

# Radioaktivität

## **Allgemeines:**

Unter Radioaktivität versteht man, dass Atomkerne in kleinere Teile zerfallen oder gespalten werden. Dabei wird Energie frei, indem verschiedene Strahlungsarten ausgesendet werden.

Oder auch: Das „Reaktionsprodukt“ nach dem Zerfall oder die „Reaktionsprodukte“ nach der Spaltung wiegen zusammen weniger, als der Ausgangsstoff. Diese fehlende Masse bleibt in Form von Energie erhalten.

## **Grundlagen:**

Da in einem Atomkern viele positive Protonen vorliegen, müssten diese sich ja eigentlich abstoßen und es dürfte keine Atome außer dem Wasserstoff geben.

Dass dem nicht so ist, wissen wir aber alle.

Die Abstoßungskräfte zwischen den Protonen werden nämlich von der Kernkraft kompensiert. Die Eigenschaften dieser Kernkraft sind die, dass sie ladungsunabhängig ist<sup>1</sup> und dass sie exponentiell mit der Entfernung zwischen den Nukleonen abnimmt, das heißt, nur auf die Nähe sehr stark ist.

Die Kernkraft wird von Atomen mit wenigen Nukleonen zu Atomen mit vielen Nukleonen hin größer. Die Coulomb-Kraft, die dafür sorgt, dass die Protonen sich abstoßen, nimmt mit der Entfernung von Proton zu Proton zwar auch ab, aber sie verhält sich umgekehrt proportional zum Quadrat der Entfernung, das heißt: die Coulomb-Kraft nimmt wesentlich langsamer ab, als die Kernkraft.

Wenn die Atomkerne jetzt aus sehr vielen Nukleonen bestehen, dann ist die Bindung der äußersten Nukleonen nicht mehr so stark, weil der Atomkern sehr groß ist und so die Entfernung zwischen den einzelnen Nukleonen relativ groß ist. Die Kernkraft ist hier schon fast zu schwach um die äußersten Nukleonen zu halten, und so ist es mit wenig Energieaufwand möglich, Nukleonenverbände im Kern in Schwingungen zu versetzen, dass diese so stark schwingen, dass die außen sowieso schon schwache Bindung überwunden wird, und der Kern sich dank der Coulomb-Kräfte in zwei neue spaltet – eigentlich sprengt -, oder sich ein Alpha( $\alpha$ )-Teilchen abspaltet, um wieder zu einen stabileren Zustand zu kommen (der Atomkern).

## Kernspaltung (Kernfission)

### **Allgemeines:**

Bei der Kernspaltung wird ein schwerer Atomkern - oder besser: ein schweres Atom - in zwei leichtere Atome gespalten. Dieser Spaltprozess kann von selbst erfolgen, dann spricht man von einer „Spontanen Kernspaltung“ oder er wird erzwungen, dann spricht man von „Induzierter Kernspaltung“.

Nach der Kernspaltung liegen also zwei neue Atome vor; und es wurde Energie frei. Die Massen der beiden neuen Atome verhalten sich etwa im Verhältnis 2:3. Die beiden entstehenden Atome sind oft selbst noch radioaktiv und bringen sich durch Radioaktive Zerfälle in einen stabilen Zustand, das kann aber dauern.

---

<sup>1</sup> Sie wirkt zwischen zwei Protonen, zwei Neutronen oder einem Proton und einem Neutron gleich

Die durch Kernspaltung freigesetzte Energie beträgt etwa 10% der Energie, die die Nukleonen zusammenhält, der Kernbindungsenergie<sup>2</sup>, was etwa 120-200 MeV<sup>3</sup> ist. Diese Energie wird in Form von kinetischer Energie, sprich „Bewegungsenergie“ der Bruchstücke und Strahlung frei, die Bewegungsenergie wird dann aber in Wärme umgesetzt, weil die entstandenen Atome an anderen Atomen reiben.

Diese Energien sind enorm; ein Gramm U-235 setzt bei seiner Spaltung 22600 kWh Energie um, das entspricht der Sprengkraft von 20 Tonnen TNT und würde reichen, um eine Energiesparlampe (7W) für 368 Jahre leuchten zu lassen.

### **Grundlagen:**

Verantwortlich für diese Energieabgabe ist der sogenannte Massendefekt. Die freien Protonen und Neutronen wiegen ungebunden weniger, als wenn sie zu einem Atomkern zusammengebunden werden. Nach Einsteins Relativitätstheorie sind aber Energie und Masse zueinander proportional. Die „verlorengegangene“ Masse ist also jetzt in Energie vorhanden, die man als Kernbindungsenergie bezeichnet. Wie vorhin ausgeführt ziehen sich die Nukleonen in einem sehr schweren Atom schwächer an, als die in einem leichten Kern.

