergie ein Minimum erreicht
- Für Kerne mit gleichem  $A$  (isobare Atomkerne) hängt die Bindungsenergie quadratisch von der Ordnungszahl der betrachteten Kerne ab (wichtig bezüglich Betastabilität der Kerne)
- Nach dem Tröpfchenmodell sind Atomkerne nur dann stabil, wenn diese eine ausgewogene Anzahl Neutronen und Protonen enthalten.
- Bei leichten Atomkernen müssen dazu Neutronen- und Protonenzahl etwa gleich sein.
- Mit zunehmender Massenzahl ist für die Stabilität ein zunehmender Neutronenüberschuss erforderlich (bis zu 50%)
- Ist das Neutronen-Protonen-Gleichgewicht gestört, nimmt die Gesamtbindungsenergie ab, die Atomkerne werden instabil
- Durch radioaktive Umwandlung streben die Atomkerne eine Minimierung ihrer Bindungsenergie an



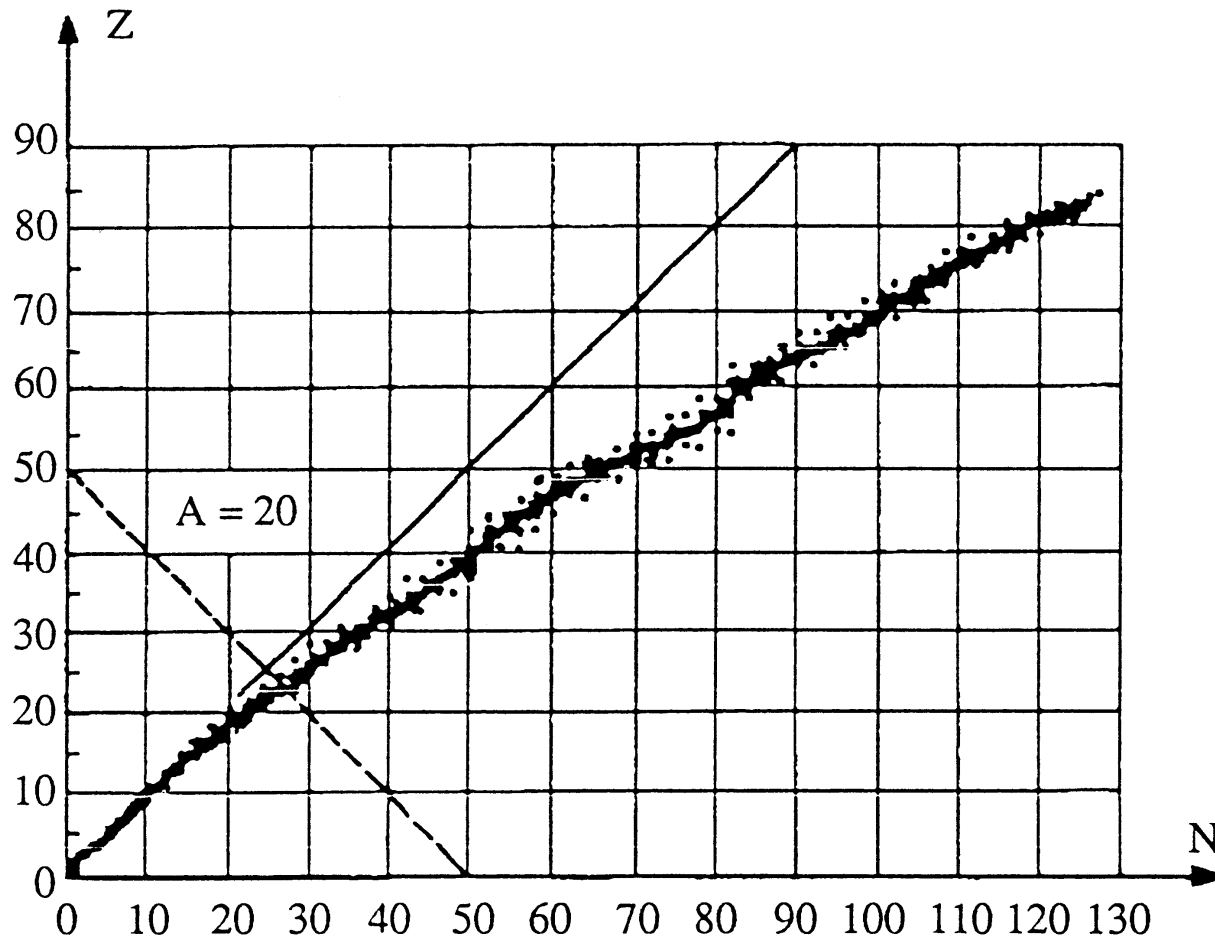


## Nuklid-Karte



Ausschnitt aus der Nuklidkarte des Kernforschungszentrums Karlsruhe ([Karlsruher Nuklidkarte]). Dargestellt sind die leichten Nuklide. Die Ordnungszahl wird in dieser Darstellung wie üblich nach oben, die Neutronenzahl nach rechts gezählt. Schwarze Felder zeigen stabile Nuklide. Mittelgraue Felder (im Original rot) zeigen  $\beta^+$ -aktive, hellgraue (im Original blau)  $\beta^-$ -aktive Radionuklide. Für weitere Informationen s. Text.

## Atomkernstabilität



## Atomkerne

### Zusammenfassung:

- **Atomkerne sind aus Neutronen und Protonen zusammengesetzt, die durch die sogenannte starke Wechselwirkung aneinander gebunden sind.**
- **Die starke Wechselwirkung ist eine kurzreichweitige Paarkraft, die Nukleonen in unmittelbarem Kontakt aneinander bindet. Kernmaterie hat deshalb eine extrem hohe Dichte.**
- **Mit zunehmender Massenzahl wird für stabile Kerne ein anwachsender Neutronenüberschuß benötigt, der bei schweren Kernen bis etwa 50% betragen kann.**
- **Wegen des Fehlens einer zentralen Kernkraft werden Atomkerne durch eine Reihe quantitativer Kernmodelle beschrieben, die je nach Anwendungszweck ausgewählt werden und jeweils nur Teilaspekte der Kernphysik beschreiben können.**
