

11.2 Kernenergie

In Deutschland wird noch ca. 13% des gesamten Energiebedarfs durch Kernenergie aus Kernkraftwerken gedeckt (Stand 2018). Die Kernenergie dient der sog. Grundlaststromversorgung, das heißt sie liefert auch Strom, wenn zum Beispiel Solarenergie oder Windenergie nicht verfügbar ist. Kernenergie ist emissionsfrei, das heißt in Kernkraftwerken entsteht nicht das Treibhausgas CO₂. In vielen Ländern hat aus diesem Grund eine Renaissance der Kernenergie eingesetzt, das heißt dass dort verstärkt neue Kernkraftwerke gebaut werden (China, Indien, Finnland,...). Die friedliche Nutzung der Kernenergie ist jedoch insbesondere nach den Reaktorkatastrophen von Tschernobyl und Fukushima sehr kritisch zu betrachten, obwohl klimafreundliche Aspekte nicht von der Hand zu weisen sind.



[58] Kernkraftwerk Grafenrheinfeld

Im nachfolgenden Kapitel soll nun geklärt werden, wie Energie aus Atomkernen gewonnen werden kann und wie dies technisch realisiert wird.

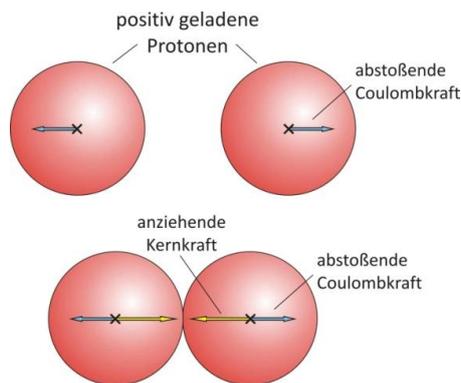
11.2.1 Kernkraft

Abgesehen vom chemischen Element Wasserstoff besitzt jedes andere chemische Element mehrere Protonen und Neutronen im Atomkern. Da alle Protonen im Atomkern positiv geladen sind, stoßen

sie sich gegenseitig ab. Die hierfür verantwortliche Coulombkraft wird umso stärker, je kleiner der Abstand zwischen den Protonen ist:

$$F_{Coulomb} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

Es stellt sich somit die Frage, warum Atomkerne mit mehreren Protonen stabil sein können und diese nicht sofort durch die Coulombkraft auseinander gerissen werden.



Die einzige Erklärung für die Stabilität der Atomkerne ist, dass innerhalb des Atomkernes eine zweite, noch stärkere Kraft wirkt, die die Atomkerne zusammenhält. Da diese anziehende Kraft nur unmittelbar im Kern auf die Nukleonen wirkt, wird sie mit Kernkraft F_K oder auch mit starker Wechselwirkung bezeichnet. Die Kernkraft ist neben der Gravitationskraft, der Coulombkraft und der schwachen Wechselwirkung eine der vier Grundkräfte im Universum. Sämtliche anderen Kräfte lassen sich auf diese vier Grundkräfte zurückführen.

Die Wirkung der Kernkraft kann man sich am Beispiel eines klebrigen Bonbons veranschaulichen: Befinden sich zwei sehr klebrige Bonbons in einem gewissen Abstand voneinander, so ziehen sich die Bonbons nicht gegenseitig an. Berühren sich die zwei Bonbons jedoch, so kleben sie aneinander fest und lassen sich nur noch schwer voneinander trennen. Die Klebewirkung der Bonbons beschränkt sich also genauso wie die Kernkraft nur auf den unmittelbaren Bereich um die Bonbons bzw. um die Kernteilchen.

Wesentliche Eigenschaften der Kernkraft:

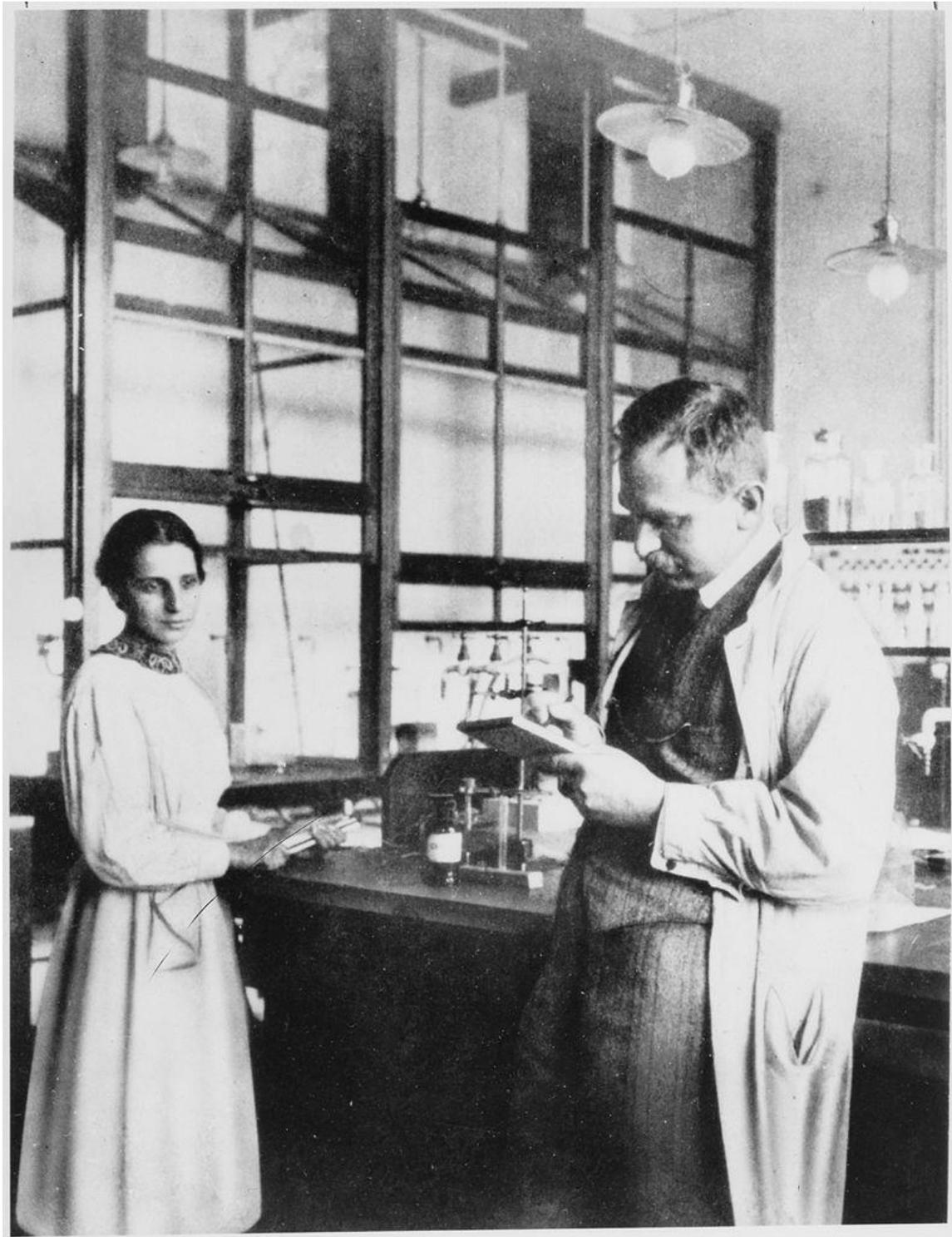
1. Die Kernkraft kompensiert die elektrostatische Abstoßung der Protonen im Atomkern:

$$F_K > F_{Coulomb}$$

2. Die Kernkraft wirkt nur direkt im Atomkern und hat nahezu keinen Einfluss auf Teilchen außerhalb des Kerns.
3. Die Kernkraft ist ladungsunabhängig. Das heißt sie wirkt sowohl zwischen Protonen und Protonen, Neutronen und Neutronen, als auch zwischen Protonen und Neutronen.
4. In großen Atomkernen wirkt die Kernkraft nur zwischen benachbarten Nukleonen.
5. Die Kernkraft ist eine der vier elementaren Grundkräfte, die das Universum zusammenhalten. Sie wird auch mit starker Wechselwirkung bezeichnet.

