

1.3 Eigenschaften der Kernkräfte

In den Atomkernen werden Protonen und Neutronen auf kleinstem Raum zusammengehalten. Das bewirken sehr starke Kernkräfte, die den abstoßenden Kräften zwischen den positiv geladenen Protonen entgegenwirken.

Die Kernkräfte F_K haben eine sehr geringe Reichweite. Erst wenn die Kernteilchen so dicht beieinander liegen, dass sie sich fast berühren, beginnen die Kräfte zu wirken. Es ist so ähnlich wie bei klebrigen Bonbons, die erst aneinander haften, wenn sie sich berühren.

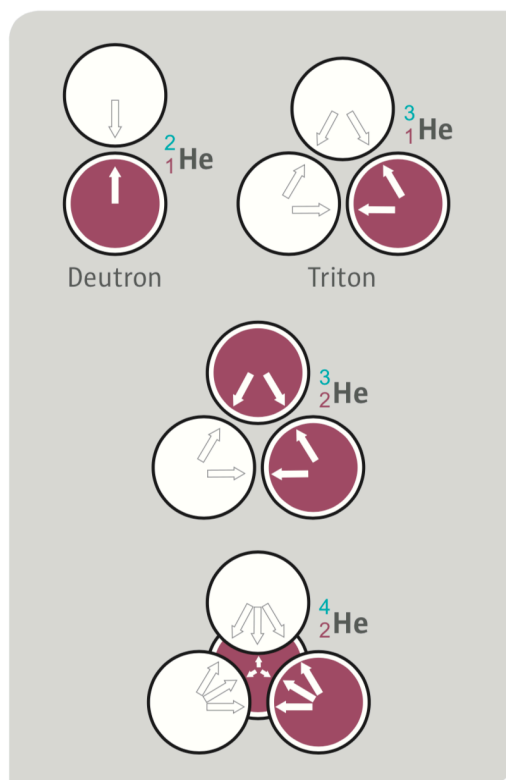


Abb. 1.08 (links)

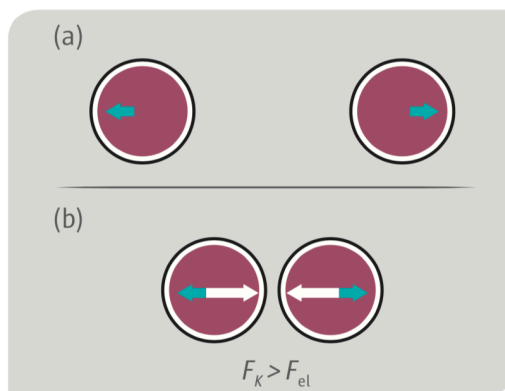
Bei größerer Entfernung zwischen zwei Protonen wirken nur die abstoßenden elektrischen Kräfte (a).

Bei geringer Entfernung werden die Kernkräfte wirksam (b). Sie sind stärker als die elektrischen Kräfte.

F_{el} :
 F_K :

Abb. 1.09

Kernkräfte können nur zwischen benachbarten Kernteilchen wirken



Die elektrischen Kräfte F_{el} , die zwischen den Protonen wirken, haben im Prinzip eine unendliche Reichweite. Ihre Stärke nimmt jedoch mit der Entfernung r gemäß $1/r^2$ ab (Abb. 1.08).

Wegen der geringen Reichweite werden die Kernkräfte nur zwischen unmittelbar benachbarten Kernteilchen wirksam. Das ist immer nur zwischen einer begrenzten Anzahl von Teilchen der Fall. Besteht ein Atomkern aus nur einigen wenigen Teilchen, ist jedes Teilchen mit jedem anderen in Kontakt, so dass die Kernkräfte wirksam werden können (Abb. 1.09).

Ist die Teilchenzahl größer, kann nicht mehr jedes Kernteilchen über Kernkräfte mit jedem anderen in Wechselwirkung treten. Anders ist es bei den im Kern auftretenden elektrischen Kräften. Sie stoßen sich alle untereinander ab, auch über die Entfernung vieler Kernteilchen hinweg (Abb. 1.10).