- **Das Tröpfchenmodell hat sich als ein für Energieberechnungen sehr geeignetes Kernmodell erwiesen, das sowohl die Stabilität als auch die Instabilität (Radioaktivität) von Atomkernen quantitativ vorhersagen kann.**
- **Kerne können wie Atomhüllen durch Energiezufuhr in höherenergetische Zustände angeregt werden. Beim Zerfall bzw. der Abregung dieser Zustände kommt es zur Emission charakteristischer Kernstrahlung, die in der Regel Gammastrahlung ist.**
- **Wird ausreichend Energie zugeführt, können Kerne auch zur Emission von Nukleonen veranlaßt werden. Dazu ist mindestens die Zufuhr der Separationsenergie des entsprechenden Nukleons nötig.**



# Radionuklide



## Radionuklide

Zur Zeit sind 2685 Nuklide von 112 Elementen bekannt. 297 (ca. 10%) sind natürlicher Herkunft, von denen sind die meisten, insgesamt 268 stabil. Viele der künstlich durch Kernreaktionen erzeugten Nuklide sind instabil.



## Kernumwandlungsprozesse

Kernumwandlungsprozesse werden nach den dabei emittierten Teilchen oder nach der Art der Umwandlung bezeichnet:

- Alpha-Zerfall
- Beta-Zerfall
- Gamma-Zerfall
  
- Elektronen-Einfang
  
- Innere Konversion



## Arten von radioaktiven Umwandlungen

Es sind zwei Arten von radioaktiven Umwandlungen zu unterscheiden:

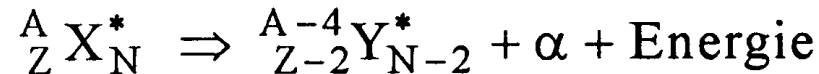
- Zerfälle durch starke Wechselwirkungen, bei denen sowohl Massenzahl als auch Ordnungs- und Neutronenzahl vermindert wird. Typischer Vertreter:

Alphazerfall

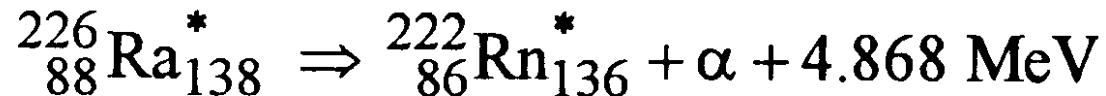
- Die zweite Art der Umwandlungen betrifft die schwache Wechselwirkung. Diese Zerfallsarten sind isobar, Tochter- und Mutternuklide haben somit die gleiche Massenzahl. Die entsprechenden Umwandlungen sind: Betaumwandlungen und der Elektroneneinfang. Nur bei diesen Umwandlungen kann die resultierende Energiebilanz mit dem Tröpfchenmodell abgeschätzt werden.