Stark vereinfacht kann man die Kernspaltung also so erklären:

In dem schweren Kern wird aufgrund der niedrigeren Anziehungskräfte zueinander nicht so viel Masse in Energie umgesetzt, wie bei den leichten Atomkernen. Wenn man jetzt einen schweren Atomkern in zwei kleinere, leichtere zerlegt, dann ziehen sich in diesen die Nukleonen stärker an und es wird mehr Masse in Energie „umgeleitet“. Das sieht man auch daran, dass die leichteren Atomkerne nur gespalten werden können, wenn man wesentlich mehr Energie als bei schwereren Kernen zuführt.

Man kann noch einfacher sagen, die Reaktionsprodukte haben nach der Spaltung weniger Masse als vor der Spaltung, und diese fehlende Masse ist in Energie umgesetzt worden.

### **Kettenreaktion:**

Bei einer Kernspaltung entstehen neben den beiden neuen Atomen auch noch durchschnittlich zwei oder drei Neutronen. Diese Neutronen können jetzt andere Atome treffen und dann diese spalten, indem sie sie einfach zerschlagen oder das Atom verändern, damit es zu instabil wird. Beim U-235 beispielsweise wird ein langsames Neutron einfach eingebaut und es entsteht ein U-236. Dieses ist aber so instabil, dass es sich sofort in zwei andere Atome aufspaltet z.B. in Barium-144 und Krypton-90. Das U-235 Atom kann aber auch von einem schnellen Neutron zerschlagen werden. Bei der Spaltung werden zwei schnelle Neutronen frei, die ihrerseits wieder andere U-235 Atome spalten können.

Dieser Prozess kommt erst zum Erliegen, wenn das spaltbare Material aufgebraucht ist oder wenn es zu wenig geworden ist. Die Kettenreaktion kann aber beispielsweise in Kraftwerken durch Regelstäbe unterbrochen werden.

### **Kritische Masse:**

Um eine Kettenreaktion in Gang setzen zu können braucht man eine bestimmte Menge des zu spaltenden Materials. Diese Menge hängt von dem Nuklid, der Reinheit und Dichte des Materials, seiner geometrischen Form, dem Vorhandensein von Materialien, die Neutronen reflektieren und anderen Faktoren ab. Wenn eine Kritische Masse vorliegt, bedeutet das, dass ein Kern, der sich spaltet, nicht nur einen anderen zur Spaltung anregt; die Aktivität steigt dann exponentiell.

---

<sup>2</sup> Um mich (60 kg) 1m hochzuheben, bräuchte man die Kernbindungsenergie von ca. 0,000712g Eisen (Fe-56).

<sup>3</sup> MeV=1000000 eV (Elektronenvolt) 1eV=1,602 176 462·10<sup>-19</sup> J

mit 200 MeV könnte man ein Blatt Papier ca. 3,266 nm (Nanometer) hochheben (1nm = 10<sup>-9</sup> m), man muss also über 3000000 Atome spalten, um das Blatt 1cm hochzuheben.

Bei U-235 ist diese Menge eine Kugel von etwa 17 cm Durchmesser und einem Gewicht von ca. 50 Kilo. Die Menge an Plutonium wäre nicht größer als die Faust eines Menschen und ca. 5,6 kg schwer.

Wenn man eine solche Menge an einem Stück hat, sollte man vorsichtig sein, weil die Kettenreaktion von Neutronen in Gang gesetzt werden kann, die von der Kosmischen Strahlung erzeugt werden, oder weil sich ein Kern spontan spalten kann und damit Neutronen freisetzt.

### **Schnelle / langsame Neutronen:**

Bei den Neutronen, die bei einer Kernspaltung b.z.w. einer Kettenreaktion eine Rolle spielen, muss man zwischen langsamen, auch thermische Neutronen genannt, und schnellen Neutronen unterscheiden.

Langsame Neutronen haben eine Geschwindigkeit von ca. 2,2 km/s bis 4,4 km/s<sup>4</sup>, schnelle Neutronen dagegen sind bis zu 1000 mal so schnell.