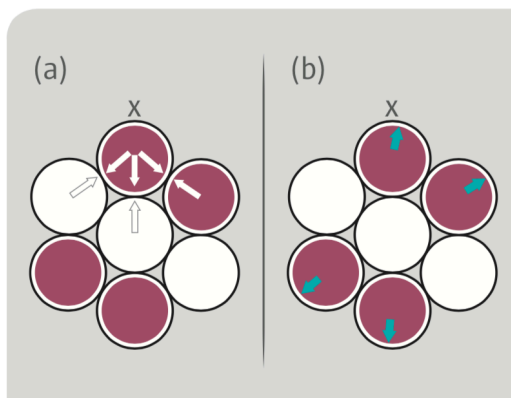


Abb. 1.10

Kernkräfte () und elektrische Kräfte () sind nur für das mit (x) bezeichnete Proton angegeben.

„Anziehende“ Kernkräfte sind nur zwischen benachbarten Kernteilchen wirksam, „abstoßende“ elektrische Kräfte wirken auch über größere Entfernungen.

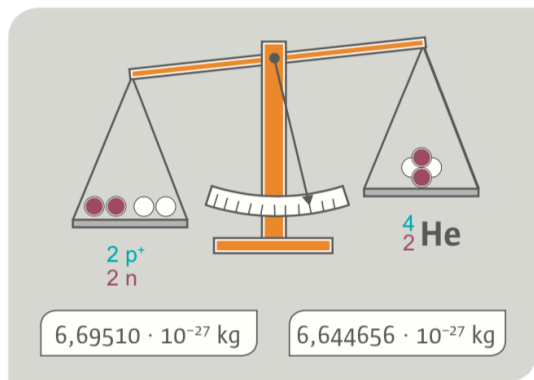
Eine weitere Eigenschaft der Kernkräfte ist, dass sie zwischen allen Teilchen wirken, unabhängig von ihrer Ladung. Die Kernkräfte haben also gleiche Größe zwischen den Teilchenpaaren Proton/Proton, Proton/Neutron und Neutron/Neutron.

Wie stark die Kernteilchen im Kern zusammengehalten werden, lässt sich berechnen. Das ist am einfachsten am Kern des Heliumatoms darzustellen. Er besteht aus zwei Protonen und zwei Neutronen. Die Masse des Kerns müsste sich eigentlich aus zwei Protonenmassen und zwei Neutronenmassen ergeben:

$$2 \cdot m_p = 2 \cdot 1,67262 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 3,34524 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$2 \cdot m_n = 2 \cdot 1,67493 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 3,34986 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_{2p+2n} = 6,69510 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$



Kern ein kleiner Teil ihrer Massen in Energie umgewandelt wird. Diese Energie wird in Form einer unsichtbaren energiereichen Lichtart (Gammastrahlung) abgegeben und tritt auch z. T. als Bewegungsenergie des entstandenen Kerns auf. Würde der Heliumkern wieder in seine Bestandteile zerlegt werden, müsste genau die verloren gegangene Energie dem Kern wieder zugeführt werden. Der Massenverlust (und damit die abgegebene Energie) ist also für das Zusammenhalten der Kernteilchen verantwortlich.

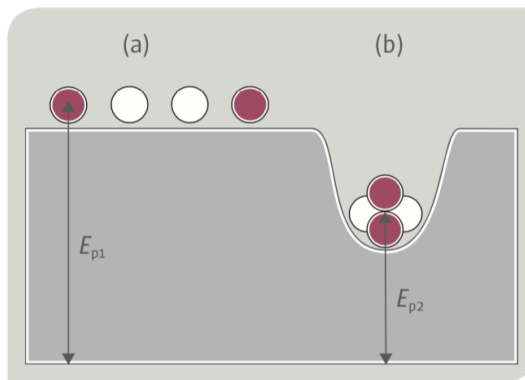


Abb. 1.11 (links)

Bei der Entstehung eines Atomkerns aus Nucleonen tritt ein Massenverlust auf

Abb. 1.12

Zusammenfügen von Kugeln zu einer stabileren Einheit durch Energieabgabe (Vergleich zur Entstehung eines Atomkerns aus Kernteilchen)

Sehr genaue Massenbestimmungen des Heliumkerns haben aber ergeben, dass seine Masse $m_{\text{He}} = 6,644656 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ beträgt. Die Masse des Heliumkerns ist also um $0,050444 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ geringer als die Summe der Massen der einzeln existierenden Teilchen. Dieser Verlust macht etwa 0,8 % aus (Abb. 1.11).