11.2.2 Entdeckung der Kernspaltung

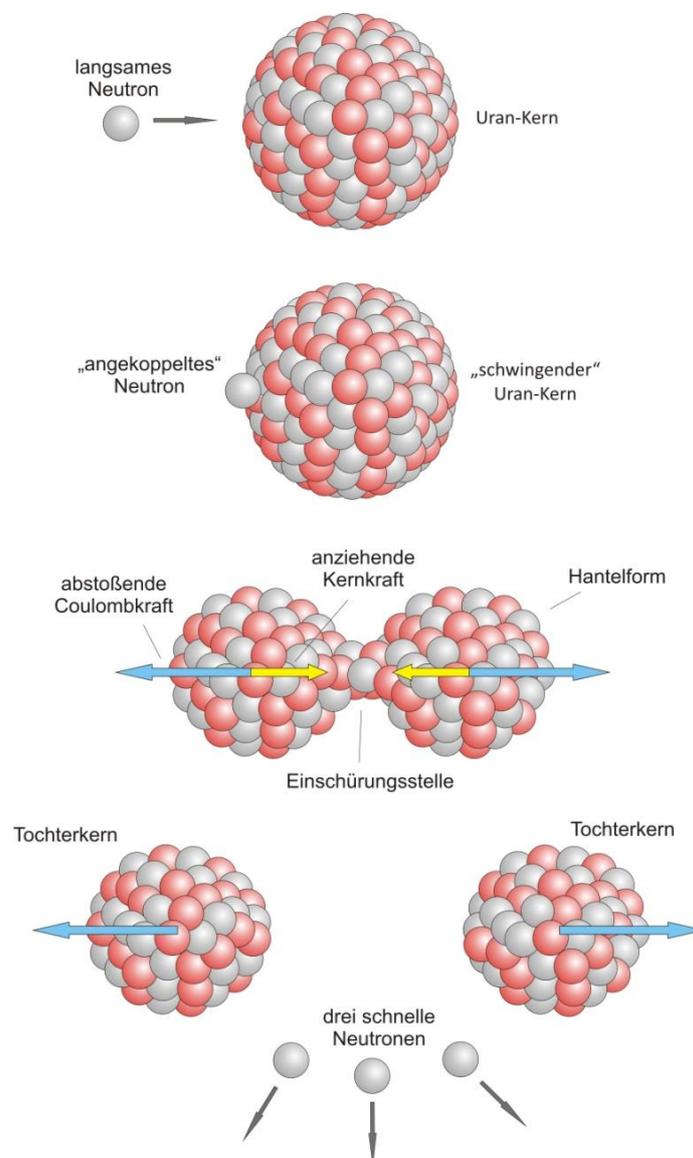
Die Atomkerne von allen chemischen Elementen werden durch die zwischen den Nukleonen wirkende Kernkraft zusammengehalten. Im Jahre 1938 gelang es dem deutschen Physiker Otto Hahn jedoch zum ersten Mal in der Geschichte der Menschheit diesen Zusammenhalt aufzuheben und einen Atomkern zu spalten.



[59] Otto Hahn mit Lise Meitner

Nach allem, was Otto Hahn über Kernphysik wusste, war dies jedoch unmöglich und so misstraute er zunächst seinen Messdaten. Weitere Messungen zeigten jedoch, dass bei Hahns Experimenten tatsächlich Atomkerne gespalten wurden. Es ist sehr bedauerlich, dass diese Entdeckung nur sieben Jahre später zur Entwicklung der ersten Atombombe (genauer: Kernspaltungsbombe) geführt hat. Im Folgenden soll nun geklärt werden, wie diese Spaltung von Atomkernen funktioniert:

In seinem Experiment beschoss Otto Hahn reines Uran-235 mit langsamen Neutronen. Da Neutronen elektrisch neutral sind, können sie sich ungehindert auf einen Urankern zubewegen. Treffen die Neutronen schließlich auf einen Atomkern so wirkt durch den direkten Kontakt mit dem Atomkern auf das Neutron die Kernkraft, so dass es an den Atomkern gebunden wird. Durch den Aufprall des Neutrons wird der gesamte Atomkern in Schwingung versetzt. Man kann sich den Atomkern in diesem Zustand wie einen großen schwingenden Wassertropfen vorstellen (Tröpfchenmodell).

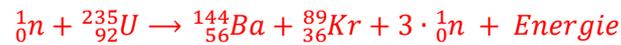


Durch die Schwingung kann der Atomkern eine „Hantelform“ annehmen, die durch eine Einschnürungsstelle mit nur wenigen Nukleonen charakterisiert ist. An dieser Einschnürungsstelle ist die Kernkraft aufgrund der geringen Anzahl an Nukleonen sehr gering, so dass die elektrostatische Abstoßung der beiden Hantelteile überwiegt. Die Einschnürungsstelle wird hierdurch immer enger

© M.Brennscheidt

bis sich die beiden Hantelteile vollständig voneinander trennen. Die dabei entstandenen Tochterkerne bewegen sich schließlich mit großer Geschwindigkeit voneinander weg. Zusätzlich entstehen bei diesem Vorgang drei freie Neutronen, die sich ebenfalls mit großer Geschwindigkeit voneinander entfernen.

Der obige Kernspaltungsprozess kann in Form einer Reaktionsgleichung zusammengefasst werden:



Da die kinetische Energie des langsamen Neutrons vor dem Kernspaltungsprozess wesentlich geringer ist als die kinetische Energie der Tochterkerne und der schnellen Neutronen nach der Kernspaltung wird bei der Kernspaltung Energie frei. Diese freiwerdende Energie wird in Kernkraftwerken dazu genutzt, um Wasser zu erhitzen und letztendlich, um elektrischen Strom zu erzeugen. Es bleibt jedoch zunächst unklar woher diese freiwerdende Energie kommt. Diese Frage wird im nächsten Kapitel beantwortet.

11.2.3 Massendefekt

Bei der Spaltung von Uran durch ein langsames Neutron wird der Urankern in zwei Tochterkerne und drei schnelle Neutronen zerlegt. Bei diesem Vorgang bleibt die Anzahl der Protonen und Neutronen erhalten. Das heißt, dass die Anzahl der Protonen und Neutronen vor der Kernspaltung gleich der Anzahl der Protonen nach der Kernspaltung ist. So beträgt die Anzahl der Protonen gemäß der obigen Reaktionsgleichung vor und nach der Spaltung $Z = 92$ und die Anzahl der Neutronen vor und nach der Spaltung $N = 144$. Da die Teilchenanzahl bei der Kernspaltung konstant bleibt müsste auch die Gesamtmasse der Nuklide vor und nach dem Spaltvorgang gleich sein. Dies ist jedoch nicht der Fall, wie die folgende Rechnung zeigt:

Masse vor der Kernspaltung:

$$m_{U-235} = 235,0439231u$$

$$m_n = 1,0086649u$$

$$\Rightarrow m_{\text{Vorher}} = 236,052588u$$

Masse nach der Kernspaltung:

$$m_{Ba-144} = 143,9229405u$$

$$m_{Kr-89} = 88,9176325u$$

$$3 \cdot m_n = 3,0259947u$$

$$\Rightarrow m_{\text{Nachher}} = 235,8665677u$$

Wie man sieht, ist die Gesamtmasse der Nuklide vor der Kernspaltung größer, als die Gesamtmasse der Nuklide nach der Kernspaltung. Bei der Kernspaltung ist also scheinbar Masse verloren gegangen. Es ergibt sich eine Massendifferenz von:

$$\Delta m = m_{\text{vorher}} - m_{\text{nachher}} = 0,1860203u$$

Eine Erklärung für diesen Masseverlust liefert Einsteins Relativitätstheorie, wonach Energie und Masse äquivalent zueinander sind. Der Massendifferenz Δm entspricht demnach der Energiebetrag

$$E_{\text{Kern}} = \Delta m \cdot c^2$$

der bei der Spaltung des Urankerns frei wird. Die Energie E_{Kern} kann mit Kernenergie bezeichnet werden, um Verwechslungen mit der später eingeführten Bindungsenergie zu vermeiden. Beim obigen Spaltvorgang wird somit die Energie

$$\begin{aligned} E_{\text{Kern}} &= 0,1860203u \cdot c^2 \\ &= 2,7762 \cdot 10^{-11} \text{J} \end{aligned}$$

frei. Der am Beispiel von Uran berechnete Massendefekt lässt sich nun wie folgt verallgemeinern:

Die Masse eines Atomkerns m_K ist stets kleiner als die Summe der Massen seiner Z Protonen und N Neutronen. Die Differenz

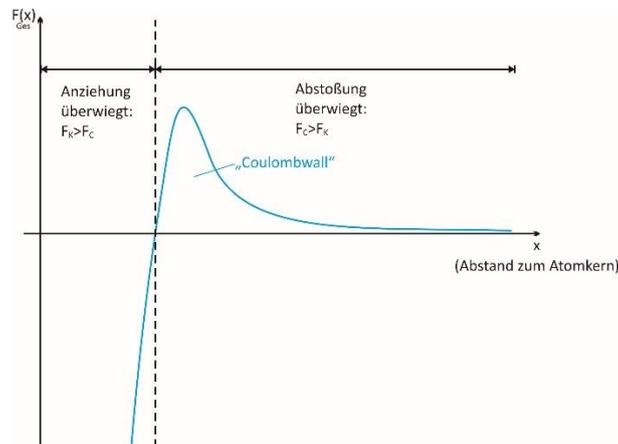
$$\Delta m = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n) - m_K$$

bezeichnet man als Massendefekt des Atomkerns.

Da es bei den oben erwähnten Begriffen Kernenergie und Bindungsenergie häufig zu Missverständnissen und Falschvorstellungen kommt, sollen diese nun im Folgenden genauer erläutert werden.

11.2.4 Bindungsenergie

Möchte man in Gedanken einen Atomkern aus seinen einzelnen Nukleonen zusammensetzen, so muss im Falle der Protonen zunächst die elektrostatische Abstoßung (Coulombabstoßung) überwunden werden, bis diese in den Bereich der Anziehung der starken Wechselwirkung (Kernkraft) gelangen, die der Abstoßung der Protonen entgegenwirkt.

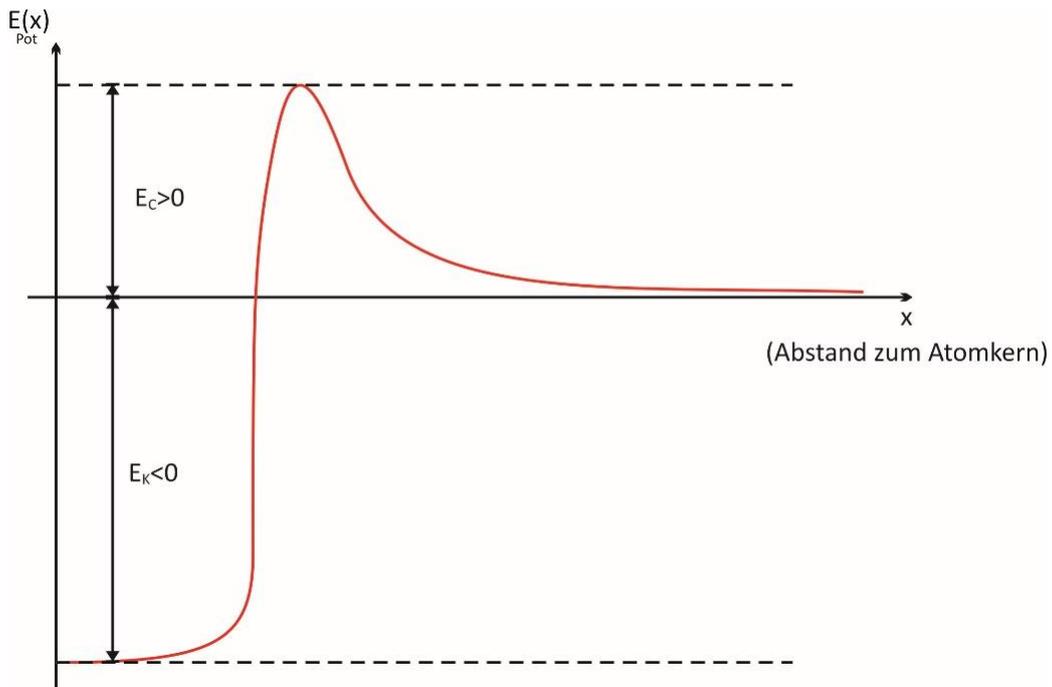


Bei sehr kleinen Abständen überwiegt die Anziehung gegenüber der Abstoßung und die Nukleonen werden aneinandergebunden.

Betrachtet man diesen Vorgang aus energetischer Sicht, so muss zunächst eine bestimmte Menge an Energie aufgewendet werden, um entgegen der Coulombabstoßung aus einzelnen Nukleonen einen Atomkern zusammensetzen zu können. Ein Beispiel hierfür ist die Kernfusion, die im Inneren der Sonne abläuft. Dort können einzelne Protonen nur zu neuen Elementen (z.B. Helium) fusioniert werden, wenn diese eine sehr hohe kinetische Energie besitzen. Derart hohe Energien besitzen die Protonen jedoch nur im Inneren der Sonne, aufgrund der dort vorherrschenden sehr hohen Temperaturen (ca. 15 Mio. °C) und nicht an relativ kühlen der Sonnenoberfläche (ca. 6000°C). Die Kernfusion findet also nur im Sonneninneren statt.

Es hat dabei auf den ersten Blick den Anschein, dass für die Zusammensetzung von mehreren Nukleonen zu einem Atomkern Energie benötigt wird und diese Energie dann gewissermaßen als Bindungsenergie in den Atomen gespeichert ist. Letztere Vorstellung ist schlicht und ergreifend falsch und muss an dieser Stelle ausgeräumt werden. So würde in diesem Fall im Inneren der Sonne keine Energie freigesetzt werden, sondern große Mengen an Energie durch die Kernfusion verloren gehen. Dies steht jedoch im Widerspruch zur Realität, in der die Sonne und alle anderen Sterne große Mengen an Energie freisetzen. Es stellt sich somit die Frage, woher diese freigesetzte Energie kommt.

Betrachtet man anstelle der resultierenden Kräfte das Potential, also die potentielle Energie der Protonen in Abhängigkeit vom Abstand zum Atomkern, so lässt sich ein ähnlicher grafischer Verlauf beobachten, wie im obigen Kräftediagramm:



Es ist zu erkennen, dass die potentielle Energie eines Protons zunächst ansteigt, wenn es sich einem Atomkern nähert. Dies geschieht analog zur potentiellen Energie eines Wanderers, welche zunimmt, wenn er einen Berg hinaufsteigt. Nach dem Überschreiten des Coulombwalls nimmt die potentielle Energie des Protons aber aufgrund der nun anziehenden Kernkräfte ab, je näher es dem Atomkern kommt und nimmt schließlich stark negative Werte an. Insgesamt gibt das Proton hierdurch mehr Energie ab, als zur Überwindung des Coulombabstoßung benötigt war.

