

## Radioaktive Zerfallsarten

Damit ein Nuklid radioaktiv zerfallen kann, muss die entsprechende Reaktion "exotherm" sein. Die Summe der Ruhemassen aller entstehenden Teilchen muss kleiner sein als die Masse des Mutternuklids. Die fehlende Masse wird bei der Reaktion als kinetische Energie oder als elektromagnetische Strahlung an die Umgebung abgegeben. Ein Nuklid ist stabil gegen radioaktiven Zerfall, wenn sich keine Reaktion finden lässt, die diese Bedingung erfüllt.

Folgende Zerfallsarten sind bis heute bekannt:

- $\alpha$ -Zerfall
- $\beta$ -Zerfallsarten ( $\beta^-$ ,  $\beta^+$ , EC,  $2\beta^-$ ,  $2EC$ ,  $\beta^+ + EC$ )
- $\gamma$ -Zerfall
- Spontanspaltung
- Protonenzerfallsarten
- Neutronenzerfallsarten
- Clusterzerfall
- $\beta$ -verzögerte Zerfallsarten

Für einige Zerfallsarten setzt sich die total freiwerdende Energie, die oft mit dem Buchstaben Q bezeichnet wird, aus mehreren Beiträgen zusammen.

### $\alpha$ -Zerfall

Beim  $\alpha$ -Zerfall wird ein Teilchen  ${}^4\text{He}$  ausgestossen, das auch als  $\alpha$ -Teilchen bezeichnet wird. Es weist als doppelt magischer Kern eine ausserordentliche Stabilität auf.  $\alpha$ -Zerfall zeigen neutronenarme Nuklide, vornehmlich sehr schwere. Bis heute wurde, ausser dem etwas speziellen Fall  ${}^8\text{Be}$ , kein  $\alpha$ -Zerfall für Nuklide mit einer Ordnungszahl kleiner als 52 (Tellur) nachgewiesen (Stand 2007).

Der  $\alpha$ -Zerfall wird in der Karlsruher Nuklidkarte durch eine gelbe Farbe gekennzeichnet. Die total freiwerdende Energie beim  $\alpha$ -Zerfall kann in drei Beiträge aufgespalten werden.

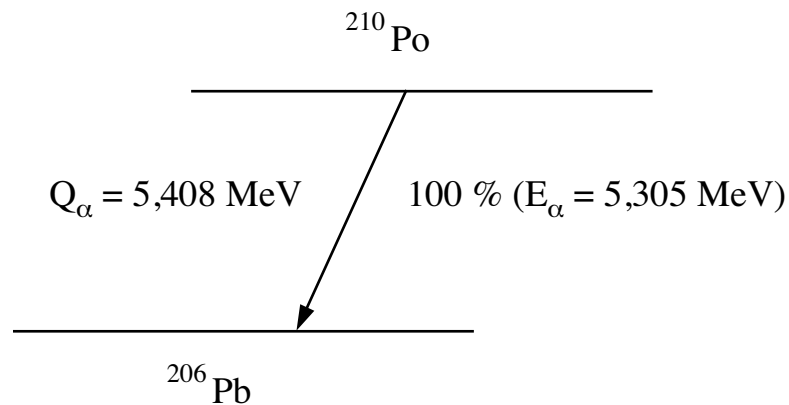
$$Q_\alpha = E_\alpha + E_R + E_A$$

Dabei bedeuten

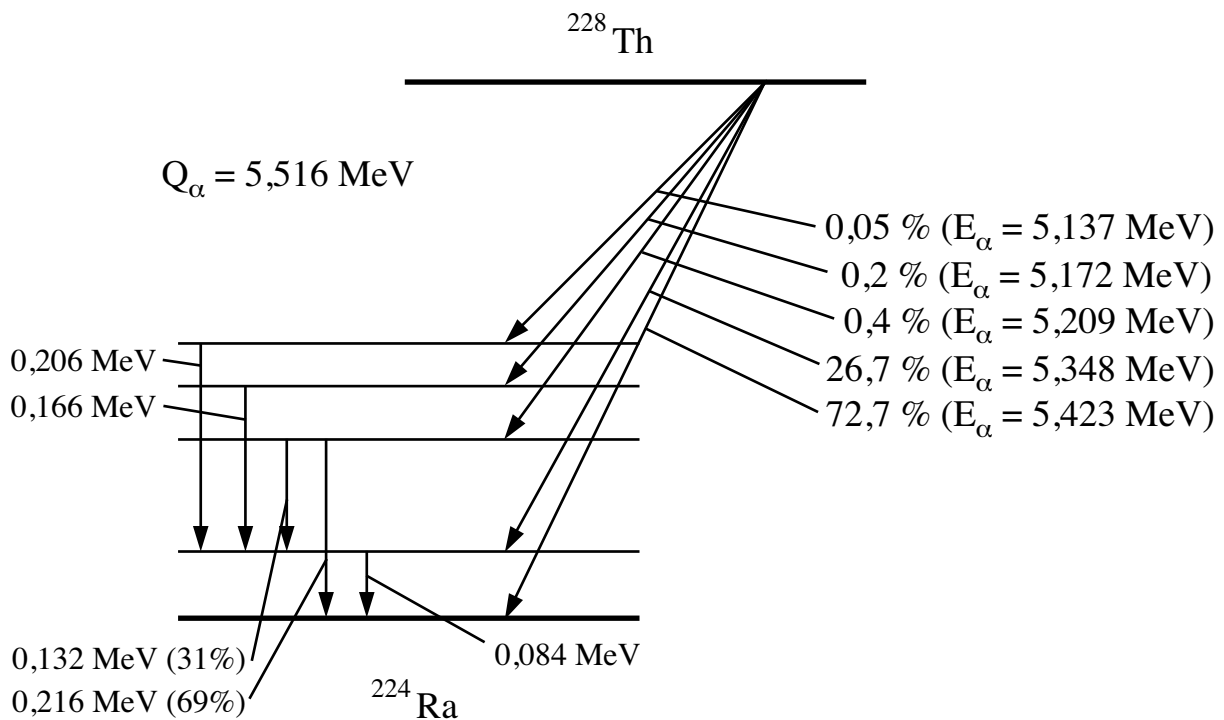
$Q_\alpha$	total freiwerdende Energie beim $\alpha$ -Zerfall
$E_\alpha$	Energie des $\alpha$ -Teilchens
$E_R$	Rückstoss-Energie des Tochterkerns
$E_A$	Anregungsenergie im Tochterkern