Dass durch Energieabgabe Teilchen zu einer stabilen Einheit zusammengefügt werden können, lässt sich anhand eines mechanischen Modells veranschaulichen (Abb. 1.12).

Der Massenverlust (auch Massendefekt genannt) kommt dadurch zustande, dass beim Zusammenschluss von Protonen und Neutronen zu einem

(a) Vier Kugeln liegen getrennt voneinander auf einer Ebene (indifferentes Gleichgewicht). Sie haben gegenüber der unteren Ebene potenzielle Energie E_{p1} („Höhenenergie“). (Die vier Kugeln entsprechen den zwei Protonen und den zwei Neutronen.)

(b) Fallen die vier Kugeln anschließend in die Vertiefung, liegen sie dicht beieinander im stabilen Gleichgewicht. Da sie nun gegenüber der ursprünglichen Position niedriger liegen, haben sie potenzielle Energie („Höhenenergie“) verloren bzw. abgegeben. (Das entspricht der Energieabgabe beim Auftreten der Kernkräfte.)

haben ergeben, dass die Bindungsenergie pro Kernteilchen bei den Kernen der einzelnen Elemente bzw. deren Isotopen unterschiedlich ist (Tab. 1.04). Die Bindungsenergie je Nukleon ist in Abb. 1.13 graphisch dargestellt.

Wie viel Energie einer bestimmten Masse entspricht, kann nach dem von Einstein formulierten Gesetz berechnet werden:

$$E = m \cdot c^2$$

(E: Energie; m: Masse; c: Lichtgeschwindigkeit).

So entspricht 1 kg Masse einer Energie von $E = 9 \cdot 10^{16} \text{ J}$. Stünde dieser Betrag als elektrische Energie zur Verfügung, könnte damit die Stadt Hamburg zwei Jahre lang mit elektrischer Energie versorgt werden.

Beim Heliumkern ergibt sich aus dem Massenverlust von $m = 0,050444 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ eine Energie von $E = 0,4536 \cdot 10^{-11} \text{ J} = 28,3 \text{ MeV}$ (eV: Elektronvolt, $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$). Dieser Energiebetrag wurde bei der Kernentstehung abgegeben. Auf jedes einzelne Kernteilchen entfällt dann rechnerisch eine Energie von $E = 7,1 \text{ MeV}$.

| Nuklid | Gesamt-Bindungsenergie in MeV | mittlere Bindungsenergie je Nukleon in MeV |
|--------|-------------------------------|--|
| H-2 | 2,225 | 1,113 |
| He-3 | 7,7118 | 2,573 |
| He-4 | 28,296 | 7,074 |
| Li-7 | 39,244 | 5,606 |
| O-16 | 127,620 | 7,976 |
| Cl-35 | 298,20 | 8,520 |
| Fe-57 | 499,90 | 8,770 |
| Ag-107 | 915,387 | 8,555 |
| Lu-176 | 1.418,40 | 8,059 |
| Pb-208 | 1.636,455 | 7,868 |
| U-235 | 1.783,889 | 7,591 |

Tab. 1.04

Bindungsenergie bei einigen Nukliden

Je größer bei einer Kernentstehung der Massenverlust und damit die Energieabgabe ist, desto fester sind die Kernteilchen aneinander gebunden. Man nennt diese Energie deshalb auch Bindungsenergie. Genaue Messungen

Abgesehen von den sehr leichten Atomkernen liegt die Bindungsenergie je Nukleon zwischen 7 MeV und fast 9 MeV. Die Energie, mit der die äußeren Elektronen der Atomhülle gebunden sind, liegt dagegen nur bei 2 bis 3 eV.