Auch hier hilft zum Verständnis die Analogie zu einer Wanderung: Ein Wanderer startet seine Wanderung auf einer Berghütte. Da die Berghütte der Ausgangspunkt seiner Wanderung ist, stellt diese das Nullniveau seiner potentiellen Energie am Tag seiner Wanderung dar. Von der Berghütte aus, steigt der Wanderer nun auf einen Berg, so dass seine potentielle Energie zunimmt und positive Werte annimmt. Nachdem er die Spitze des Berges erreicht hat, steigt der Wanderer auf der anderen Seite des Berges hinab ins Tal. Beim Abstieg verliert er seine potentielle Energie, sodass er unten im Tal angekommen, im Bezug zum Ausgangspunkt seiner Wanderung auf der Berghütte, eine negative potentielle Energie besitzt. Beträgt die Höhendifferenz von der Berghütte zum Gipfel beispielsweise 500m und die Höhendifferenz vom Gipfel bis ins Tal 2000m, so hat der Wanderer betraglich auf seiner Wanderung mehr potentielle Energie verloren, als er durch seinen Aufstieg auf den Gipfel hinzugewonnen hat.

Analog dazu steigt die potentielle Energie eines Protons als zunächst, wenn es sich dem Atomkern nähert, nimmt jedoch danach negative Werte an, so dass es bei der Bindung an den Atomkern insgesamt Energie verliert bzw. abgibt hat.

Unter der Bindungsenergie eines Atomkerns versteht man deshalb diejenige Energiemenge, die bei der Fusion von Z einzelnen Protonen und N einzelnen Neutronen freigesetzt wird. Grundsätzlich besitzen deshalb sämtliche Atomkerne weniger Energie, als die Summe ihrer einzelnen Bestandteile.

Anmerkung: An dieser Stelle muss genau auf die obige Formulierung geachtet werden. Die Bindungsenergie wird im Vergleich zur Energie von einzelnen vorliegenden Nukleonen angegeben. Dieser Punkt ist sehr wichtig, da die obige Definition im Umkehrschluss nicht bedeutet, dass bei der Fusion von beliebigen bereits gebildeten Atomkernen Energie frei wird. Dies ist explizit ab Atomkernen mit einer Massenzahl, die größer als die Massenzahl von Eisen ist, nicht mehr möglich, wie die nachfolgenden Überlegungen zeigen.

Im Folgenden soll nun eine allgemeine Formel zur Berechnung der Bindungsenergie von Atomkernen hergeleitet werden (Hinweis: Die Elektronen in der Atomhülle werden hier zur Vereinfachung der Rechnung vernachlässigt. Bei einer genauen Rechnung müssten diese mitberücksichtigt werden.):

Wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, besitzen die einzelnen Nukleonen in Summe eine größere Masse als ein aus der gleichen Anzahl an Nukleonen zusammengesetzter Atomkern. Die Massendifferenz (Massendefekt) kann mit der Formel

$$\Delta m = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n) - m_K$$

berechnet werden.

Gemäß Einsteins Energie-Masse-Äquivalenz kann die Gleichung des Massendefekts in eine Energiebilanz umgewandelt werden:

$$\Delta m \cdot c^2 = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n) \cdot c^2 - m_K \cdot c^2$$

Diese gibt nun die Bindungsenergie an, die beim Zusammensetzen eines Atomkerns aus seinen einzelnen Kernbausteinen frei wird.

$$E_B = \Delta m \cdot c^2 = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n) \cdot c^2 - m_K \cdot c^2$$

In der Literatur wird in der Regel nicht die Bindungsenergie der einzelnen Atomkerne angegeben. Stattdessen wird häufig der Quotient aus der Bindungsenergie eines Atomkerns und der Anzahl der Nukleonen gebildet. So erhält man die sog. Bindungsenergie pro Nukleon:

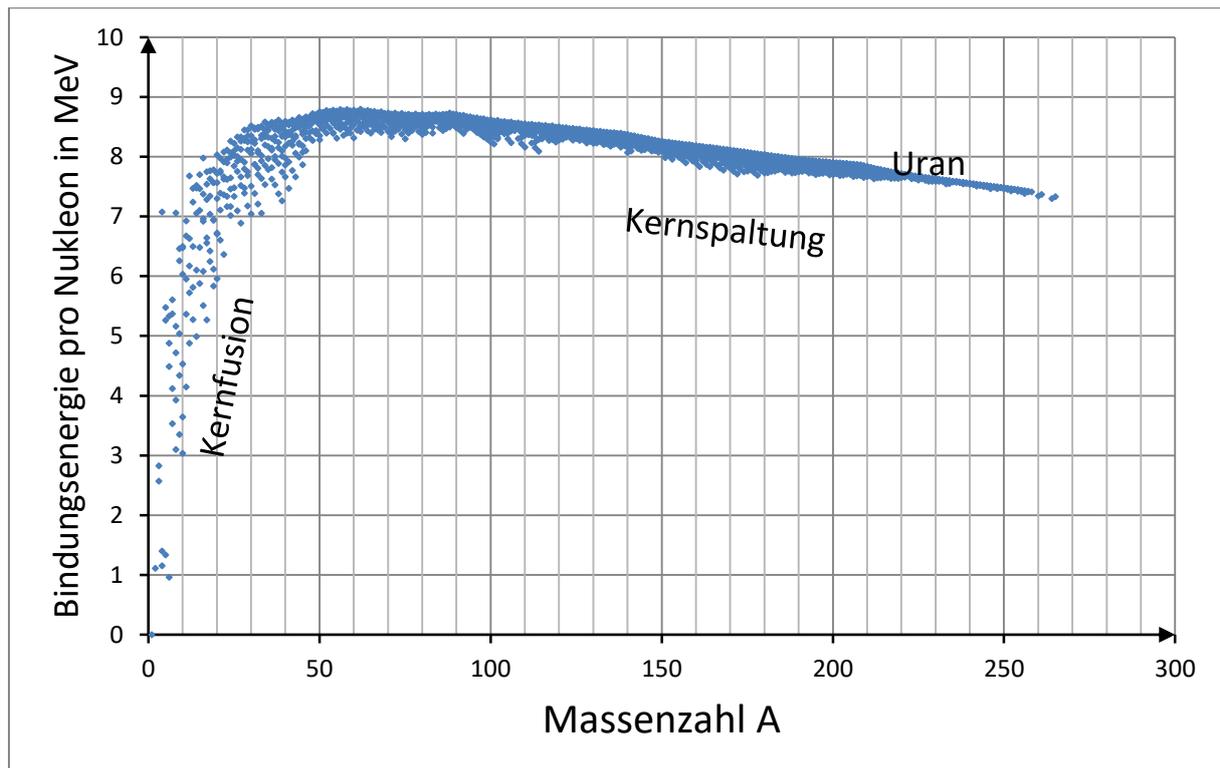
$$\frac{E_B}{A} = \frac{(Z \cdot m_p + N \cdot m_n) \cdot c^2 - m_K \cdot c^2}{A}$$

Die Bindungsenergie pro Nukleon gibt an, welche Energie bei der Bildung des Atomkerns aus seinen einzelnen Kernbausteinen pro Nukleon freigeworden ist. Sie ist je nach Größe des Atomkerns unterschiedlich. So ist die Bindungsenergie pro Nukleon bei kleinen Atomkernen wie Deuterium ($H - 2$) oder Tritium ($H - 3$) sehr gering, da die Kernkraft hier nur zwischen zwei bzw. drei Nukleonen wirkt und somit das negative Potential der Nukleonen relativ gering ist.