## Alpha-Zerfall

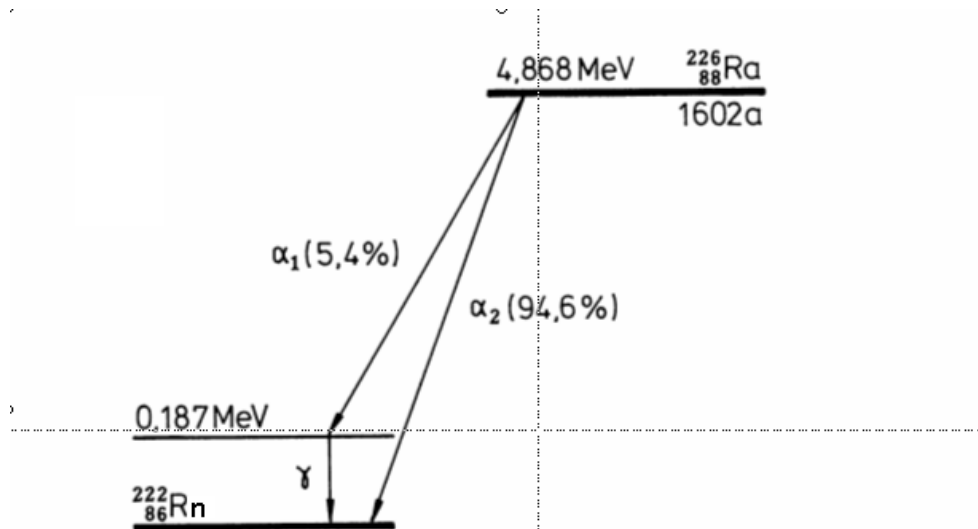
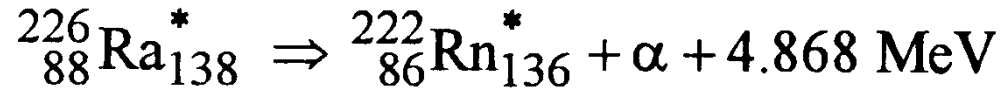


$$m_X(Z, N, A) = m_Y(Z-2, N-2, A-4) + m_\alpha + E_b/c^2$$



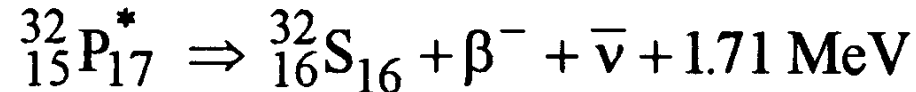


# Alpha-Zerfall

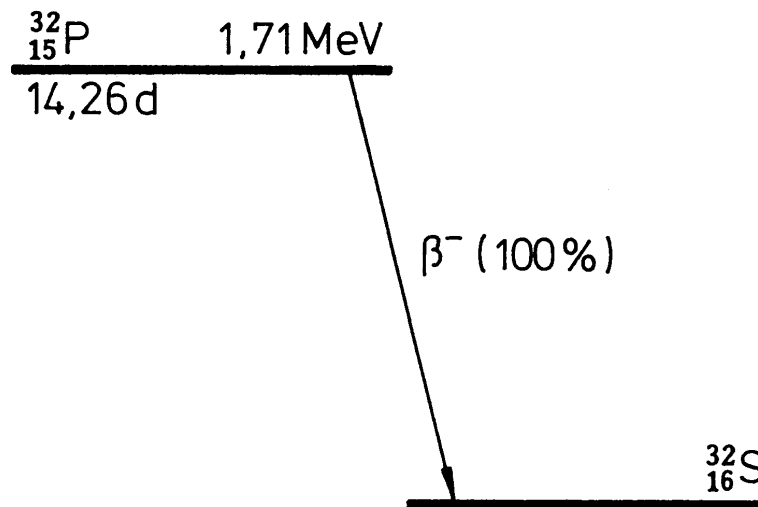


Zerfallsschema des 226-Radium. Die Halbwertszeit für den Alphazerfall beträgt 1602 a, die Zerfallsenergie 4.868 MeV. Der Zerfall findet zu 94.6% in den Grundzustand, zu 5.4% in den angeregten Zustand des 222-Rn statt. Das Grundzustands-Alphaeteilchen hat die Energie 4.782 MeV. Das Alphaeteilchen, das in den angeregten Zustand des Radons zerfällt, hat eine Energie von 4.599 MeV. Der angeregte Zustand des Rn-222 zerfällt unter Gammaemission ( $E_\gamma = 0.187 \text{ MeV}$ ) in den Grundzustand des Rn-222. Rn-222 ist ebenfalls instabil. Es zerfällt über einen Alphazerfall ( $T_{1/2} \approx 3.8 \text{ d}$ ).