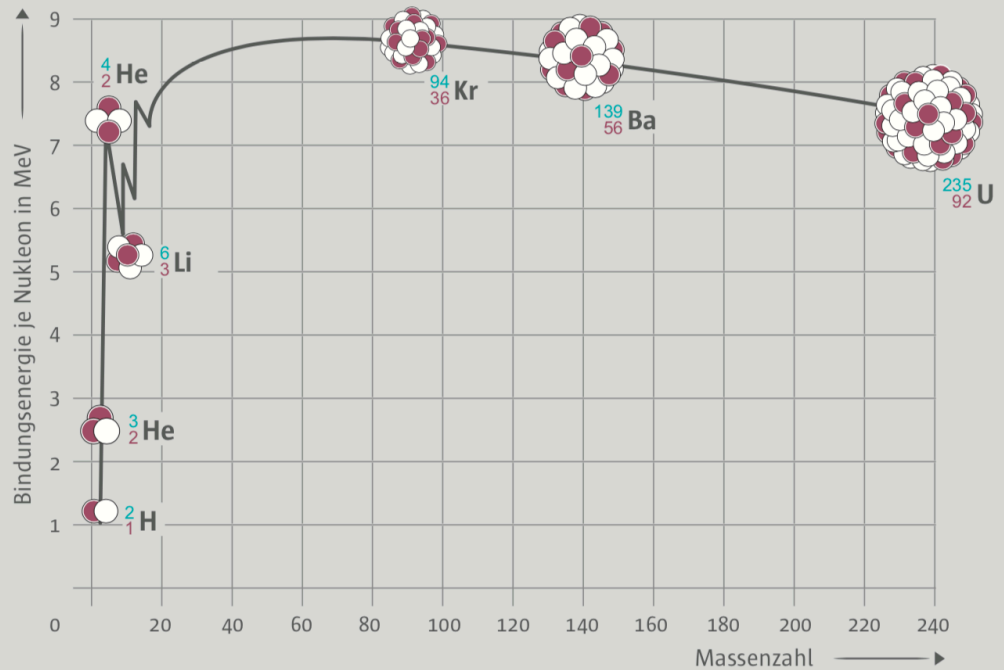


Abb. 1.13

Mittlere Bindungsenergie je Nukleon in Abhängigkeit von der Massenzahl

Die mittlere Bindungsenergie je Nukleon hat bei Kernen mit den Massenzahlen 40 bis 100 (z. B. Fe-57, Kr-87) ihren höchsten Wert und nimmt zu den leichteren und den schwereren Kernen hin ab. Für die Nutzung der Kernbindungsenergie stehen also grundsätzlich zwei Möglichkeiten zur Verfügung:

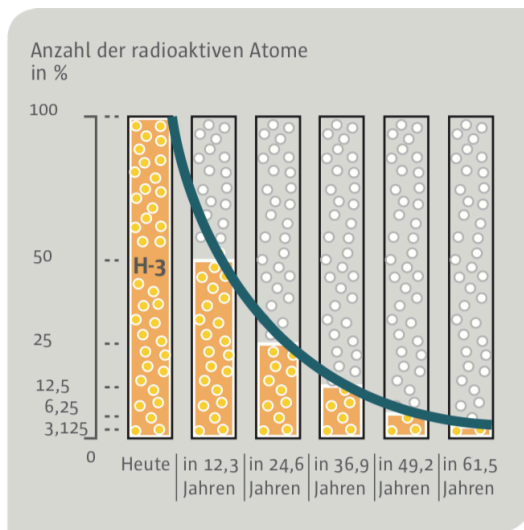
- Es werden sehr leichte Kerne (z. B. ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H}$) miteinander verschmolzen. Daraus entstehen dann schwerere Kerne, deren Kernteilchen stärker aneinander gebunden sind. Das ist mit einem Massenverlust und somit einer Energieabgabe verbunden. Nach diesem Prinzip arbeiten die Energiefreisetzung im Innern der Sonne und der geplante Fusionsreaktor.
- Schwere Kerne werden in mittelschwere gespalten. Da die Bindungsenergie je Nukleon bei mittelschweren Kernen größer ist als bei schweren Kernen, tritt auch dabei Massenverlust und damit Energiefreisetzung auf. Auf diesem Prinzip beruht die Energiegewinnung in Kernkraftwerken.

Dass die Bindung der Nukleonen bei den schweren Kernen lockerer wird, ist darauf zurückzuführen, dass bei Vergrößerung der Nukleonenzahl die Kernkräfte insgesamt zwar zunehmen, aber eben nur zwischen den benachbarten Teilchen wirken. Die abstoßenden Kräfte zwischen den Protonen nehmen ebenfalls zu, sie wirken aber zwischen allen Protonen. Dadurch wird der Zusammenhalt zwischen den Kernteilchen wieder etwas gelockert. Von einer bestimmten Protonenzahl an sind die Kerne nicht mehr stabil, sondern instabil (radioaktiv).