Aus unserem Alltag sind wir gewöhnt, dass ein Gegenstand mit großer Geschwindigkeit wesentlich mehr Schaden anrichtet, als wenn er 1000 mal langsamer wäre.<sup>5</sup> Bei den Neutronen ist das aber anders. Als Regel gilt: „Die Wahrscheinlichkeit für eine Kernspaltung nimmt in der Regel mit steigender Energie der Neutronen ab.“

Bei Th-232 und U-238 beispielsweise werden so gut wie alle schnelle Neutronen eingebaut und rufen so keine Reaktion hervor, bis auf dass sie höchstens der Zerfall beschleunigen können.

### **Moderatoren:**

Moderatoren sind Stoffe, die die Geschwindigkeit von schnellen Neutronen auf die Geschwindigkeit von langsamen Neutronen abbremst, indem einfach die Neutronen immer an den Stoff stoßen und dabei Impuls verlieren. Der beste Moderator ist schweres Wasser (D<sub>2</sub>O).

## **Radioaktiver Zerfall**

### **Allgemeines:**

Radioaktiver Zerfall bedeutet, dass sich ein Atom selbstständig<sup>6</sup> - also ohne Anregung - in ein anderes Atom umwandelt und dabei Energie in Form von Strahlungen abgibt. Wann ein Nuklid das tut ist zufällig, aber es unterliegt gewissen statistischen Wahrscheinlichkeiten, wie viele Nuklide eines größeren Verbandes in einer gewissen Zeit zerfallen.

### **Grundlagen:**

Radioaktivität kommt von einem Überschuss an Protonen oder Neutronen. Dieser Zustand liegt energieniveautechnisch gesehen höher als der als stabiles Nuklid. Um dem Überschuss beizukommen, wandeln sich im Kern eines radioaktiven Nuklids Protonen in Neutronen oder Neutronen in Protonen um und senden dabei Elektronen, Positronen und andere Teilchen aus,

---

<sup>4</sup> Brockhaus sagt: unter 4,4 mm/s [→ wahrscheinlich Tippfehler]

<sup>5</sup> Ein Auto, das mit 200 km/h gegen eine Laterne fährt, lässt von der Laterne nicht mehr viel gerade. Wenn das Auto aber mit 200 m/h gegen die Laterne fahren würde, würde der Schaden sich weit weniger beträchtlich ausnehmen.

<sup>6</sup> Es wird z.B. von Druck oder Temperatur praktisch nicht beeinflusst.

oder „fangen“ ein Elektron ein. Bei sehr schweren Nukliden werden dann zusätzlich  $\alpha$ -Teilchen ausgestoßen, damit die Kerne nicht mehr so instabil sind.

Die Aussendung dieser Teilchen ist sehr energieaufwendig. Das Nuklid bringt sich durch den Zerfall also selbst auf ein niedrigeres Energieniveau, und wie wir wissen, strebt die Natur ja immer ein möglichst niedriges Energieniveau an. Man spricht hier von „energetisch günstigere[n] Kernen“. Beim Wasserstoff ist dieser Zustand das einzelne Proton als Atomkern, bei Helium und Elementen darüber müssen gleich viele Protonen als auch Neutronen den Kern bilden, und bei größeren Kernen überwiegt dann immer mehr die Zahl der Neutronen.

### **Grundstoffe:**

Ab dem Element Polonium mit der Ordnungszahl 84 sind alle Elemente und Isotope radioaktiv, b.z.w. es sind uns keine stabilen bekannt.

Es sind über 2700<sup>7</sup> verschiedene Nuklide bekannt. Von diesen sind über 2000<sup>8</sup> instabil, das heißt radioaktiv und jedes radioaktive Isotop b.z.w. Element zerfällt, bis es einen stabilen Zustand erreicht hat. Also bis der Überschuss an Protonen oder Neutronen abgebaut ist.

Auf einer Nuklidkarte kann man alle bekannten radioaktiven Nuklide sehen, sie sind gegenüber der stabilen Nuklide besonders gekennzeichnet. Meistens kann man die Zerfallsart an der Nuklidkarte selbst ersehen. Wenn nicht kommt man durch logisches überlegen relativ weit, es gibt aber Ausnahmen.

### **Zerfallsarten:**

#### **$\alpha$ -Zerfall:**

Der  $\alpha$ -Zerfall setzt nur bei sehr großen und schweren Kernen ein, wenn diese sich nämlich nicht mehr selbst zusammenhalten können. Dabei wird ein  $\alpha$ -Teilchen, bestehend aus 2 Protonen und 2 Neutronen, ausgestoßen und bewegt sich dann mit einer Geschwindigkeit unterhalb eines Zehntels der Lichtgeschwindigkeit. Der  $\alpha$ -Zerfall ist nach dem klassischen Verständnis der Physik unmöglich. Trotzdem stattfinden kann er nur aufgrund des sogenannten Tunneleffekts.