## Beta<sup>-</sup> - Zerfall

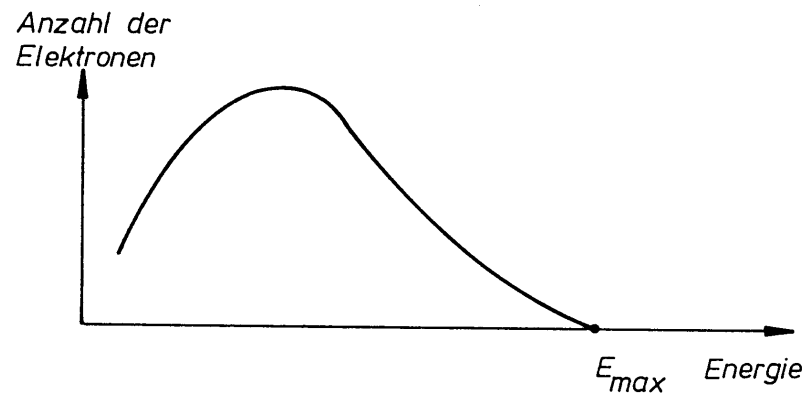
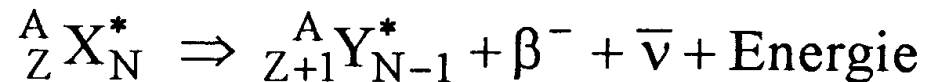
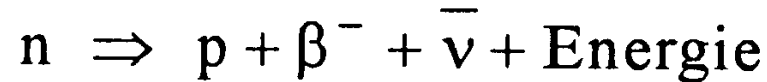


$$E_{\text{max}} = \Delta m \cdot c^2 = [m(Z, N, A) - m(Z+1, N-1, A)] \cdot c^2$$



Zerfallsschema des  $\beta^-$ -Zerfalls des P-32, das zu 100% in den Grundzustand des S-32 zerfällt.  
Die Halbwertszeit dieses Zerfalls beträgt 14.26 d, die maximale Betaenergie 1.71 MeV.

## Beta<sup>-</sup> - Zerfall

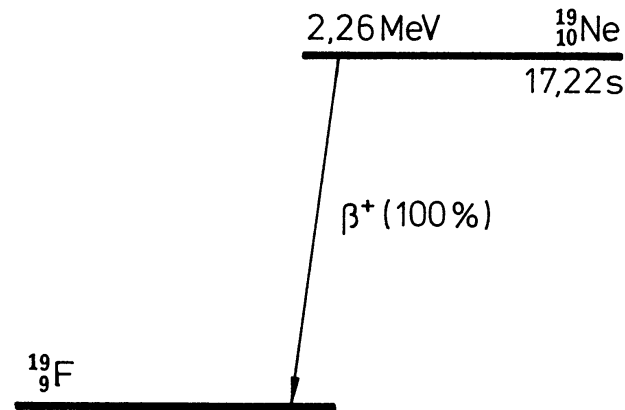


Die Verteilung der kinetischen Energien der Betateilchen beim  $\beta^{-}$ -Zerfall (schematisch). Die Zerfallsenergie  $E_{\max}$  verteilt sich auf die Antineutrinos und die Elektronen. Das Maximum des Energiespektrums der Betateilchen liegt etwa bei einem Drittel der beim Zerfall verfügbaren Energie.