Bei mittelgroßen Atomkernen mit einer Massenzahl von $50u$ bis $60u$ ist die Bindungsenergie pro Nukleon maximal. Hier sind die Nukleonen im Durchschnitt von vielen weiteren Nukleonen umgeben, die durch die Kernkraft aneinandergebunden werden. Kerne in dieser Größenordnung besitzen ein maximales negatives Potential. Aus diesem Grund sind Atomkerne in dieser Größenordnung besonders stabil und man würde sehr viel Energie benötigen, um derartige Atome wieder in ihre

einzelnen Bestandteile zu zerlegen. Eines der stabilsten Elemente mit einer sehr hohen Bindungsenergie pro Nukleon ist Eisen ($Fe - 56$).

Betrachtet man noch größere Atomkerne, so nimmt die Bindungsenergie der Nukleonen wieder ab, da die Kernkraft nur zwischen direkt benachbarten Nukleonen wirkt. Die elektrostatische Abstoßung der Protonen ist bei sehr großen Atomkernen prozentual größer, da diese im Gegensatz zur Kernkraft über den ganzen Kern hinweg wirksam ist. Das negative Potential nimmt deshalb hier betraglich mit zunehmender Größe der Atomkerne wieder ab. Sehr große Atomkerne sind somit instabil. Trägt man die Bindungsenergie pro Nukleon in einem Diagramm auf, so ergibt sich der folgende Kurvenverlauf:



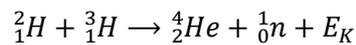
Im linken Bereich des Diagramms steigt die Kurve mit zunehmender Massenzahl an. Elemente in diesem Bereich können bei Energiegewinnung durch Kernfusion verwendet werden. Im rechten Bereich des Diagramms nimmt die Kurve langsam wieder ab. Elemente aus diesem Bereich werden mit zunehmender Massenzahl instabil und können deshalb bei der Energiegewinnung durch Kernspaltung verwendet werden.

Im folgenden Kapitel wird nun die Energiebilanz bei der Kernfusion und bei der Kernspaltung explizit an zwei Beispielen genauer betrachtet.

11.2.5 Energiebilanz bei der Kernfusion und bei der Kernspaltung

1. Kernfusion:

Im Inneren der Sonne fusionieren vereinfacht dargestellt die beiden Wasserstoffisotope Deuterium (2_1H) und Tritium (3_1H) zum schwereren Element Helium (4_2He). Dabei werden ein Neutron und eine große Menge an Kernenergie E_K freigesetzt:



Betrachtet man zunächst die Massenbilanz der Reaktionsgleichung, so ergibt sich der folgende Massendefekt:

$$m_{\text{vorher}} = m_{H-2} + m_{H-3} = 2,01355u + 3,01550u = 5,02905u$$

$$m_{\text{nachher}} = m_{He-4} + m_n = 4,00151u + 1,00866u = 5,01017u$$

$$\Rightarrow \Delta m = m_{\text{vorher}} - m_{\text{nachher}} = 5,02905u - 5,01017u = 0,01888u$$

Die Massendifferenz wird gemäß Einsteins Energie-Masse-Äquivalenz in Energie umgewandelt:

$$E_K = \Delta m \cdot c^2 = 2,818 \cdot 10^{-12}J \approx 17,6MeV$$

Eine andere Möglichkeit die freiwerdende Energie zu berechnen, bietet die Betrachtung der Bindungsenergien, wie die folgende Rechnung zeigt:

Wichtig: Da die Bindungsenergie bei der Entstehung der an der Kernfusion beteiligten Elemente, wie zum Beispiel Deuterium und Tritium bereits frei geworden ist, steht diese nicht mehr für die Energiegewinnung zur Verfügung. Die Bindungsenergie pro Nukleon wird deshalb mit einem negativen Vorzeichen versehen. Es ist an dieser Stelle unbedingt auf eine Unterscheidung zwischen der freiwerdenden Kernenergie und der Bindungsenergie pro Nukleon zu achten. Beide Energieformen hängen zwar zusammen, können jedoch keinesfalls einfach miteinander gleichgesetzt werden.

Deuterium besteht aus zwei Nukleonen (1 Proton und 1 Neutron) mit einer Bindungsenergie von $-1,113MeV$ pro Nukleon. Tritium besteht aus drei Nukleonen (1 Proton und 2 Neutronen) und besitzt dementsprechend eine betragslich höhere Bindungsenergie pro Nukleon von $-2,827MeV$.

Die Gesamtenergie vor der Kernfusion beträgt somit:

$$E_{\text{Vorher}} = 2 \cdot (-1,113MeV) + 3 \cdot (-2,827MeV) = -10,707MeV$$

Helium besteht aus insgesamt aus vier Nukleonen (2 Protonen und 2 Neutronen) die jeweils eine Bindungsenergie von $-7,074MeV$ pro Nukleon besitzen. Die Bindungsenergie eines freien Neutrons ist gleich Null, da es sich bei der Kernfusion vom Atomkern gelöst hat.

Die Gesamtenergie nach der Kernfusion beträgt somit:

$$E_{Nachher} = 4 \cdot (-7,074 \text{ MeV}) + 0 \text{ MeV} = -28,296 \text{ MeV}$$

Zur Berechnung der bei der Kernfusion freigesetzten Energie (Kernenergie) wird nun die Differenz der Bindungsenergien bestimmt:

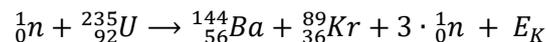
$$E_K = E_{Vorher} - E_{Nachher} = (-8,481 \text{ MeV}) - (-28,296 \text{ MeV}) = +17,589 \text{ MeV}$$

Dieser Wert stimmt sehr gut mit dem aus dem Massendefekt berechneten Energiebetrag überein.

Die bei der Kernfusion freiwerdende Energie resultiert also daraus, dass die Summe der Bindungsenergien der Kerne vor der Fusion größer (also weniger negativ) als die Summe der Bindungsenergien der Kerne nach der Fusion (negativer) ist.

2. Kernspaltung:

In einem Kernreaktor wird das Uranisotop Uran-235 mit einem langsamen Neutron beschossen. Dabei spaltet sich der Urankern in die Isotope Barium-144 und Krypton-89. Zusätzlich werden noch drei Neutronen und große Menge an Kernenergie E_K freigesetzt:



Betrachtet man erneut die Massenbilanz der Reaktionsgleichung, so ergibt sich der folgende Massendefekt:

$$m_{vorher} = m_{U-235} + m_n = 235,0439231u + 1,0086649u = 236,052588u$$

$$\begin{aligned} m_{nachher} &= m_{Ba-144} + m_{Kr-89} + 3 \cdot m_n \\ &= 143,9229405u + 88,9176325u + 3,0259947u = 235,8665677u \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \Delta m = m_{vorher} - m_{nachher} = 236,052588u - 235,8665677u = 0,1860203u$$

Auch hier wird die Massendifferenz gemäß Einsteins Energie-Masse-Äquivalenz in Energie umgewandelt:

$$E_K = \Delta m \cdot c^2 = 2,7762 \cdot 10^{-11} \text{ J} \approx 173 \text{ MeV}$$

Betrachtet man nun die Bindungsenergien, so besitzt das verwendete Uranisotop 235 Nukleonen mit einer Bindungsenergie von $-7,591 \text{ MeV}$ pro Nukleon. Krypton besitzt 89 Nukleonen mit einer Bindungsenergie von $-8,617 \text{ MeV}$ pro Nukleon und Barium mit 144 Nukleonen eine Bindungsenergie von $-8,265 \text{ MeV}$ pro Nukleon. Die Bindungsenergie der bei der Kernspaltung auftretenden freien Neutronen beträgt erneut Null. Es ergibt sich somit die folgende Energiebilanz:

$$E_{vorher} = 235 \cdot (-7,591 \text{ MeV}) + 1 \cdot 0 \text{ MeV} = -1783,885 \text{ MeV}$$

$$E_{nachher} = 89 \cdot (-8,617 \text{ MeV}) + 144 \cdot (-8,265 \text{ MeV}) + 3 \cdot 0 \text{ MeV} = -1957,073 \text{ MeV}$$

Die freiwerdende Kernenergie beträgt schließlich:

$$E_K = E_{vorher} - E_{nachher} = (-1783,885\text{MeV}) - (-1957,073\text{MeV}) = +173,188\text{MeV}$$

Auch dieser Wert stimmt gut mit dem aus dem Massendefekt berechneten Energiebetrag überein.