Radioaktiver Zerfall

Bei einem einzelnen radioaktiven Atomkern kann man nicht vorhersagen, zu welchem Zeitpunkt er zerfallen wird. Er kann in der nächsten Sekunde oder erst in Tausenden von Jahren zerfallen. Bei einer großen Anzahl von Atomen lässt sich aber eine Wahrscheinlichkeitsaussage über den Ablauf des Zerfalls machen. Es zerfallen zum Beispiel von einer Menge Wasserstoff-3 (Tritium) in ca. 12,3 Jahren die Hälfte der Atome, nach weiteren 12,3 Jahren ist von dem Rest wiederum die Hälfte zerfallen usw. (Abb. 2.08).

Bei einer angenommenen Anzahl von 12.000.000 radioaktiven Atomkernen kann man sich den Ablauf des Zerfalls anhand einer Auflistung (Tab. 2.03) deutlich machen. Als Radionuklid ist auch hier wieder Wasserstoff-3 (Tritium) gewählt worden. Es zerfällt mit einer Halbwertszeit von etwa 12,3 Jahren unter Aussenden eines Betateilchens zu dem nicht mehr radioaktiven Heliumisotop He-3 (Abb. 2.09).



Die Zeit, nach der die Hälfte einer bestimmten Anzahl von Atomkernen zerfallen ist, wird Halbwertszeit ($T_{1/2}$) genannt. Sie ist für jedes Radionuklid eine charakteristische Größe.

Die Halbwertszeiten liegen zwischen vielen Milliarden Jahren und Sekundenbruchteilen (siehe Tab. 2.01 und Tab. 2.02). Eine sehr große Halbwertszeit besitzt beispielsweise Tellur-128 mit $7,7 \cdot 10^{24}$ Jahren, während für Radium-216m die Halbwertszeit nur $7 \cdot 10^{-9}$ Sekunden beträgt.

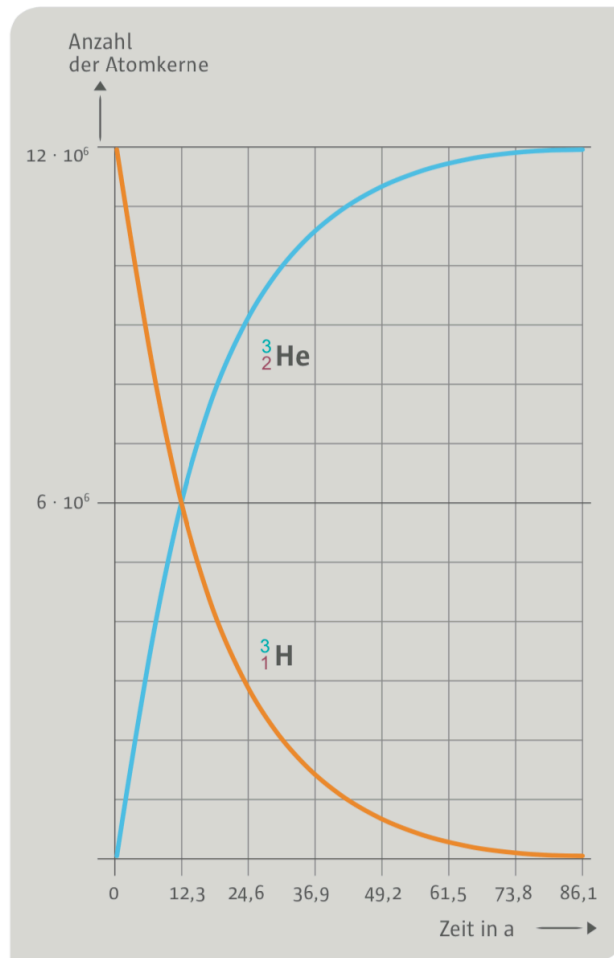




Abb. 2.08 (links)
Abklingen der Aktivität bei Tritium (Wasserstoff-3)
 radioaktiv
 nicht radioaktiv

Abb. 2.09
Anzahl radioaktiver Ausgangskerne (^3_1H) und nicht mehr radioaktiver Tochterkerne (^3_2He) in Abhängigkeit von der Zeit

Grundsätzlich können alle Atomkerne (Ausnahme H-1) gespalten werden. Bei bestimmten Uran- und Plutoniumisotopen ist aber die Spaltung mit Hilfe von Neutronen besonders leicht durchzuführen. Außerdem wird bei der Spaltung dieser Kerne mehr Energie frei als dafür aufgewendet werden muss (exotherme Reaktion). In der Natur kommen drei Uranisotope vor, U-234, U-235 und U-238. Sie sind Alphastrahler mit unterschiedlichen Halbwertszeiten (Tab. 4.01).