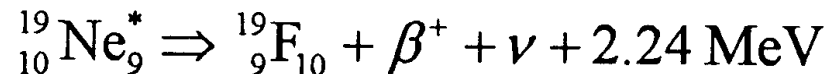
## Beta<sup>+</sup> - Zerfall

$$p \Rightarrow n + \beta^+ + \nu + \text{Energie}$$

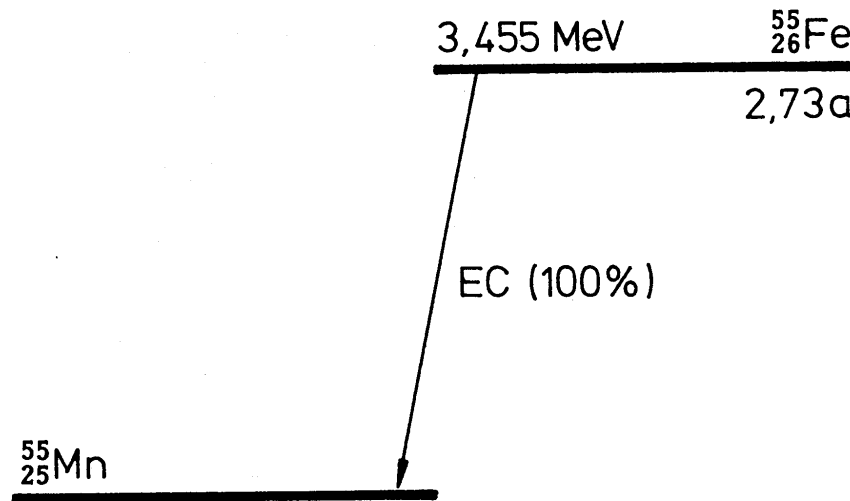
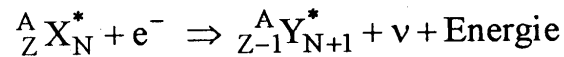
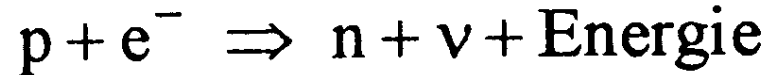
$${}^A_Z X_N^* \Rightarrow {}^A_{Z-1} Y_{N+1}^* + \beta^+ + \nu + \text{Energie}$$



Zerfallsschema des Ne-19, das über einen Positronenzerfall zu fast 100% direkt in den Grundzustand des F-19 zerfällt. Die Halbwertszeit beträgt 17.22 s, die maximale Betaenergie 2.26 MeV.

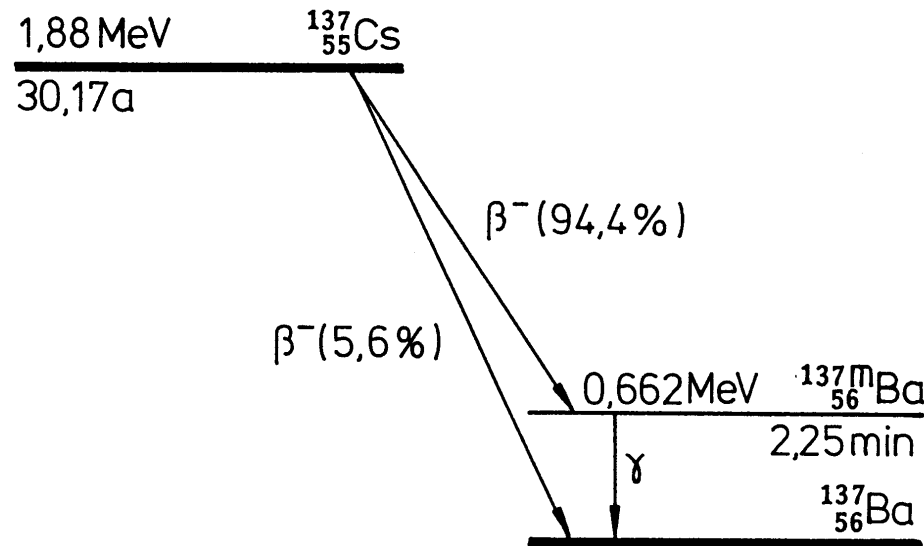
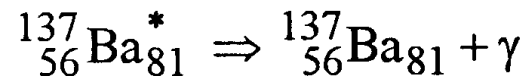
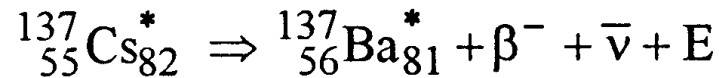


## Elektronen-Einfang (EC)



- 1 Zerfallsschema des Elektroneneinfanges am Eisen-55. Fe-55 zerfällt zu 100% in den Grundzustand des Mangan-55. Die Halbwertszeit ist 2.73 a, die Zerfallsenergie beträgt 3.455 MeV.

## Gamma-Zerfall



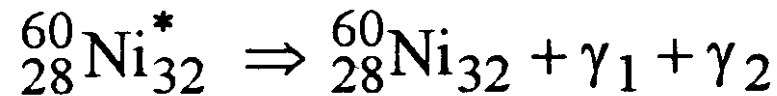
Zerfallsschema des Cs-137. Die Halbwertszeit des Betazerfalls beträgt 30.17 a, die Zerfallsenergien sind 1.18 und 0.51 MeV. Die Halbwertszeit des Ba-137m-Zerfalls ist 2.55 min. Die Gammaenergie beträgt 0.662 MeV.