Den grössten Teil der Energie trägt das  $\alpha$ -Teilchen als kinetische Energie davon. Da es aber eine relativ grosse Masse hat, überträgt sich gemäss dem Impuls-Erhaltungssatz auch auf den Tochterkern eine bestimmte kinetische Energie, die oft, nicht ganz sauber, als Rückstoss-Energie bezeichnet wird. Die kinetische Energie des Tochterkerns ist so gross, dass die Reaktionsprodukte den Ort der Reaktion verlassen können. Wenn die Töchter ihrerseits instabil sind, können sie die Umgebung radioaktiv kontaminieren. Dieser Effekt wird oft vergessen, wenn Strahlenschutzmassnahmen diskutiert werden.

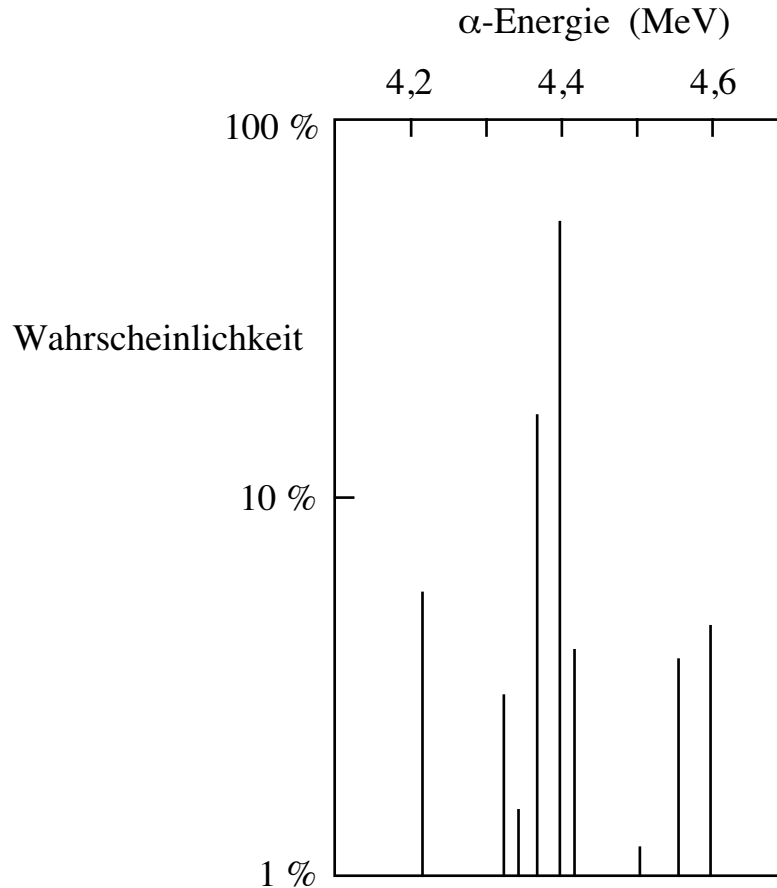
Die Anregungsenergie  $E_A$  des Tochterkerns ist für g,g-Kerne oft null, wie im folgenden Fall.



Falls sie aber vorhanden ist, wird sie durch Emission von  $\gamma$ -Quanten abgegeben. Das kann auf sehr komplexe Art geschehen, wie in folgendem Beispiel.



Wie man unschwer erkennt, ist das Spektrum der  $\alpha$ -Energien diskret, entsprechend einer oder mehrerer wohldefinierter Energiedifferenzen. Jedem Übergang ist eine Wahrscheinlichkeit zugeordnet. Das  $\alpha$ -Spektrum von  $^{235}\text{U}$  hat folgendes Aussehen:

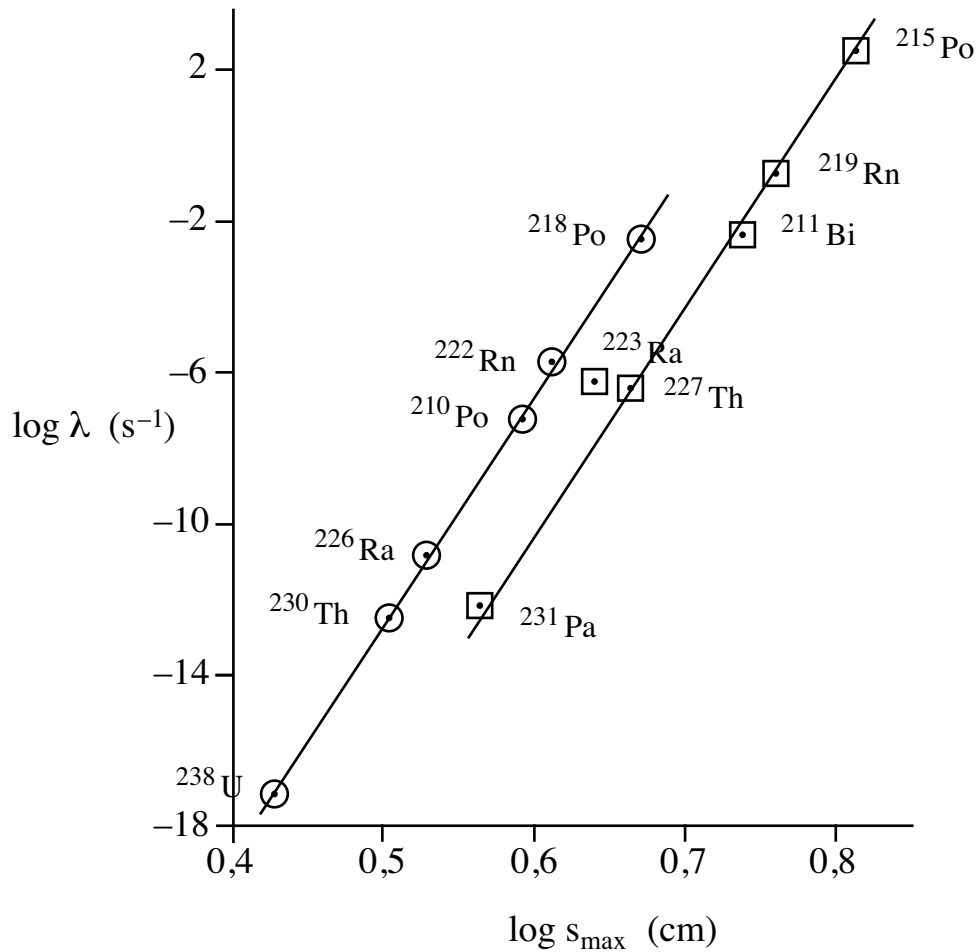


Die total freiwerdende Energie beim  $\alpha$ -Zerfall bewegt sich im Bereich zwischen 1,8 MeV ( $^{144}\text{Nd}$ ) und 12,15 MeV ( $^{270\text{m}}\text{Ds}$ ). Die Halbwertszeit bewegt sich, von  $^8\text{Be}$  abgesehen, im Bereich zwischen 53 ns ( $^{219}\text{Pa}$ ) und  $2 \cdot 10^{19}$  a ( $^{209}\text{Bi}$ ).

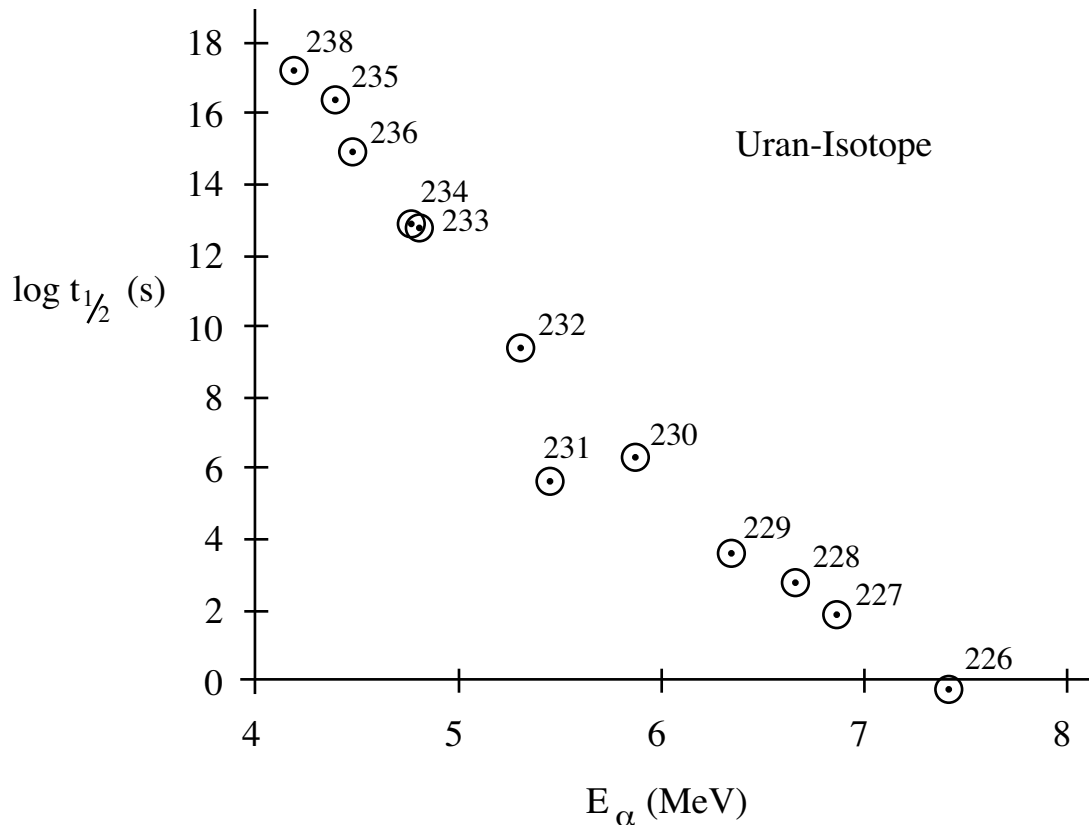
Schon sehr früh wurde empirisch ein Zusammenhang zwischen der Reichweite der  $\alpha$ -Strahlung in der Luft und der Halbwertszeit des entsprechenden Nuklids festgestellt. Je kürzer die Halbwertszeit, desto durchdringender die Strahlung. Im Jahr 1911 wurde der Zusammenhang quantitativ erfasst. Die heute unter dem Namen Geiger-Nuttall-Regel bekannte Beziehung verknüpft die Reichweite  $s_{\text{max}}$  mit der Zerfallskonstanten  $\lambda$ .