Die bei der Kernspaltung freiwerdende Energie resultiert also genau wie bei der Kernfusion daraus, dass die Summe der Bindungsenergien der Kerne vor der Spaltung größer (also weniger negativ) als die Summe der Bindungsenergien der Kerne nach der Spaltung (negativer) ist.

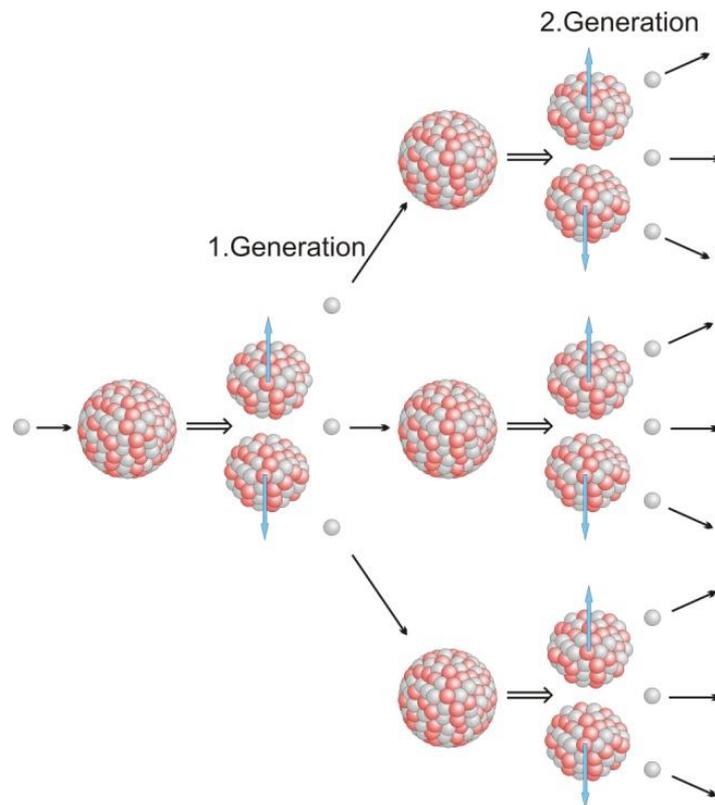
An dieser Stelle wird deutlich, warum nur mit leichten Elementen, mit einer Nukleonenzahl kleiner als der von Eisen, ausschließlich Energiegewinnung durch Kernfusion möglich ist und bei Elementen mit einer Nukleonenzahl größer als der von Eisen Energie nur durch Kernspaltung gewonnen kann.

So hätten bei der Kernspaltung eines leichten Elements, wie zum Beispiel Kohlenstoff, die Bindungsenergien vor der Spaltung in Summe einen niedrigeren Wert (negativer) als die Summe der Bindungsenergien nach der Spaltung (weniger negativ). Bei der Spaltung von Kohlenstoff würde deshalb keine Energie freigesetzt werden, sondern im Gegenteil Energie für die Spaltung benötigt.

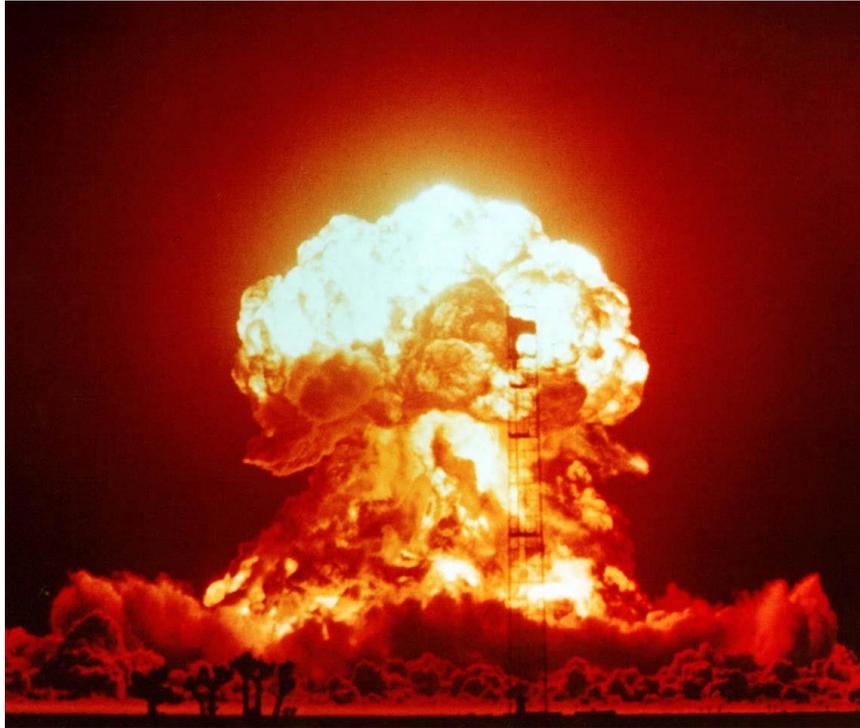
Eine umgekehrte Argumentation kann für die Kernfusion von schwereren Elementen angeführt werden. Auch hier würde bei der Kernfusion keine Energie freigesetzt werden, sondern im Gegenteil Energie für die Kernfusion benötigt.

11.2.6 Kontrollierte Kettenreaktion

In einem Kernreaktor werden Atomkerne des chemischen Elements Uran-235 durch Beschuss mit langsamen Neutronen gespalten, wobei große Mengen Energie freigesetzt werden. Bei jeder einzelnen Kernspaltung entstehen neben den Tochterkernen drei freie Neutronen, die nun ihrerseits drei weitere Urankerne spalten können. Auf diese Weise wird bei jedem weiteren Kernspaltungsprozess die Anzahl der Neutronen verdreifacht. Würde man diesen Vorgang unkontrolliert ablaufen lassen, so würde innerhalb kürzester Zeit eine immer größere Menge an Urankernen gespalten. Man spricht in diesem Fall von einer unkontrollierten Kettenreaktion.



Eine derartige Kettenreaktion wird bei der Zündung von Kernwaffen angewandt, bei der eine große Menge Uran-235 innerhalb von kürzester Zeit gespalten wird. Die dabei freiwerdende Energie liefert ein enormes Zerstörungspotential, wie am Beispiel des Abwurfs der ersten „Atombombe“ (umgangssprachlich für Kernwaffen) über Hiroshima deutlich wurde.



