
Grundlagen der Physik

Atom- und Kernphysik



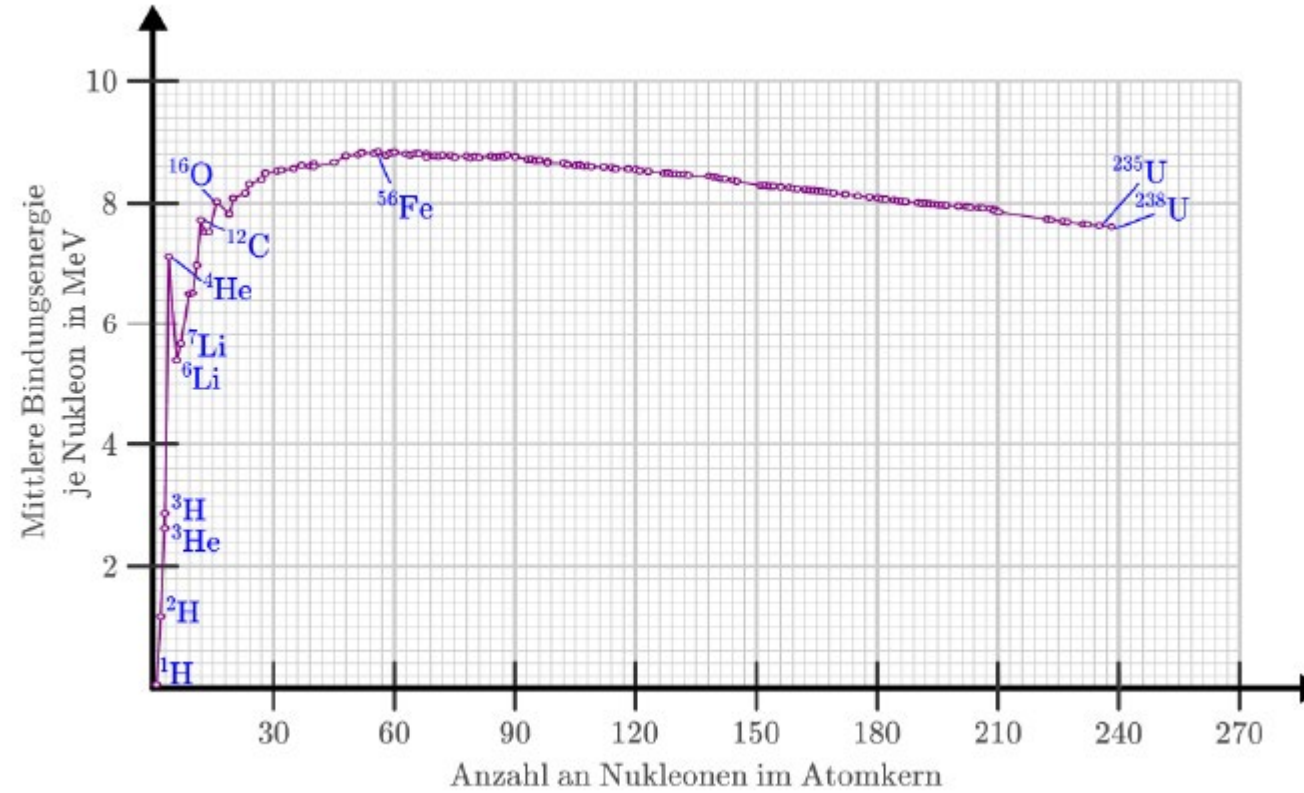
Als Radioaktivität bezeichnet man die Eigenschaft von bestimmten Nukliden, sich ohne äußere Einwirkung in ein neues Nuklid (oder mehrere neue Nuklide) umzuwandeln; dabei wird Strahlung freigesetzt.



Stabilität von Atomkernen

Große Atomkerne mit mehr Nukleonen haben mehr Teilchen im Kerninneren als kleine Kerne, die fast nur Außen-Nukleonen aufweisen. Damit haben die Nukleonen großer Kerne durchschnittlich auch mehr Nachbar-Nukleonen, zwischen denen anziehende Kernkräfte wirken. Dadurch nimmt zunächst mit einer steigenden Anzahl an Nukleonen auch die Bindungsenergie je Nukleon zu, wie in der folgenden Abbildung zu sehen ist:

Stabilität von Atomkernen



Mittlere Bindungsenergie je Nukleon in MeV.