$$\log \lambda = a + b \cdot \log s_{\text{max}}$$

wobei  $b$  eine allgemeine Konstante ist und  $a$  eine Konstante innerhalb einer bestimmten Zerfallsreihe. In der folgenden Darstellung sind einige Nuklide der Uran- und Aktinium-Zerfallsreihe aufgeführt.



Die Regel wird erstaunlich gut eingehalten, nur  $^{223}\text{Ra}$  fällt etwas aus dem Rahmen. Die Reichweite der Strahlung hängt eng mit der Energie der  $\alpha$ -Teilchen zusammen. Hochenergetische Teilchen haben eine grosse Reichweite. Am wenigsten stabil scheinen also Kerne zu sein, die mit besonders grosser  $\alpha$ -Energie zerfallen. Dies bestätigt sich in der folgenden Figur, bei der für die Isotopen des Urans die Halbwertszeiten, als Mass für die Stabilität, gegen die  $\alpha$ -Energie aufgetragen sind.



Das  $\alpha$ -Teilchen muss beim Zerfall eine hohe Energiebarriere überwinden. Beim  $^{238}\text{U}$  beträgt sie ca. 9 MeV. Sie ist also wesentlich grösser als die  $\alpha$ -Energie, die für  $^{238}\text{U}$  4,2 MeV beträgt. Der  $\alpha$ -Zerfall ist nach den Gesetzen der klassischen Mechanik verboten. Die Wellenmechanik erlaubt den Zerfall dennoch. Es handelt sich um einen Tunnelprozess. Je grösser die  $\alpha$ -Energie beim Zerfall ist, desto grösser ist die Wahrscheinlichkeit für das Untertunneln der Potentialbarriere. Ein  $\alpha$ -Zerfall wird nicht beobachtet, wenn die freiwerdende Energie den Wert von 2 MeV wesentlich unterschreitet.

## $\beta$ -Zerfall

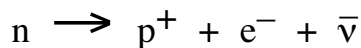
Im Jahr 1914 wurde entdeckt, dass Kerne Elektronen ( $\beta$ -Teilchen) aussenden können. Dabei erhöht sich die Ordnungszahl um eins. Obwohl sich Mutter- und Tochter-Kern in definierten Energiezuständen befinden, ist das Energiespektrum der Elektronen kontinuierlich, was im Widerspruch zum Erhaltungssatz der Energie steht. Zusätzlich sollte man beim Übergang von der Mutter zur Tochter eine Änderung der Spinquantenzahl erwarten, weil das Elektron eine Spinquantenzahl von  $1/2$  hat. Dies ist aber nicht der Fall. Der Satz von der Erhaltung des Spins scheint ebenfalls verletzt. Es drängte sich die Vermutung auf, ein weiteres Teilchen sei am  $\beta$ -Zerfall beteiligt, das aber noch nicht nachgewiesen war. Wolfgang Pauli postulierte im Jahr 1930 die Existenz eines solchen Teilchens. Es hat heute den Namen Neutrino  $\nu$  resp. Antineutrino  $\bar{\nu}$ , und wurde erstmals 1956 experimentell nachgewiesen. Das Neutrino spürt ausschliesslich die schwache Wechselwirkung, die 1934 von Enrico Fermi ansatzweise in einem Modell des  $\beta$ -Zerfalls formuliert wurde. Neutrinos wechselwirken fast nicht mit Materie und sind daher nur äusserst schwer nachzuweisen.

$\beta^-$ -Zerfälle haben Halbwertszeiten von 1,5 ms ( $^{35}\text{Na}$ ) und  $7,2 \cdot 10^{24}$  a ( $^{128}\text{Te}$ ). Die Energien reichen von 2,6 keV ( $^{187}\text{Re}$ ) bis 20,4 MeV ( $^{11}\text{Li}$ ).

Es gibt mehrere Arten von  $\beta^-$ -Zerfall.

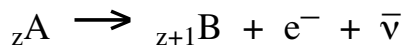
### $\beta^-$ -Zerfall

Innerhalb eines Kerns wandelt sich ein Neutron formal in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino um.



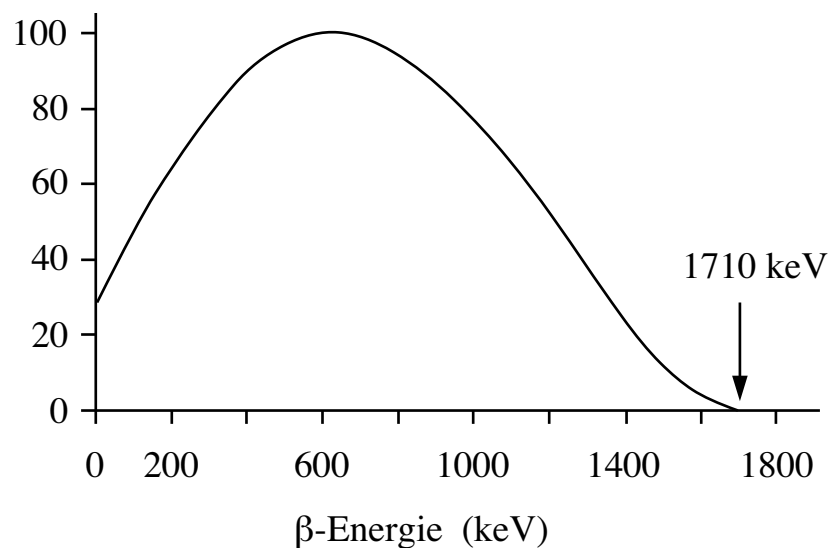
Der  $\beta^-$ -Zerfall wird in der Karlsruher Nuklidkarte durch eine blaue Farbe gekennzeichnet.