| Isotop | Halbwertszeit | Isotopenhäufigkeit |
|--------|----------------------|--------------------|
| U-234 | $2,455 \cdot 10^5$ a | 0,0054 % |
| U-235 | $7,038 \cdot 10^8$ a | 0,7204 % |
| U-238 | $4,468 \cdot 10^9$ a | 99,2742 % |

Alle drei Uranisotope haben zusätzlich die Eigenschaft (wie die meisten Transurane auch), sich spontan zu spalten. Die Spontanspaltung ergibt sich aus der Tatsache, dass bei schweren Atomkernen die Abstoßung zwischen den Protonen etwa so groß ist wie die zusammenhaltenden Kernkräfte. Die Stabilität solcher Kerne ist dadurch sehr geschwächt. Da Spontanspaltungen bei Uran sehr selten vorkommen, spielen sie für die Kerntechnik praktisch keine Rolle. Es werden deshalb hier nur Kernspaltungen beschrieben, die durch Neutronenbeschuss künstlich ausgelöst werden. Dabei verhalten sich die Uranisotope gegenüber Neutronenbeschuss unterschiedlich. Bei Uran-238 wird eine Spaltung nur selten erreicht und dann nur bei hoher Energie (Geschwindigkeit) der Neutronen. Die Kerne des Uran-235 lassen sich dagegen sehr viel leichter sowohl durch schnelle als auch durch thermische (langsame) Neutronen spalten. Mit langsamen Neutronen gelingt die Spaltung aber besonders leicht. Uran-234 spielt für Kernspaltungen wegen seines geringen Vorkommens in der Natur praktisch keine Rolle.

Bei den in Deutschland betriebenen Kernkraftwerken werden Kerne des Uran-235 (und z. T. auch des Plutonium-239) gespalten. Dafür braucht das Uran nicht als Element vorzuliegen. Es ist auch in Form chemischer Verbindungen (z. B. als UO_2) spaltbar. Eine Kernspaltung lässt sich durch eine Kernreaktionsgleichung beschreiben.



Trifft ein langsames (thermisches) Neutron auf einen Atomkern des Uran-235, wird es in den Kern aufgenommen (Abb. 4.01). Es entsteht ein hochangeregter Zwischenkern des Isotops Uran-236. Seine Lebensdauer beträgt nur etwa 10^{-14} s. Der neue Kern versucht, seine Anregungsenergie abzugeben. In etwa sechs von sieben Fällen tritt eine Spaltung ein, in einem Fall geht der Atomkern durch Aussenden eines Gammaquants in das langlebige Isotop Uran-236 über (Alphastrahler, $T_{1/2} = 2,342 \cdot 10^7$ a).

Die Spaltung kann man sich im Modell so vorstellen, dass nach dem Einfang des Neutrons der Urankern zu schwingen beginnt, sich ellipsenförmig verformt, hantelförmig einschnürt und letztlich in zwei mittelschwere Trümmerkerne sowie in zwei bis drei Neutronen zerfällt. An der Stelle der Einschnürung berühren sich nur wenige Nukleonen, so dass nur noch geringe Kernkräfte für den Zusammenhalt zur Verfügung stehen. Die abstoßenden elektrischen Kräfte zwischen den Protonen werden zwar mit zunehmender Entfernung etwas kleiner, sie bleiben aber insgesamt bestehen. Von einer bestimmten Einschnürung ab überwiegen sie schließlich und treiben die beiden Teile des Kerns auseinander. Außerdem überwiegt die Tendenz der Kernteilchen, sich zu kleineren Kernen zusammenzuballen, weil das energetisch günstiger ist.