Stabilität von Atomkernen

Die am Anfang der Bindungsenergie-Kurve deutlich vorhandenen Zacken deuten darauf hin, dass auch der Atomkern eine „Schalenstruktur“ hat: Kerne mit abgeschlossenen Schalen haben besonders hohe Bindungsenergien.

Mit einer steigenden Anzahl an Protonen nehmen allerdings auch die abstoßenden *elektrostatischen Kräfte* im Kern zu; diese sind nicht auf die jeweils unmittelbaren Nachbar-Nukleonen begrenzt, sondern nehmen nur langsam gemäß $F_C \propto \frac{1}{r^2}$ ab. Ab dem Element Eisen (Fe, Kernladungszahl 26) nimmt die Bindungsenergie je Nukleon, und damit auch die Stabilität des Atomkerns ab. Ab dem Element Blei (Pb, Kernladungszahl 82) führt dies schließlich dazu, dass die Kerne instabil werden.¹

¹ Die elektrostatische Abstoßung der Protonen ist ebenfalls der Grund dafür, dass schwere Atomkerne mehr Neutronen als Protonen besitzen; diese schirmen die abstoßenden Kräfte zum Teil ab.



Stabilität von Atomkernen

Haben bei einer Kernfusion zweier leichter Atomkerne die ursprünglichen Kerne in Summe eine höhere Bindungsenergie als der entstehende Kern, so wird bei der Fusion – ähnlich wie bei einer chemischen Reaktion – die Differenz beider Energiemengen frei; die Freisetzung der Energie bewirkt gemäß der Einsteinschen Formel $E = m \cdot c^2$ einen *Massendefekt*, so dass der bei einer Fusion entstehende Kern etwas weniger Masse besitzt als die beiden ursprünglichen Atomkerne zusammen.



Arten radioaktiver Strahlung

Alpha-Strahlung

Bei einem so genannten Alpha-Zerfall emittiert der ursprüngliche Atomkern ein so genanntes „Alpha-Teilchen“, welches dem Kern eines Helium-Atoms (${}^4_2\text{He}$) entspricht. Ein Alpha-Zerfall lässt sich somit allgemein folgendermaßen beschreiben:



Bei einem Alpha-Zerfall sinkt also die Kernladungszahl um 2, die Massezahl um 4.

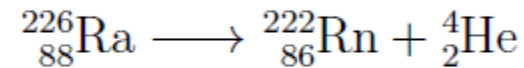


Arten radioaktiver Strahlung

Alpha-Strahlung

Beispiel:

- Der Kern eines Ra–226-Atoms (Radium) hat 88 Protonen und 138 Neutronen, insgesamt also 226 Nukleonen. Der Kern ist instabil, er zerfällt durch einen Alpha-Zerfall. Dabei entsteht ein Radon-Kern und ein Alpha-Teilchen:



Das beim Zerfall entstehende Radon Rn–222 ist ebenfalls instabil und zerfällt weiter.

Die Geschwindigkeit eines emittierten Alpha-Teilchens beträgt rund $15\,000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$; die Summe aller bei einem Zerfallsprozess emittierten Alpha-Teilchen nennt man Alpha-Strahlen.

Für die Alpha-Strahlung wird bisweilen auch α -Strahlung geschrieben.



Arten radioaktiver Strahlung

Beta-Strahlung

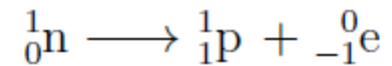
Der Begriff „Beta-Zerfall“ ist eine Sammelbezeichnung für drei mögliche radioaktive Zerfallsarten: Dem „normalen“ Beta-Minus-Zerfall, dem „Beta-Plus“-Zerfall sowie dem „Elektronen-Einfang“. Alle drei Arten werden im Folgenden kurz vorgestellt.