## Metastabile Isomere

Isomere angeregte Kernzustände treten immer dann auf, wenn das angeregte Nuklid beim Übergang in niedrigere Energiezustände komplizierte Umwandlungsprozesse seiner Nukleonenkonfigurationen durchlaufen muss und die zur Verfügung stehende Energiedifferenz im Vergleich zur Bindungsenergie des Nuklids gering ist. Die mittlere Zeit, die für diese Neuordnung der Nukleonen benötigt wird, bestimmt die Lebensdauer der metastabilen Niveaus.



## Gamma-Zerfall



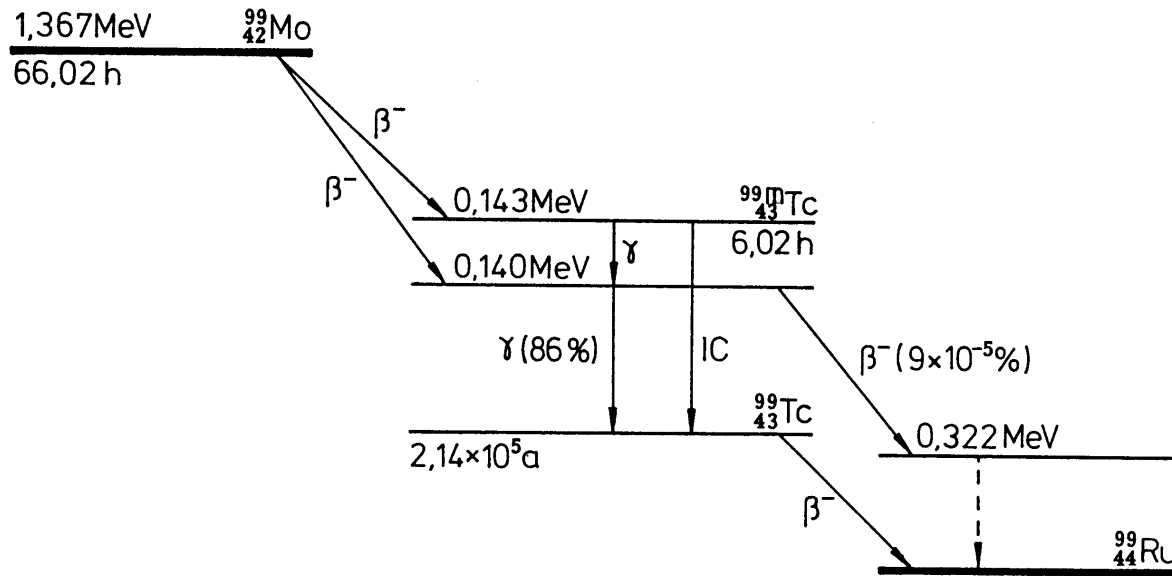


## Innere Konversion (IC)

In Konkurrenz mit dem Gamma-Zerfall kann ein Atomkern seine überschüssige Energie auch ohne Photonenemission abgeben, indem er die Anregungsenergie unmittelbar auf ein Elektron einer inneren Hüllenschale überträgt. Dieser Prozess ist vor allem an K- und L-Elektronen beobachtet worden und wird als Innere Konversion bezeichnet. Diese tritt vor allem bei Kernen mit hohen Kernladungen auf, da bei solchen Kernen durch die starke Coulomb-Anziehung die inneren Elektronenbahnen dicht an der Kernoberfläche verlaufen. Durch die Innere Konversion ändert sich die Nukleonenzusammensetzung des Kernes nicht. Der Mutterkern verliert lediglich Anregungsenergie und ändert dadurch seinen Massendefekt.