Der  $\beta^-$ -Zerfall ist nicht auf bestimmte Ordnungszahl-Bereiche beschränkt. Alle Kerne mit Neutronenüberschuss sind potentielle  $\beta^-$ -Strahler. Die bekanntesten Vertreter sind  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{35}\text{S}$  und  $^{90}\text{Sr}$ . Häufig ist der Tochterkern in einem angeregten Zustand. Die Abregung erfolgt meist durch Emission von  $\gamma$ -Quanten. Aufgrund der Energiebilanz ist der  $\beta^-$ -Zerfall möglich, wenn für die Reaktion



$(m_{\text{A}} - m_{\text{B}}) c^2$  positiv ist. Dabei ist  $m$  die Nuklidmasse (Kern + Elektronen).

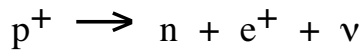
Die Energieverteilung der Elektronen ist kontinuierlich. Die Summe von Elektron- und Antineutrino-Energie ist konstant. Als Beispiel wird hier die Energieverteilung der  $\beta^-$ -Teilchen für das Nuklid  $^{32}\text{P}$  wiedergegeben.



Die grösste mögliche Energie, die das  $\beta^-$ -Teilchen mitbekommen kann, ist die gesamte, beim Zerfall freiwerdende Energie  $E_{\text{max}}$ , die im Fall von  $^{32}\text{P}$  1710 keV beträgt.

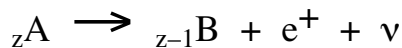
## $\beta^+$ -Zerfall

Innerhalb eines Kerns wandelt sich ein Proton formal in ein Neutron, ein Positron und ein Neutrino um.



Der  $\beta^+$ -Zerfall wird in der Karlsruher Nuklidkarte durch eine rote Farbe gekennzeichnet.

Aufgrund der Energiebilanz ist der  $\beta^+$ -Zerfall möglich, wenn für die Reaktion

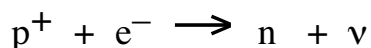


$(m_A - m_B - m_{e^+} - m_{e^-}) c^2$  positiv ist. Die Massen von Positron und Elektron sind gleich. Sie entsprechen je 511 keV.

Die abgestrahlten Positronen haben eine sehr kurze Lebensdauer. Nachdem sie durch Stöße den grössten Teil ihrer kinetischen Energie an die Umgebung verloren haben, treffen sie schnell auf ein Elektron und zerstrahlen. Dabei entstehen zwei  $\gamma$ -Quanten mit je 511 keV Energie, die in einem Winkel von nahezu  $180^\circ$  auseinanderfliegen. Dies ist notwendigerweise so, weil die Erhaltungssätze für Energie und Impuls simultan eingehalten werden müssen.

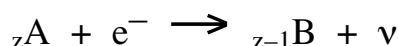
## EC-Zerfall

EC steht für "electron capture" oder Elektronen-Einfang. Die Elektronendichte der Atomhüllen-Elektronen ist im Kern von null verschieden. Dadurch ist es möglich, dass innerhalb des Kerns ein Proton durch Elektronen-Einfang in ein Neutron und ein Neutrino umgewandelt wird.



Der EC-Zerfall wird in der Karlsruher Nuklidkarte wie der  $\beta^+$ -Zerfall durch eine rote Farbe gekennzeichnet.

Aufgrund der Energiebilanz ist der EC-Zerfall möglich, wenn für die Reaktion



$(m_A - m_B) c^2$  positiv ist. Wie man sieht, ist für  $0 < (m_A - m_B) c^2 < 1,02 \text{ MeV}$  nur der EC-Zerfall, nicht aber der  $\beta^+$ -Zerfall möglich. Ein Beispiel ist der Kern  ${}^{55}\text{Fe}$ , der ohne Elektronenhülle stabil wäre. Ganz allgemein lässt sich sagen, dass bei steigender Energiedifferenz der Anteil des  $\beta^+$ -Zerfalls ansteigt. Für eine feste Energiedifferenz nimmt mit steigender Ordnungszahl der Anteil an EC-Zerfall zu. Dies ist verständlich, wenn man bedenkt, dass der Aufenthaltsraum der innersten Hüllen-Elektronen mit zuneh-

mender Ordnungszahl kleiner wird. Dadurch steigt die Wahrscheinlichkeit, dass sich das Elektron zu einem gegebenen Zeitpunkt im Kern befindet.