Arten radioaktiver Strahlung

Beta-Minus-Strahlung

Bei einem Beta-Minus-Zerfall (oder kurz: Beta-Zerfall) wird im Kern des ursprünglichen Atoms ein Neutron ${}^1_0\text{n}$ in ein Proton ${}^1_1\text{p}$ und ein Elektron ${}^0_{-1}\text{e}$ umgewandelt:



Das Proton verbleibt dabei im Kern, das Elektron wird als „Beta-Teilchen“ emittiert. Ein Beta-Minus-Zerfall lässt sich allgemein folgendermaßen beschreiben:



Arten radioaktiver Strahlung

Beta-Minus-Strahlung



Bei einem Beta-Minus-Zerfall erhöht sich also die Kernladungszahl um 1, die Massezahl bleibt unverändert.

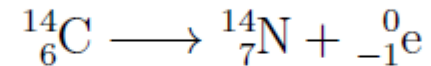


Arten radioaktiver Strahlung

Beta-Minus-Strahlung

Beispiel:

- Der Kern eines C-14-Atoms (Kohlenstoff) hat 6 Protonen und 8 Neutronen, insgesamt also 14 Nukleonen. Der Kern ist instabil, er zerfällt durch einen Beta-Minus-Zerfall. Dabei entsteht ein Stickstoff-Kern und ein Beta-Teilchen:



Der beim Zerfall entstehende Stickstoff N-14 ist stabil.

Die Geschwindigkeit eines emittierten Beta-Teilchens kann zwischen Null und beinahe Lichtgeschwindigkeit betragen; die Summe aller bei einem Zerfallsprozess emittierten Beta-Teilchen nennt man Beta-Minus-Strahlen.

Für die Beta-Minus-Strahlung wird bisweilen auch β^- -Strahlung geschrieben.

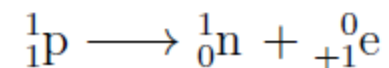


Arten radioaktiver Strahlung

Beta-Plus-Strahlung

Bei künstlich hergestellten Radionukliden kann eine Strahlung auftreten, bei der Teilchen emittiert werden, deren Masse mit der eines Elektrons übereinstimmt, deren elektrische Ladung jedoch positiv ist. Derartige Teilchen werden „Positronen“ oder β^+ -Teilchen genannt, die entsprechende Strahlung als „Positronstrahlung“ oder β^+ -Strahlung bezeichnet.

Bei einem Beta-Plus-Zerfall wird im Kern des ursprünglichen Atoms ein Proton in ein Neutron und ein Positron umgewandelt:





Arten radioaktiver Strahlung

Beta-Plus-Strahlung

Das Neutron verbleibt dabei im Kern, das Positron wird als „Beta-Plus-Teilchen“ emittiert. Ein Beta-Plus-Zerfall lässt sich also allgemein folgendermaßen beschreiben:



Bei einem Beta-Plus-Zerfall verringert sich also die Kernladungszahl um 1, die Massezahl bleibt unverändert.

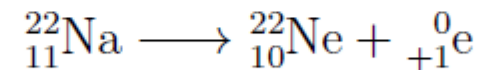


Arten radioaktiver Strahlung

Beta-Plus-Strahlung

Beispiel:

- Der Kern eines Na–22-Atoms (Natrium) hat 11 Protonen und 11 Neutronen, insgesamt also 22 Nukleonen. Der Kern ist instabil, er zerfällt durch einen Beta-Plus-Zerfall. Dabei entsteht ein Neon-Kern und ein Positron:



Das beim Zerfall entstehende Neon Ne–22 ist stabil.

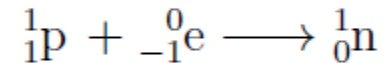
Für die Beta-Plus-Strahlung wird bisweilen auch β^+ -Strahlung geschrieben.



Arten radioaktiver Strahlung

Elektronen-Einfang

Sowohl bei natürlich vorkommenden wie auch bei künstlich hergestellten Radionukliden ist eine weitere Umwandlungsart möglich: Fängt der Kern ein Elektron von der innersten Schale der Elektronenhülle ein, so kann sich im Kern ein Proton gemeinsam mit diesem Elektron in ein Neutron umwandeln:



Ein Elektronen-Einfang lässt sich also allgemein folgendermaßen beschreiben:





Arten radioaktiver Strahlung

Elektronen-Einfang

Bei einem Elektronen-Einfang verringert sich also die Kernladungszahl um 1, die Massenzahl bleibt unverändert. Ein Elektronen-Einfang führt also zum gleichen Ergebnis wie die Emission eines Positrons.