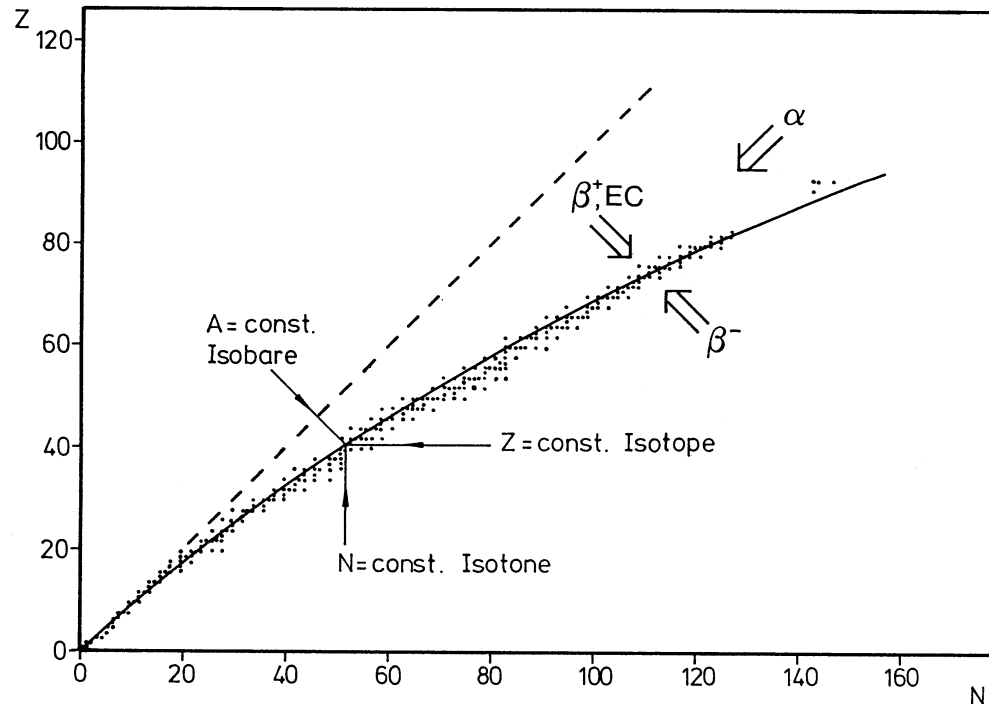


## Innere Konversion (IC)



Vereinfachtes Zerfallsschema des Molybdän-99. Es zerfällt mit 66.02 h Halbwertszeit in angeregte Zustände des Technetium-99. Die Betaübergänge bevölkern zu etwa 14% den Grundzustand des  $^{99}\text{Tc}$  und zu ca. 86% den metastabilen Zustand  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ . Dieser hat eine Anregungsenergie von 143 keV und zerfällt über einen Zwischenzustand durch Gammaemission und Innere Konversion mit einer Halbwertszeit von 6.02 h in den instabilen Grundzustand des  $^{99}\text{Tc}$  (Halbwertszeit 214000 a,  $\beta^-$ -Zerfall in Ruthenium-99).

## Kernveränderungen durch Zerfälle



Schematisches N-Z-Diagramm der Atomkerne (Nuklidtafel). Die Pfeile markieren die Verschiebungen der Kerne bei den verschiedenen Zerfallsarten (s. Text).  $Z$ : Zahl der Protonen (Ordnungszahl),  $N$ : Neutronenzahl, Punkte: natürliche Atomkerne. Alle Atomkerne mit Ordnungszahlen oberhalb von  $Z = 92$  sind künstlich erzeugt. Isotope: Atomkerne mit konstanter Ordnungszahl  $Z$ , Isotone: Atomkerne mit konstanter Neutronenzahl  $N$ , Isobare: Atomkerne mit konstanter Massenzahl  $A$ . Die breiten Pfeile deuten die radioaktiven Umwandlungen in Richtung "Stabilitätstal", dem Bereich minimaler Bindungsenergie, an (s. Text).

## Atomkerngruppen

<b>Isobare</b>	Nuklide mit gleicher Massenzahl ( $A=N+Z=\text{const}$ , z.B. $^{14}\text{C}$ , $^{14}\text{N}$ , $^{14}\text{O}$ ).
<b>Isomere</b>	Nuklide mit gleicher Massen- und Kernladungszahl, aber verschiedenem Anregungszustand. Im engeren Wortsinn werden als Isomere solche Atome bezeichnet, die sich in einem angeregten, metastabilen Kernzustand oberhalb des Grundzustandes befinden und dort während einer mittleren Lebensdauer verbleiben. Eine verbindliche Grenze der Lebensdauer, bei deren Überschreiten ein Zustand als metastabil oder isomer bezeichnet wird, lässt sich nicht angeben. In der praktischen Kernphysik wird man von metastabilen Radionukliden sprechen, wenn diese auf Grund ihrer Lebensdauer eigenständig in Erscheinung treten (z. B. $^{137\text{m}}\text{Ba}$ , $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ).
<b>Isotone</b>	Nuklide mit gleicher Neutronenzahl ( $N=\text{const}$ , z.B. $^{18}\text{O}$ , $^{19}\text{F}$ , $^{20}\text{Ne}$ ).
<b>Isotope</b>	Nuklide mit gleicher Protonenzahl ( $Z=\text{const}$ , z.B. $^{25}\text{Mg}$ , $^{24}\text{Mg}$ , $^{23}\text{Mg}$ ).