Tab. 4.01 Die natürlichen Uranisotope

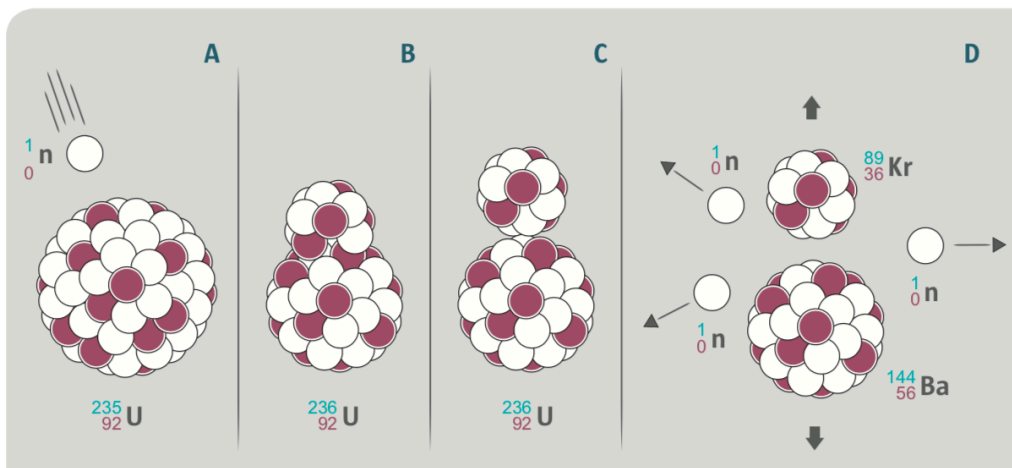


Abb. 4.01 Vier-Phasen-Modell zur Kernspaltung

Kettenreaktion im Uran-235

Hahn und Straßmann äußerten bereits in ihren beiden ersten Aufsätzen über die Kernspaltung die Vermutung, dass neben den beiden Spaltprodukten noch einige Neutronen entstehen müssten. Dies wurde von Forschern in Frankreich im März 1939 experimentell bestätigt. Damit hatte man die Möglichkeit erkannt, einen sich selbst erhaltenden Kernspaltungsprozess ablaufen zu lassen. Unter geeigneten Bedingungen können nämlich die freigesetzten Neutronen sofort weitere Uranatome spalten, so dass ein lawinenartig ablaufender Spaltprozess entsteht. Er wird allgemein als Kettenreaktion bezeichnet.

Abb. 4.03 zeigt den Beginn einer solchen Kettenreaktion im Modell. Geht man davon aus, dass nach jeder Spaltung zwei freie Neutronen zur Verfügung stehen (tatsächlich sind es im Mittel 2,4), sind es in den weiteren Schritten 4, 8, 16, 32, 64, 128 usw. Wenn genügend Urankerne vorhanden sind, keine Neutronen nach außen verloren gehen oder von Fremdatomen eingefangen werden, verdoppelt sich die Anzahl der Kernspaltungen von Neutronengeneration zu Neutronengeneration, der gesamte Vorgang läuft lawinenartig ab. Dabei werden ungeheure Mengen an Energie in kürzester Zeit frei.

Wenn man die Masse der Kernteilchen des Uran-235 und des primären Neutrons mit der Summe der Massen der Spaltprodukte und der sekundären Neutronen vergleicht, so ist nach der Kernspaltung ein geringer Massenverlust festzustellen. Dieser Verlust entspricht der bei der Spaltung frei werdenden Energie. Nach einem von Einstein 1905 formulierten Gesetz sind Masse

und Energie einander äquivalent. Es sind zwei Formen eines und desselben Phänomens. Masse lässt sich in Energie und Energie in Masse überführen. Das Gesetz lautet:

$$E = m \cdot c^2$$

(E: Energie, m: Masse, c: Lichtgeschwindigkeit)

Bei einer vollständigen Spaltung von 1 kg Uran-235 tritt ein Massenverlust von 1 g auf. Die Spaltprodukte und sekundären Neutronen haben nur noch eine Masse von 999 g. Die Masse von 1 g erscheint dann in Form von Energie:

$$1 \text{ g} = 10^{-3} \text{ kg} \quad c \approx 300.000 \text{ km/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$E = 10^{-3} \text{ kg} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$E = 9 \cdot 10^{13} \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2}$$

Es gilt:

$$1 \text{ N} = \frac{1 \text{ kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \quad \Rightarrow \quad 1 \text{ kg} = \frac{1 \text{ N} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$$