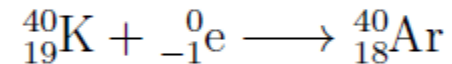


Arten radioaktiver Strahlung

Elektronen-Einfang

Beispiel:

- Der Kern eines K–40-Atoms (Kalium) hat 19 Protonen und 21 Neutronen, insgesamt also 40 Nukleonen. Der Kern ist instabil, er kann durch einen Elektronen-Einfang zerfallen (aber auch durch einen β^- - oder β^+ -Zerfall). Beim Elektronen-Einfang entsteht ein Argon-Kern:



Das beim Zerfall entstehende Argon Ar–40 ist stabil.

Der Platz in der innersten Elektronenschale, der beim Elektronen-Einfang frei wird, wird durch ein Elektron aus dem äußeren Teil der Elektronenhülle des jeweiligen Atoms wieder aufgefüllt. Dabei entsteht eine für den jeweiligen Zerfall charakteristische Gamma-Strahlung.



Arten radioaktiver Strahlung

Gamma-Strahlung

Gammastrahlung entsteht, wenn Atomkerne energiereiche Lichtquanten (so genannte „Gamma-Quanten“) aussenden; dabei ändert sich weder die Massenzahl A noch die Kernladungszahl Z des Atomkerns. Gammastrahlen entstehen vielmehr durch einen Übergang eines Atomkerns von einem energetisch angeregten Zustand in einen energetisch niedrigeren Zustand. So entsteht bei Alpha- und Beta-Zerfällen häufig zusätzlich Gamma-Strahlung.



Halbwertszeit und Aktivität

Für einen einzelnen Atomkern lässt sich keine Aussage darüber treffen, zu welchem Zeitpunkt er zerfallen wird: Er kann in der nächsten Sekunde oder erst in Tausenden von Jahren zerfallen.

Für eine große Anzahl an Atomkernen hingegen kann man eine Wahrscheinlichkeits-Aussage über den Ablauf des Zerfalls treffen. Die Zeit, nach der die Hälfte einer bestimmten Anzahl an Atomkernen zerfallen ist, wird Halbwertszeit genannt. Für jedes Radionuklid ist diese Zeit eine charakteristische Größe; je nach Element reichen die Halbwertszeiten von nur wenigen Sekunden bis hin zu Millionen von Jahren.



Halbwertszeit und Aktivität

Für einen einzelnen Atomkern lässt sich keine Aussage darüber treffen, zu welchem Zeitpunkt er zerfallen wird: Er kann in der nächsten Sekunde oder erst in Tausenden von Jahren zerfallen.

Für eine große Anzahl an Atomkernen hingegen kann man eine Wahrscheinlichkeits-Aussage über den Ablauf des Zerfalls treffen. Die Zeit, nach der die Hälfte einer bestimmten Anzahl an Atomkernen zerfallen ist, wird Halbwertszeit genannt. Für jedes Radionuklid ist diese Zeit eine charakteristische Größe; je nach Element reichen die Halbwertszeiten von nur wenigen Sekunden bis hin zu Millionen von Jahren.

Halbwertszeit und Aktivität

Element	Symbol	Zerfallsart	Halbwertszeit
Polonium-214	${}_{84}^{214}\text{Po}$	α	$1,64 \cdot 10^{-4} \text{ s}$
Radon-220	${}_{86}^{220}\text{Rn}$	α	55,6 s
Polonium-218	${}_{84}^{218}\text{Po}$	α, β^{-}	3,05 min
Wismut-214	${}_{83}^{214}\text{Bi}$	β^{-}, α	19,9 min
Blei-214	${}_{82}^{214}\text{Pb}$	β^{-}	26,8 min
Blei-209	${}_{82}^{209}\text{Pb}$	β^{-}	3,25 h
Radon-222	${}_{86}^{222}\text{Rn}$	α	3,83 d
Radium-223	${}_{88}^{223}\text{Ra}$	α	11,43 d
Radium-225	${}_{88}^{225}\text{Ra}$	β^{-}	14,8 d
Thorium-234	${}_{90}^{234}\text{Th}$	β^{-}	24,1 d
Polonium-210	${}_{84}^{210}\text{Po}$	α	138,4 d
Wasserstoff-3	${}_{1}^{3}\text{H}$	β^{-}	12,32 a