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

Wenn im Kern zu viele Neutronen vorhanden sind, kann es sein, dass sich eines dieser Neutronen in ein Proton umwandelt. Bei dieser Reaktion kommt am Ende noch ein Elektron und ein Elektron-Antineutrino heraus, das bis zu 99% der Lichtgeschwindigkeit schnell sein kann.

Das wiederum ergibt sich daraus, dass die Protonen und Neutronen aus drei Quarks von zwei verschiedenen Typen aufgebaut sind. Ein Neutron aus zwei down- und einem up-Quark, und ein Proton aus zwei up- und einem down-Quark. Eines der down-Quarks des Neutrons verwandelt sich in ein up-Quark und setzt dabei ein Vektorboson W<sup>-</sup> frei, das dann in ein Elektron und ein Antineutrino zerfällt.

---

<sup>7</sup> Nach: Duden (Aus Januar 2001)

<sup>8</sup> [www.pharmazeutische-zeitung.de](http://www.pharmazeutische-zeitung.de)

Uni Hamburg sagt: 1500 Nuklide, 273 stabil

### **$\beta^+$ -Zerfall:**

Wenn in dem Kern dagegen zu viele Protonen vorliegen, läuft die Reaktion mit den „Gegenteilchen“ ab. Also verwandelt sich ein Proton zu einem Neutron und dabei wird ein Positron und ein Elektron-Neutrino frei.

### **Doppelter $\beta$ -Zerfall:**

Es sind außerdem etwa 30 Isotope bekannt, bei denen doppelter  $\beta$ -Zerfall möglich ist. Dabei werden einfach zwei  $\beta$ -Teilchen emittiert. Der doppelte  $\beta$ -Zerfall tritt auf, wenn es energetisch gesehen nicht möglich ist, ein einzelnes  $\beta$ -Teilchen auszustoßen, es gibt aber noch andere – kompliziertere – Faktoren. Der doppelte  $\beta$ -Zerfall ist aber äußerst selten, und kann auch nur sehr schwer beobachtet werden, da er normalerweise von dem einfachen  $\beta$ -Zerfall überdeckt wird.

### **$\gamma$ -„Zerfall“:**

Der  $\gamma$ -Zerfall ist meistens eine Folge aus  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Zerfall. Das liegt daran, dass der Kern bei einem Alpha- oder Beta-Zerfall angeregt wurde und jetzt  $\gamma$ -Strahlung freisetzt, um wieder auf ein nicht mehr oder weniger angeregten Zustand<sup>9</sup> zu kommen

### **Innere Konversion:**

Bei der inneren Konversion gibt ein angeregter Atomkern Energie an eines seiner Elektronen ab. Das Elektron wird dadurch zu energiereich und muss sich dabei zwangsläufig aus dem Atom entfernen. Die Energie, die der Kern überträgt, hat er aber jetzt ja weniger, und so sinkt er auf ein weniger angeregten Zustand

### **(Wer Delta-Strahlung sucht:**

Als Delta-Strahlung bezeichnet man diejenige Strahlung, die entsteht, wenn ein geladenes Teilchen, das beispielsweise beim Radioaktiven Zerfall ausgesendet wurde, ein Atom ionisiert. Es hat mit unserem Thema aber nur im weitesten Sinne zu tun, wir führen es auch nur auf, damit das Alphabet fortgeführt wird.)

### **Epsilon-Zerfall (Elektroneneinfang):**

Eine weitere Art von Zerfall, eigentlich mehr eine Umwandlung, ist die des Elektroneneinfangs. Dabei fängt sich ein Proton ein Elektron aus der innersten Schale [oder Wolke oder Orbit] ein. Es verwandelt sich daraufhin zu einem Neutron und es wird ein Elektron-Neutrino frei. Es kann jetzt vorkommen, dass ein Elektron einer Anderen Schale in die entstandene Lücke springt, und dabei kann Röntgenstrahlung frei werden.

### **Nukleonenemission:**

Ein Kern, der wesentlich zu viele Protonen oder Neutronen hat, kann sich auch dadurch auf ein günstigeres Energieniveau bringen, indem er „einfach“ Protonen oder Neutronen ausstößt, sich also dadurch in einen anderen Kern verwandelt.