[60] Atombombe



[61] Stadtzentrum von Hiroshima nach dem Abwurf der ersten Atombombe

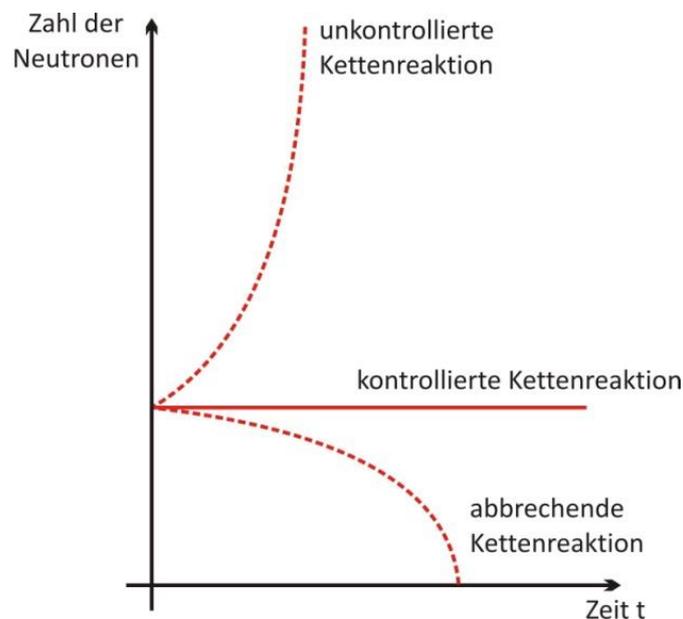
Eine unkontrollierte Kettenreaktion kann nur auftreten, wenn zwei Voraussetzungen erfüllt sind:

1. Für eine unkontrollierte Kettenreaktion muss reines Uran-235 vorliegen. Dieses Uran-Isotop ist jedoch sehr selten und kommt nur zu 0,7% in natürlichem Uran vor. Im Gegensatz dazu ist das Uranisotop U-238 in der Natur viel häufiger anzutreffen. Sein Anteil an natürlichem Uran beträgt durchschnittlich 99,3%. Im Gegensatz zu U-235 ist U-238 nicht für die Kernspaltung

geeignet, da sich langsame Neutronen an den Atomkernen des Uran-238 lediglich anlagern, ohne diese zu spalten.

2. Für eine unkontrollierte Kettenreaktion muss eine ausreichend große Menge an U-235 vorhanden sein, da bei geringen Mengen Uran die Neutronen das Uran direkt durch seine Oberfläche verlassen, ohne dass es zu weiteren Kernspaltungen kommt. In der Kernphysik spricht man deshalb von der sog. kritischen Masse, ab der eine unkontrollierte Kettenreaktion stattfinden kann.

Die unkontrollierte Kettenreaktion zeigt deutlich, welches enorme Potential die Spaltung von Atomkernen besitzt, aber gleichzeitig auch welche riesige Gefahr von der Kernspaltung ausgeht. Um zu verhindern, dass auch in einem Kernkraftwerk bei der Kernspaltung eine unkontrollierte Kettenreaktion abläuft, müssen zwei der drei bei der Kernspaltung frei werdenden Neutronen abgefangen werden. Man spricht in diesem Fall von einer kontrollierten Kettenreaktion. Bei einer kontrollierten Kettenreaktion bleibt die Anzahl der Kernspaltungen, die pro Sekunde stattfinden über einen längeren Zeitraum konstant.



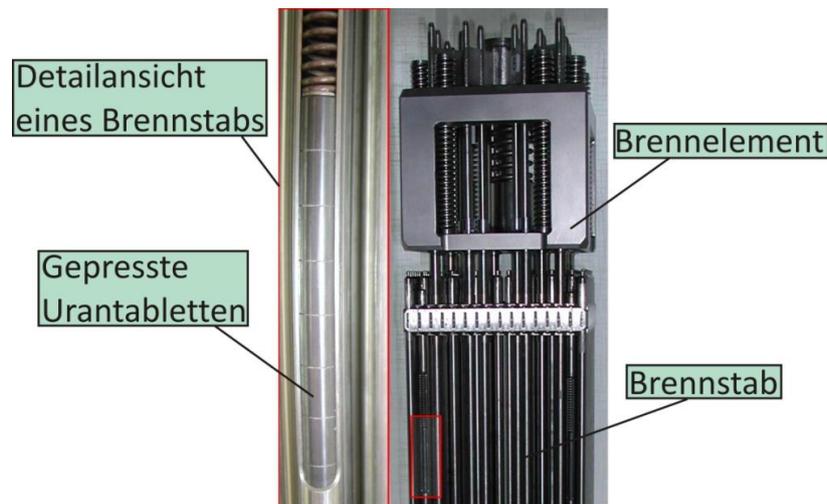
Beim Bau eines Kernkraftwerks ist deshalb darauf zu achten, dass die oben beschriebenen Bedingungen für eine unkontrollierte Kettenreaktion möglichst nicht vorliegen. So befindet sich beispielsweise in den Kernbrennstäben neben U-235 ein großer Prozentsatz von U-238, das die bei der Kernspaltung entstehenden überzähligen Neutronen „abfängt“.

So wird in Kernkraftwerken kein reines Uran-235 verwendet, sondern sog. angereichertes Uran. Angereichertes Uran besitzt im Gegensatz zu natürlichem Uran einen etwas höheren Anteil an U-235:

Natürliches Uran:	99,3% Uran-238	0,7% Uran-235
Angereichertes Uran:	97% Uran-238	3% Uran-235

Obwohl die Konzentration von Uran-235 in den Kernbrennstäben von Kernkraftwerken trotz Anreicherung immer noch sehr gering ist, kann es auch dort unter sehr ungünstigen Umständen zu einer unkontrollierten Kettenreaktion kommen. Diese kann jedoch niemals so ungehemmt ablaufen wie in einer Atombombe. Die Zerstörungskraft einer Kettenreaktion in einem Kernkraftwerk würde jedoch dazu ausreichen um das Reaktorgebäude eines Kernkraftwerks zu zerstören und somit die Umgebung des Kernkraftwerks radioaktiv zu kontaminieren. Im Gegensatz zu den Brennstäben in Kernkraftwerken wird bei Kernwaffen sog. hochangereichertes Uran verwendet. Dieses besitzt eine Uran-235 Konzentration von ca. 85%.

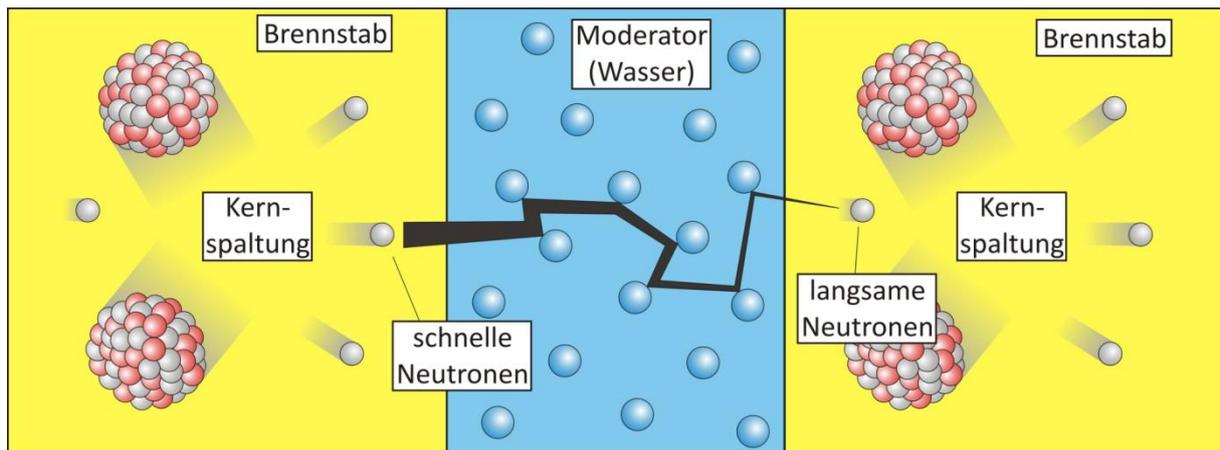
Die in Kernkraftwerken verwendeten Brennelemente bestehen aus durchschnittlich 200 einzelnen Brennstäben in denen sich der Kernbrennstoff in Form von gepressten Tabletten befindet.