Halbwertszeit und Aktivität

Je Halbwertszeit zerfällt die Hälfte der jeweils zu Beginn noch vorhandenen Atomkerne. Die Anzahl der radioaktiven Kerne nimmt also exponentiell (zunächst schnell, dann immer langsamer) ab. Wird die Anzahl der zu Beginn eines Zerfalls vorhandenen Radionuklide mit N_0 und die Halbwertszeit mit $T_{1/2}$ bezeichnet, so kann die Anzahl $N(t)$ an zur Zeit t noch vorhandenen Atomkernen nach folgendem „Zerfallsgesetz“ berechnet werden:

$$N(t) = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}} \quad (187)$$



Halbwertszeit und Aktivität

Nach vier Halbwertszeiten sind die Atome eines Radionuklid zu mehr als 90%, nach zehn Halbwertszeiten zu mehr als 99,9% zerfallen.

Definition:

Als Aktivität A bezeichnet man die Anzahl Δn an Kernumwandlungen, die innerhalb einer bestimmten Zeitspanne Δt stattfinden:

$$A = \frac{\Delta n}{\Delta t} \quad (188)$$

Halbwertszeit und Aktivität

Einheit:

Die Einheit der Aktivität ist nach Henry Becquerel benannt. Nach der obigen Gleichung ergibt sich für 1 Becquerel (1 Bq) folgender Zusammenhang:²

$$1 \text{ Bq} = 1 \frac{1}{\text{s}}$$

Auf natürliche Weise treten in geschlossenen Räumen je Kubikmeter Luft rund 50 Zerfälle je Sekunde auf, die Aktivität beträgt somit je Kubikmeter rund 50 Bq. In einem Gramm „natürlichem“ Uran hingegen, wie es im Bergbau abgebaut werden kann, treten rund $2,54 \cdot 10^4$ Zerfälle je Sekunde auf.



Ionendosis, Energiedosis und Äquivalentdosis

Die durch Strahlung transportierte Energie ist sehr viel kleiner als 1 Joule; man verwendet daher als Energie-Einheit das so genannte Elektronenvolt (eV). Damit bezeichnet man diejenige Energiemenge, die ein Elektron beim Durchlaufen einer Spannung von 1 V aufnimmt. Für die Umrechnung gilt:

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Gasatome beziehungsweise Gasmoleküle haben beispielsweise bei Zimmertemperatur eine Bewegungsenergie von etwa 0,04 eV.

Ionendosis, Energiedosis und Äquivalentdosis

Um bei der Ionisierung eines Wasserstoff-Atoms (H) das Elektron aus der Atomhülle abzutrennen, ist eine Energiemenge von $13,60 \text{ eV}$ erforderlich; um ein Elektron bei einem Wasserstoff-Molekül (H_2) abzutrennen, ist eine Energiemenge von $15,40 \text{ eV}$ nötig. Diese so genannte „Ionisierungsenergie“ ist bei verschiedenen Elementen für die einzelnen Elektronen der Atomhülle unterschiedlich.

Die Ionisation von Atomen ist das wichtigste Maß für die Intensität von radioaktiver Strahlung, denn diese kann nur gemessen werden, wenn Wechselwirkungen der Strahlung mit Materie stattfinden.

Ionendosis, Energiedosis und Äquivalentdosis

Definition:

Die sogenannte Ionendosis J_s gibt an, wie groß die durch Ionisierung erzeugte Ladungsmenge ΔQ im Verhältnis zur Masse Δm des durchstrahlten Materials ist:

$$J_s = \frac{\Delta Q}{\Delta m}$$

Einheit:

Die Basis-Einheit der elektrischen Ladung ist das *Coulomb*; damit ergibt sich nach der obigen Gleichung für die Einheit der Ionendosis:

$$[J_s] = \frac{\text{C}}{\text{kg}}$$