Verantwortlich dafür ist beim großen Protonenüberschuss die Coulomb-Abstoßung und bei den Neutronen die schwache Wechselwirkung.

In extremen Fällen können dann auch zwei Protonen ausgestoßen werden (z.B.: das Eisen 45, dem zum stabilen Eisen zehn Neutronen fehlen).

---

<sup>9</sup> Die unterschiedlich angeregten Zustände des selben Nuklids nennt man Isomere.

**Clusterzerfall:**

In sehr seltenen Fällen bei extrem schweren Kernen kann es sogar dazu kommen, dass ein Kern einen kompletten Atomkern eines leichten Nuklids ausstößt; diese Vorgänge sind aber wirklich extrem selten.

**Zerfallsreihen:**

Eine Zerfallsreihe ist der Zerfall eines radioaktiven Mutternuklids über seine ebenfalls radioaktiven Tochternuklide bis hin zu einem stabilen Nuklid. Dabei kann sowohl Alpha-, als auch Beta- und Epsilon-Zerfall eingeschlossen sein.

Es kann auch zu sogenannten Verzweigungen kommen, wenn ein Nuklid nämlich über zwei verschiedene Zerfallsarten in zwei verschiedene Nuklide zerfallen kann. Die Verzweigungen führen aber wieder zusammen, also es entstehen keine zwei verschiedenen Reihenfortsätze.

Eine Zerfallsreihe kann durch ein Bild visualisiert werden, bei dem die Nuklide mit höherer Protonenzahl weiter oben und die mit höherer Massen- b.z.w. Neutronenzahl weiter rechts zu finden sind. Durch Verbindungen ist dann ersichtlich, welches Nuklid in welches neue zerfällt. Bei manchen ist jeweils die Halbwertszeit der Nuklide – soweit bekannt – mitangegeben.

Wir kennen 4 verschiedene Zerfallsreihen, die jeweils nach dem Nuklid mit der längsten Halbwertszeit benannt sind; die Uran-Reihe<sup>10</sup> nach U-238, die Thorium-Reihe nach Th-232, die Actiniumreihe nach Ac-235 und die Neptuniumreihe nach dem künstlichen Np-237.

**Halbwertszeit:**

Die Halbwertszeit  $t_{1/2}$  ist die Zeitspanne, in der ziemlich genau die Hälfte eines radioaktiven Stoffes zerfällt. Diese Zeitspanne ist für jede Substanz, die aus größtenteils aus dem selben Nuklid besteht, charakteristisch.

Die Halbwertszeit berechnet sich aus der Zerfallskonstanten  $\lambda$  (Lambda) wie folgt:

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

$$T_{1/2} \approx 0,693 / \lambda$$

Wenn die Zerfallskonstante gegeben ist, ist es möglich, zu berechnen, wie viel Radioaktives Material nach einer bestimmten Zeit schon zerfallen ist, b.z.w. wie viel davon noch übrig ist. Man bedient sich dazu des Zerfallsgesetzes:

$$N(t) = N(0) * e^{(-\lambda * t)}$$

Es handelt sich hierbei also um exponentielles Schrumpfen, wobei  $N(0)$  der Anfangsbestand und  $N(t)$  der Bestand an noch nicht zerfallenen Atomen nach der Zeit  $t$  ist.

---

<sup>10</sup> Auch als Uran-Radium-Reihe bezeichnet, obwohl U-238 eine ca. 2,8 Millionen mal größere Halbwertszeit als Ra-226 besitzt.

## Handout Radioaktivität

### 1.0 Kernspaltung:

Bei schweren Kernen sind die Abstände zwischen den Nukleonen größer und die äußersten werden nicht mehr so stark festgehalten. Es ist jetzt mit relativ wenig Energieaufwand möglich, diese zur Spaltung zu bewegen.

#### 1.1 Energie wird frei:

Je stärker die Nukleonen aneinander gebunden werden, desto leichter sind sie. Die Masse nimmt also ab. Aus  $E=mc^2$  wissen wir, dass Energie und Masse proportional zueinander sind. Die bei der Kernspaltung entstehenden Teile sind leichter, man kann sich vorstellen, die fehlende Masse ist jetzt Energie

#### 1.2 Schnelle/Langsame Neutronen:

Schnelle Neutronen sind ca. 1000 mal so schnell wie langsame. Sie rufen unterschiedliche Prozesse und Reaktionen hervor.