Das eingefangene Elektron stammt meist aus der K-Schale, ist also ein 1s-Elektron. Das entstehende Loch in der Elektronenhülle wird aufgefüllt, indem ein Elektron aus einer höheren Schale in die K-Schale hinunterfällt. Die dabei freiwerdende Energie wird als Röntgen-Quant abgestrahlt. Das Elektron stammt meist aus der L-Schale. Die dabei entstehende Lücke wird wiederum durch ein Elektron aus einer noch höheren Schale aufgefüllt. Meist ist eine ganze Kaskade von Elektronensprüngen nötig, um die Lücke zu schliessen. Dabei wird ein charakteristisches Spektrum von Röntgen-Quanten abgestrahlt. Bei sehr schweren Kernen haben die Elektronen der K-Schale eine sehr hohe Bindungsenergie. Es kann dann vorkommen, etwa bei  $^{242}\text{Am}$ , dass der Einfang eines K-Elektrons nicht möglich ist, weil die Energiebilanz dies nicht zulässt. In diesen Fällen stammt das Elektron ausschliesslich aus höheren Schalen.

Es kann vorkommen, dass ein Röntgen-Quant ein Elektron in der Atomhülle trifft und hinausschleudert. Dieses Phänomen wird als innerer Photoeffekt bezeichnet. Die so produzierten Elektronen haben eine feste Energie (Röntgen-Quant minus Bindungsenergie) und heissen Auger-Elektronen.

## **$2\beta^-$ -Zerfall**

In sehr seltenen Fällen kommt es vor, dass ein Kern gleichzeitig zwei Elektronen und zwei Antineutrinos aussendet. Das Phänomen wurde ausschliesslich bei g,g-Nukliden festgestellt, bei denen der gewöhnliche  $\beta^-$ -Zerfall zu einem u,u-Tochternuklid höherer Energie führen würde. Es ist zu vermuten, dass der doppelte  $\beta^-$ -Zerfall bei vielen g,g-Kernen auftreten kann. Er lässt sich wegen seiner ausserordentlichen Seltenheit aber nur bei Nukliden feststellen, die nicht anderweitig zerfallen können. Der kürzestlebige, gegenwärtig (2006) bekannte  $2\beta^-$ -Strahler ist  $^{130}\text{Te}$  mit  $2,7 \cdot 10^{21}$  a Halbwertszeit.

Seit dem Jahr 2002 wird auch diskutiert, ob es einen doppelten Betazerfall ohne gleichzeitige Aussendung von Antineutrinos gibt. Diese Zerfallsart würde ein wichtiges Prinzip der Teilchenphysik verletzen, wonach bei Teilchenreaktionen grundsätzlich gleichviele Leptonen wie Antileptonen entstehen. Die experimentellen Ergebnisse sind unklar.

## **Weitere doppelte Zerfälle**

Es wurde auch der doppelte Elektroneneinfang  $2\text{EC}$  unter Abstrahlung von zwei Antineutrinos beobachtet. weitere doppelte Zerfälle wie  $\beta^-, \text{EC}$  oder  $\beta^+, \text{EC}$  werden untersucht. Das Gebiet ist in Entwicklung. Weitere Zerfallsarten dürften noch entdeckt werden.



## Parallele Emission von $\gamma$ -Quanten oder Konversionselektronen

Nach dem  $\beta$ -Zerfall oder auch dem  $\alpha$ -Zerfall befindet sich der Tochterkern häufig in einem angeregten Zustand. Innerhalb von  $10^{-16}$  s bis  $10^{-13}$  s wird im Allgemeinen der Grundzustand erreicht. Die dabei freiwerdende Energie kann als  $\gamma$ -Quant abgestrahlt werden. Dabei kann es vorkommen, dass das  $\gamma$ -Quant ein Hüllenelektron trifft und wegkatapultiert. Also können auch auf diese Art Auger-Elektronen entstehen.

Es gibt aber noch eine andere Art der Abregung. Da die Elektronendichte der Hüllenelektronen im Kern nicht null ist, kann die Energie auf ein Hüllenelektron übertragen werden, das dann mit grosser Geschwindigkeit ausgestossen wird. Man nennt solche Elektronen Konversionselektronen. Der Begriff "Konversion" stammt noch aus Zeiten, in denen irrtümlicherweise angenommen wurde, ein  $\gamma$ -Quant werde über den Mechanismus des inneren Photoeffekts in ein Auger-Elektron "konvertiert". Auch dieser Vorgang ist bekannt, wie oben schon erwähnt, aber die beiden Vorgänge sind völlig unabhängig voneinander. Ein nackter Kern kann sich nur durch  $\gamma$ -Emission abregen. Hat der Kern noch eine Elektronenhülle, kann er sich zusätzlich durch Ausstoss von Konversionselektronen abregen. Es gibt Fälle, bei denen die  $\gamma$ -Emission aufgrund quantenmechanischer Auswahlregeln nicht möglich ist. Solche Kerne können sich ausschliesslich durch Konversionselektronen abregen. Ein nackter  $^{72m}\text{Ge}$ -Kern, wenn man ihn herstellen könnte, wäre stabil.

Konversionselektronen haben eine feste Energie (Kern-Abregungsenergie minus Ionisationsenergie). Nach dem Ausstoss des Elektrons verbleibt eine Lücke in der Elektronenhülle. Dabei werden ähnliche Phänomene beobachtet wie beim EC-Zerfall.