## Beschreibung einer radioaktiven Quelle

---

- Isotop
- Zerfallsschema
- Aktivität
- Halbwertszeit
- Bauart



## Aktivität

$$A = \langle dN / dt \rangle$$

$$1 \text{ Becquerel} = 1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$$

$$1 \text{ Curie} = 1 \text{ Ci} = 3.70 \cdot 10^{10} \text{ Bq} = 37 \text{ GBq}$$



## Zerfallsgesetz

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N$$

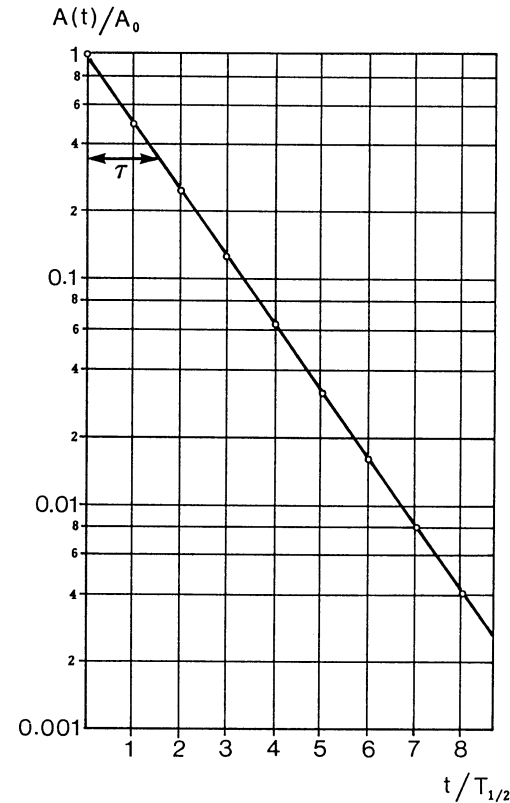
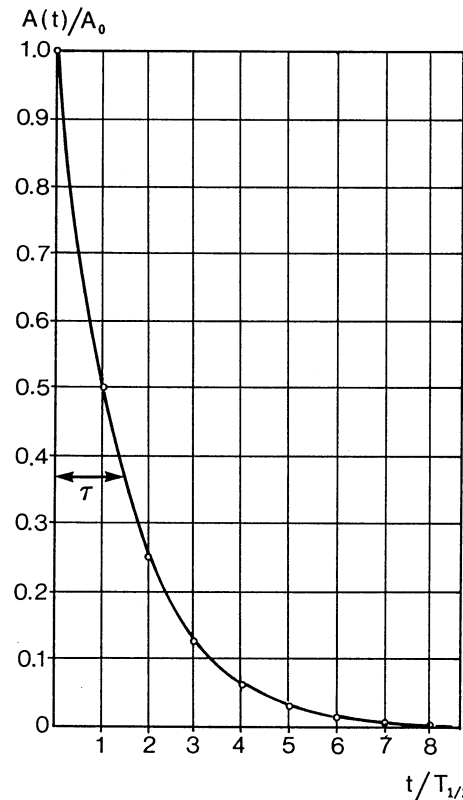
$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N$$

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$



## Zerfallsgesetz



Darstellung des exponentiellen Zeitgesetzes für den radioaktiven Zerfall als Funktion der Zeit in Einheiten der Halbwertszeit (nach Gl. 3.55). Links: doppeltlineare Darstellung, rechts: halblogarithmische Darstellung. Beide Kurven sind universell für beliebige Nuklide verwendbar, da die Zeiten in Einheiten der Halbwertszeit aufgetragen sind. Aktivitäten für Zwischenzeiten können grafisch interpoliert werden.



## Halbwertszeit bzw. Lebensdauer

$$\ln\left(\frac{A(t)}{A_0}\right) = -\lambda \cdot t$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{\ln 2}$$



## Halbwertszeit bzw. Lebensdauer

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = A_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2 \cdot t}{T_{1/2}}}$$

Zeit (n · T <sub>1/2</sub> )	Aktivität (2 <sup>-n</sup> )	prozentuale Restaktivität
0	1	100%
1	1/2	50%
2	1/4	25%
3	1/8	12.5% ≈ 10%
4	1/16	6.25%
5	1/32	3%
6	1/64	1.5% ≈ 1%
7	1/128	0.7%
8	1/256	0.4%
9	1/512	0.2%
10	1/1024	0.1% ≈ 1 Promille

Abnahme der Restaktivität mit der Anzahl n der Halbwertszeiten (nach Gl. 3.58). Näherungsweise gelten folgende Faustregeln: nach 3 Halbwertszeiten verbleiben 10%, nach 6 Halbwertszeiten 1% und nach 10 Halbwertszeiten 1 Promille der Anfangsaktivität.





# **Radioaktive Strahlenquellen in der Medizin**

**Dr. R. Mini**