#### 1.3 Kettenreaktion:

Die Spaltprodukte (Neutronen), die bei der Spaltung eines Atoms entstehen, regen mehr als ein Atom an, sich zu spalten. Es wird viel Energie frei (1g U-235 entspricht 20t TNT).

### 2.0 Radioaktiver Zerfall:

Radioaktive b.z.w. instabile Atome haben einen Neutronen- oder Protonenüberschuss. Dieser Zustand bringt ein höheres Energieniveau. Da die Natur ein möglichst niedriges Energieniveau anstrebt, versuchen die instabilen Atome Energie abzugeben, indem sie Protonen, Neutronen oder Energie ausstoßen oder indem sie die überschüssigen Teile umwandeln.

#### 2.1 Halbwertszeit:

Die einzelnen Atome zerfallen völlig zufällig, man kann aber über größere Gruppen wahrscheinliche Aussagen machen. Die Halbwertszeit ist der Zeitraum, in dem genau die Hälfte eines bestimmten Stoffes zerfällt. Mit der Zerfallskonstante fällt das Rechnen leichter:

$$B(t) = B(0) * e^{(- [Zerfallskonstante] * t)}$$

Man findet e auf dem

Taschenrechner; ca. 2,71828

#### 2.2 Zerfallsreihen:

Ein radioaktives Mutternuklid zerfällt über eine Reihe von Tochternukliden zu einem stabilen Nuklid. Es sind vier solcher Reihen bekannt; sie sind jeweils nach ihrem langlebigsten Isotop benannt.

### 3.0 Zu empfehlende

#### Quellen:

Duden Physik

WAS IST WAS Atomenergie

[www.mpg.de](http://www.mpg.de)

[www.walter-fendt.de/ph11d/index.html](http://www.walter-fendt.de/ph11d/index.html)

[www.geowiss.uni-hamburg.de](http://www.geowiss.uni-hamburg.de)

|  | U-Ra                    | Ac                      | Th                      | Np                      |
|--|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|  | U-238 (92;146)          | U-235 (92; 143)         | Th-232 (90; 142)        | Pu-241 (94; 147)        |
|  | Th-234 (90; 144)        | Th-231 (90; 141)        | Ra-228 (88; 140)        | Am-241 (95; 146)        |
|  | Pa-234 (91; 143)        | Pa-231 (91; 140)        | Ac-228 (89; 139)        | Np-237 (93; 144)        |
|  | U-234 (92; 142)         | Ac-227 (89; 138)        | Th-228 (90; 138)        | Pa-233 (91; 142)        |
|  | Th-230 (90; 140)        | >Th-227 (90; 137)       | Ra-224 (88; 136)        | U-233 (92; 141)         |
|  | Ra-226 (88; 138)        | >Fr-223 (87; 136)       | Th-220 (86; 134)        | Th-229 (90; 139)        |
|  | Rn-222 (86; 136)        | Ra-223 (88; 135)        | Po-216 (86; 134)        | Ra-225 (88; 137)        |
|  | Po-218 (84; 134)        | Rn-219 (86; 133)        | >Pb-212 (82; 130)       | Ac-225 (89; 136)        |
|  | >Pb-214 (82; 132)       | Po-215 (84; 131)        | >At-216 (85; 131)       | Fr-221 (87; 134)        |
|  | >At-218 (85; 133)       | >Pb-211 (82; 129)       | Bi-212 (83; 129)        | At-217 (85; 132)        |
|  | Bi-214 (83; 131)        | >At-215 (85; 130)       | >Po-212 (84; 128)       | Bi-213 (83; 130)        |
|  | >Po-214 (84; 130)       | Bi-211 (83; 128)        | >Tl-208 (81; 127)       | >Tl-209 (81; 128)       |
|  | >Tl-210 (81; 129)       | >Po-211 (84; 127)       | <b>Pb-208 (82; 126)</b> | >Po-213 (84; 129)       |
|  | Pb-210 (82; 128)        | >Tl-207 (81; 126)       |                         | <b>Pb-209 (82; 127)</b> |
|  | Bi-210 (83; 127)        | <b>Pb-207 (82; 125)</b> |                         |                         |
|  | >Po-210 (84; 126)       |                         |                         |                         |
|  | >Tl-206 (81; 125)       |                         |                         |                         |
|  | <b>Pb-206 (82; 124)</b> |                         |                         |                         |

Legende: [Nuklidname]-[Masse] ([Ordnungs-/Protonenzahl]; [Neutronenzahl])

stabil

> Verzweigung