Daraus folgt:

$$E = 9 \cdot 10^{13} \frac{\text{N} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^2}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$$

$$E = 9 \cdot 10^{13} \text{ N m} = 9 \cdot 10^{13} \text{ J}$$

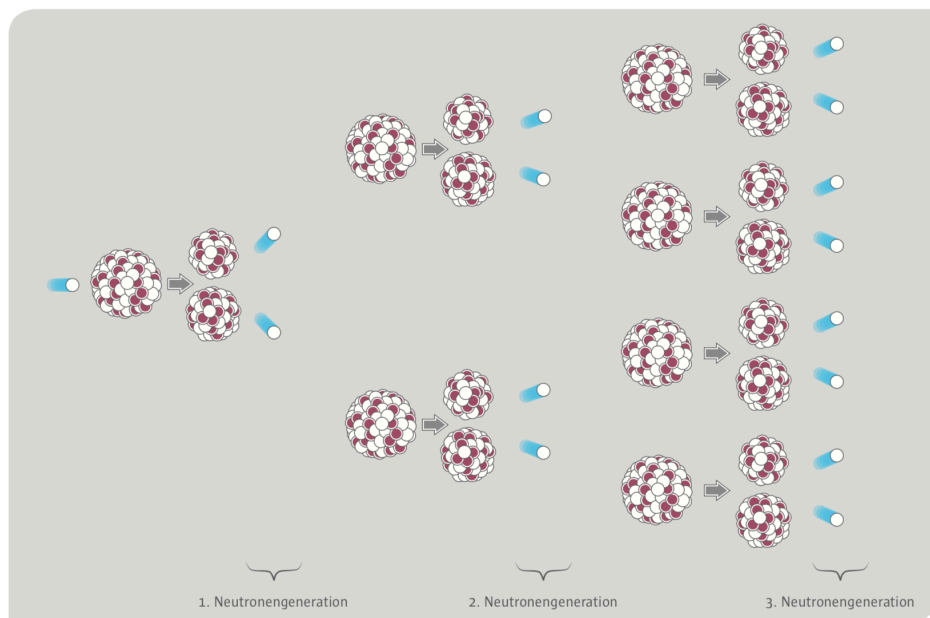


Abb. 4.03
Kettenreaktion im Uran-235

Anlagen, bei denen Kettenreaktionen kontrolliert ablaufen, bezeichnet man als Kernreaktoren oder kurz als Reaktoren. Sie bestehen im Prinzip aus fünf Komponenten (Abb. 5.01):

- Ausreichende Masse an spaltbarem Material,
- Stoff zur Abbremsung der Neutronen (Moderator), Ausnahme: Schneller Brutreaktor,
- Vorrichtungen zum Einfang von Neutronen (Steuer - bzw. Regelstäbe),
- Medium zur Wärmeabführung,
- Barrieren für den Strahlenschutz und die Rückhaltung radioaktiver Stoffe.

Nach dem Verwendungszweck können folgende Reaktortypen unterschieden werden:

- Forschungsreaktoren dienen der wissenschaftlichen Forschung sowie für Unterrichtszwecke. Dabei ist häufig nur die Neutronenstrahlung von Interesse.
- Leistungsreaktoren werden zur Erzeugung elektrischer Energie und als Brutreaktoren zusätzlich zur Erzeugung des Spaltstoffs Pu-239 aus U-238 verwendet.

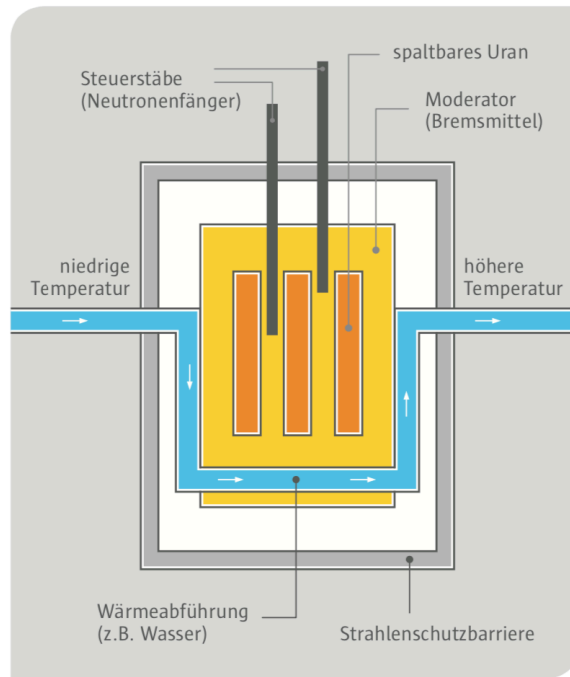


Abb. 5.01
Prinzip eines Kernreaktors