## Shake-off

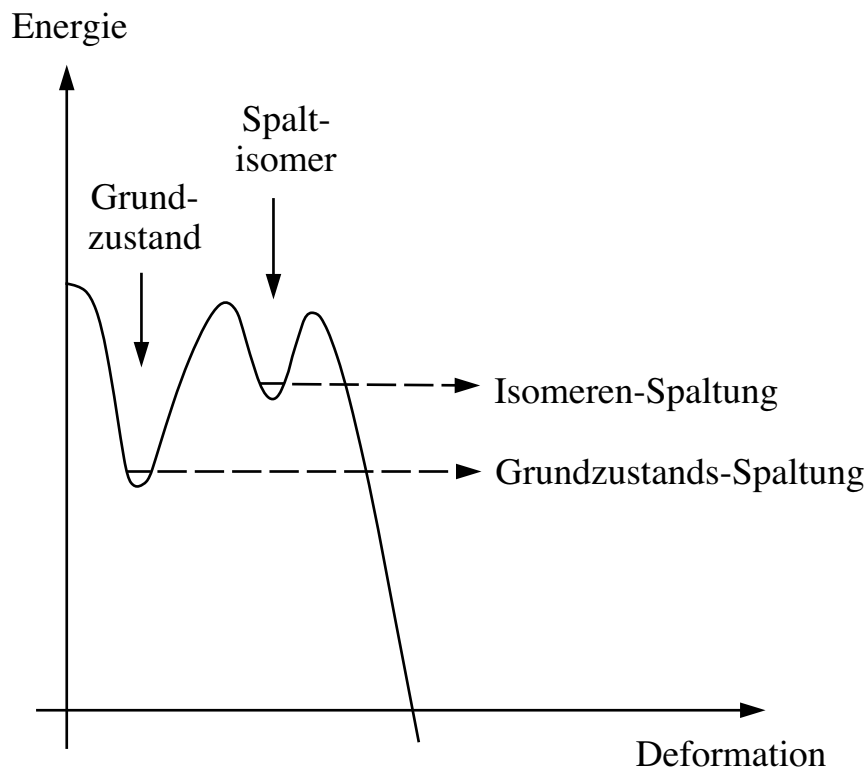
Falls beim Zerfallsvorgang die Ordnungszahl des Kerns ansteigt, sind die Hüllenelektronen nach dem Zerfall stärker gebunden als vorher. Die Energiedifferenz wird in irgendeiner Weise an die Umgebung abgegeben. Sie beträgt pro Ladungseinheit etwa  $22,8 \text{ eV} \cdot Z^{0,4}$ . Meist hat das nur eine kleine Korrektur der Zerfallsenergie zur Folge. Es kann aber vorkommen, dass bei der Neuordnung der Elektronenhülle die äussersten Elektronen ausgestossen werden. Im Fall von  $^{23}\text{Ne}$ , das zu  $^{23}\text{Na}$  zerfällt, findet man in 71,9 % der Fälle eine positive Ladung auf dem Tochternuklid. Das entspricht dem Ausstoss des Elektrons beim  $\beta^-$ -Zerfall, also wurde kein zusätzliches Elektron aus der Hülle abgestossen. In 17,5 % der Fälle hingegen findet man die Ladung 2+ auf dem Reaktionsprodukt. In 2,85 % der Fälle eine Ladung von 3+ etc. Man hat Ladungen bis 6+ gemessen. Sehr ähnliche Effekte wurden beim  $\beta^-$ -Zerfall von  $^{39}\text{Ar}$  zu  $^{39}\text{K}$  beobachtet, ebenso von  $^{41}\text{Ar}$  zu  $^{41}\text{K}$ . Es handelt sich also um Effekte, die durch die atomaren Eigenschaften bestimmt sind. Edelgasatome reagieren alle ähnlich. Die Eigenschaften des Kerns sind kaum von Bedeutung.

## Spontanspaltung

Flerov und Petrzhak haben 1940 entdeckt, dass  $^{238}\text{U}$  ohne äusseren Einfluss in zwei etwa gleichgrosse Bruchstücke zerfallen kann. Man bezeichnet diese Art der Radioaktivität als Spontanspaltung (spontaneous fission, sf). Es entstehen typischerweise zwei Kerne mit einem Massenverhältnis von etwa 1,4 und im allgemeinen auch noch eine wechselnde Zahl von Neutronen. Es entsteht eine grosse Vielfalt von Spaltprodukten. Gegen 100 verschiedene Spaltungsreaktionen sind für  $^{238}\text{U}$  bekannt.

Die Spontanspaltung wird in der Karlsruher Nuklidkarte durch eine grüne Farbe gekennzeichnet.

Nur die schwersten Kerne zeigen das Phänomen der Spontanspaltung. Die abstossend wirkenden Coulomb-Kräfte sind dafür verantwortlich. Das leichteste spontanspaltende Nuklid ist  $^{230}\text{Th}$ . Für die meisten Kerne ist der  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Zerfall der dominierende Prozess. Spontanspaltung wird nur nebenbei beobachtet. Auf eine Spaltung kommen ca. 1 Mio  $\alpha$ -Zerfälle bei  $^{238}\text{U}$ . Erst sehr schwere Kerne zeigen Spontanspaltung als dominierenden Prozess. Spontanspaltung ist wie der  $\alpha$ -Zerfall ein Tunnelprozess. Die Potentialbarriere, die es zu durchtunneln gilt, heisst Spaltbarriere. Manchmal entsteht ein Kern in einem angeregten Zustand, ein sogenanntes Spaltisomer, das sofort durch Spontanspaltung weiterzerfällt. Die Halbwertszeiten für Spaltisomere liegen im Mikrosekunden-Bereich. Das längstlebige, bekannte Spaltisomer ist  $^{242\text{mf}}\text{Am}$  mit einer Halbwertszeit von 14 ms. Die folgende Abbildung zeigt einen typischen Potentialverlauf in Abhängigkeit der Kern-Deformation.



Das Nuklid  $^{252}\text{Cf}$  hat einige Bedeutung. Es ist die einzige bequem zugängliche Quelle von spontanspaltenden Kernen. Es hat eine Halbwertszeit von 2,65 Jahren und zerfällt mit einer Wahrscheinlichkeit von 3,1 % durch Spontanspaltung.  $^{252}\text{Cf}$  wird als Neutronenquelle benutzt, da bei der Spaltung im Durchschnitt fast 4 Neutronen entstehen.

Die folgende Tabelle zeigt einige partielle Halbwertszeiten für den (isoliert betrachteten) Vorgang der Spontanspaltung.

Nuklid	Halbwertszeit	mittlere Anzahl freiwerdende Neutronen
--------	---------------	-------------------------------------------

$^{230}\text{Th}$	$\geq 1,5 \cdot 10^{17}$ a	
$^{232}\text{Th}$	$> 10^{21}$ a	
$^{232}\text{U}$	$8 \cdot 10^{13}$ a	
$^{234}\text{U}$	$1,6 \cdot 10^{16}$ a	
$^{235}\text{U}$	$3,5 \cdot 10^{17}$ a	
$^{236}\text{U}$	$2 \cdot 10^{16}$ a	
$^{238}\text{U}$	$9 \cdot 10^{15}$ a	$2,00 \pm 0,08$
$^{237}\text{Np}$	$> 10^{18}$ a	
$^{239}\text{Pu}$	$5,5 \cdot 10^{15}$ a	
$^{240}\text{Pu}$	$1,4 \cdot 10^{11}$ a	$2,16 \pm 0,02$
$^{242}\text{Pu}$	$7 \cdot 10^{10}$ a	$1,25 \pm 0,02$
$^{241}\text{Am}$	$2,3 \cdot 10^{14}$ a	$2,30 \pm 0,19$
$^{242}\text{Cm}$	$6,5 \cdot 10^6$ a	$2,59 \pm 0,09$
$^{250}\text{Cm}$	$1,4 \cdot 10^4$ a	$3,31 \pm 0,08$
$^{249}\text{Bk}$	$1,7 \cdot 10^9$ a	$3,64 \pm 0,16$
$^{252}\text{Cf}$	52 a	3,764
$^{254}\text{Cf}$	60 d	$3,88 \pm 0,14$
$^{255}\text{Es}$	2440 a	$3,88 \pm 0,14$
$^{257}\text{Fm}$	120 a	$4,02 \pm 0,13$
$^{257}\text{Md}$	$\geq 30$ h	
$^{254}\text{No}$	$\geq 9 \cdot 10^4$ s	

### Protonenzerfallsarten

Erst 1981 wurde durch S. Hoffmann und O. Klepper entdeckt, dass gewisse sehr neutronenarme Kerne durch Emission eines Protons zerfallen können.

Der Protonenzerfall wird in der Karlsruher Nuklidkarte durch eine hellbraune Farbe gekennzeichnet.

Es sind bis heute nur wenige Vertreter dieser Zerfallsart bekannt (z.B.  $^{147}\text{Tm}$ ,  $^{151}\text{Lu}$ ). Die Bindungsenergie für äussere Protonen wird bei sehr neutronenarmen Kernen genügend klein, so dass Protonen ausgestossen werden können.

Mittlerweile ist auch der doppelte Protonenzerfall bekannt, also die Emission von gleichzeitig zwei Protonen. Im Jahr 2002 wurde beobachtet, dass  $^{45}\text{Fe}$  unter Aussendung von 2 Protonen in  $^{43}\text{Cr}$  übergeht. Die Ergebnisse konnten von mindestens zwei unabhängigen Teams bestätigt werden.

### **Neutronenzerfallsarten**

Neutronenreiche Kerne können eines oder mehrere Neutronen aussenden. Die Halbwertszeiten liegen grundsätzlich im Bereich von ns oder darunter.

Der Neutronenzerfall wird in der Karlsruher Nuklidkarte durch eine hellblaue Farbe gekennzeichnet.

### **Clusterzerfall**

Es gibt Nuklide, die ähnlich wie beim  $\alpha$ -Zerfall einen kleinen Atomkern ausstossen. So kann etwa  $^{223}\text{Ra}$  einen Kern  $^{14}\text{C}$  emittieren und dabei in das Nuklid  $^{209}\text{Pb}$  übergehen. Die Wahrscheinlichkeit für den Vorgang ist aber gegenüber dem ebenfalls möglichen  $\alpha$ -Zerfall sehr klein. Man hat bis heute Clusterzerfälle unter Emission von  $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{20}\text{O}$ ,  $^{24}\text{Ne}$ ,  $^{25}\text{Ne}$  und  $^{28}\text{Mg}$  beobachtet. Vermutet werden auch Emissionen von  $^{23}\text{F}$  und  $^{32}\text{Si}$ . Das Phänomen wurde erst 1984 von Rose und Jones erstmals beschrieben. In der Karlsruher Nuklidkarte wird der Clusterzerfall durch eine graublauere Farbe gekennzeichnet.

### **$\beta$ -verzögerte Zerfälle**

Es kommt häufig vor, dass sich nach einem  $\beta$ -Zerfall der Tochterkern in einem angeregten Zustand befindet. Im Allgemeinen regt er sich danach durch Emission von einem oder mehreren  $\gamma$ -Quanten ab. Es kann aber vorkommen, dass vom angeregten Tochterkern ein Neutron oder ein Proton emittiert wird, oder dass eine Spontanspaltung eintritt. In der Karlsruher Nuklidkarte werden diese Vorgänge mit  $\beta_n$ ,  $\beta_p$  und  $\beta_{sf}$  bezeichnet.