[62] Brennelement

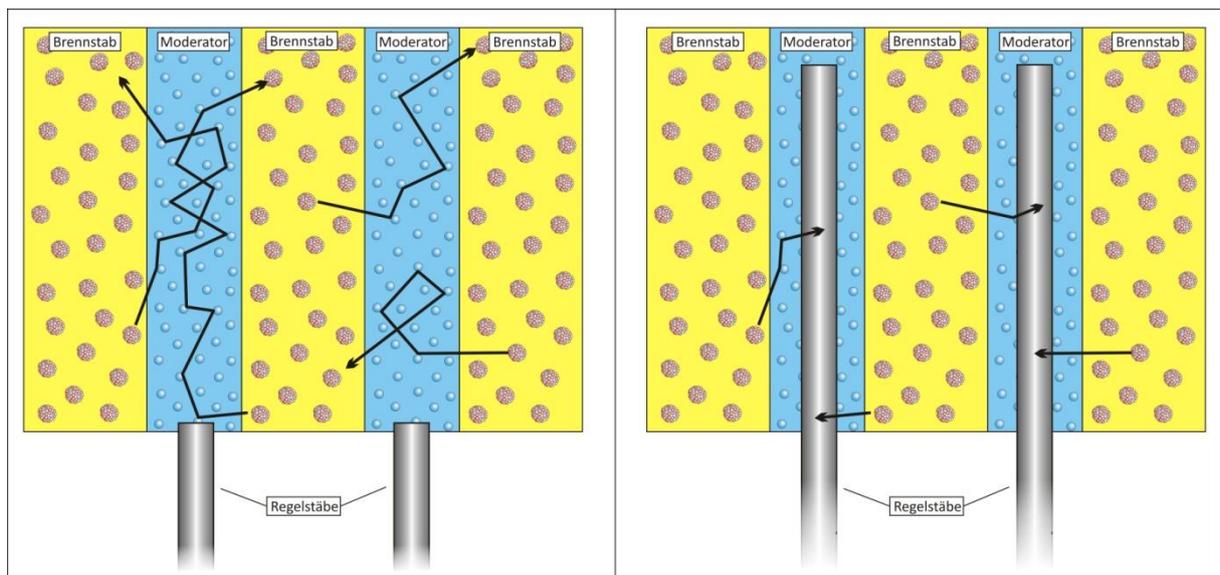
Die Brennelemente wiederum befinden sich in einem großen Wasserbehälter. Das Wasser führt die bei der Kernspaltung freiwerdende Energie ab und treibt stark vereinfacht dargestellt Turbinen zur Stromerzeugung an. Neben der Energieaufnahme besitzt das Wasser jedoch noch eine zweite wesentliche Funktion:

Die bei der Kernspaltung freiwerdenden Neutronen besitzen eine sehr hohe Geschwindigkeit. Sie können nicht direkt für weitere Kernspaltungen verwendet werden, da hierfür langsame Neutronen benötigt werden. Im Wasser stoßen die schnellen Neutronen jedoch elastisch gegen die Wassermoleküle und geben dabei einen Teil ihrer kinetischen Energie und damit ihrer Geschwindigkeit ab. Erst danach können die Neutronen weitere Atomkerne spalten. Da das Wasser die Geschwindigkeit der Neutronen bremst, bezeichnet man das Wasser in einem Kernreaktor als Moderator (lat. moderare - mäßigen).



Würde bei einem hypothetischen Unfall das Wasser im Kernreaktor verdampfen oder ablaufen, so würde die kontrollierte Kettenreaktion direkt gestoppt, da die bei weiteren Kernspaltungsprozessen entstehenden Neutronen nicht mehr auf die für die Kernspaltung erforderliche Geschwindigkeit abgebremst würden. Deutsche Kernkraftwerke in denen Wasser als Moderator verwendet wird gelten aus diesem Grund als relativ sicher und stehen im Gegensatz zu Kernkraftwerken russischer Bauart bei denen häufig Graphitblöcke als Moderator verwendet werden, die bei einem Unfall mit den Brennelementen verschmelzen könnten (Unfall von Tschernobyl).

Um die Anzahl der Neutronen im Kernreaktor zeitlich konstant zu halten setzt man dem Wasser Borsalze zu, da das chemische Element Bor ein sog. Absorber für Neutronen ist. Ähnlich wie beim Uran-238 können sich auch an den Atomkernen der Borsalze Neutronen anlagern, die dann nicht mehr für eine weitere Kernspaltung zur Verfügung stehen. Durch eine Veränderung der Bor-Konzentration im Kühlwasser kann somit die Kernreaktionsrate im Reaktor langsam beeinflusst werden.



Um die Reaktionsrate im Reaktor innerhalb von kurzer Zeit variieren zu können, befinden sich in jedem Brennelement sog. Regelstäbe, die zwischen die einzelnen Brennstäbe geschoben werden können. Diese Brennstäbe bestehen in der Regel aus Cadmium, einem guten Neutronenabsorber. Im Falle eines technischen Defekts oder eines Unfalls können diese Regelstäbe innerhalb von kürzester

© M.Brennscheidt

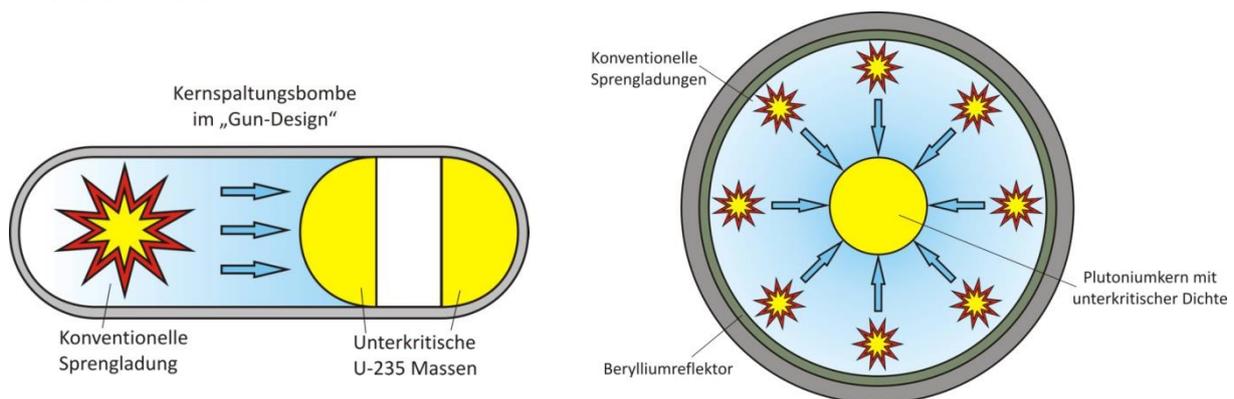
Zeit vollständig zwischen die Brennelemente gefahren werden, so dass die Kettenreaktion zum Erliegen kommt.

11.2.7 Funktionsweise von Kernwaffen

Kernwaffen, umgangssprachlich auch „Atombomben“ genannt gehören zu den schlimmsten Waffen die der Mensch jemals erfunden hat. Albert Einstein antwortete auf die Frage, mit welchen Waffen der Dritte Weltkrieg geführt werde: „Ich bin mir nicht sicher, mit welchen Waffen der dritte Weltkrieg ausgetragen wird, aber im vierten Weltkrieg werden sie mit Stöcken und Steinen kämpfen.“ So kann davon ausgegangen werden, dass ein mit Kernwaffen geführter dritter Weltkrieg mit großer Wahrscheinlichkeit zur Auslöschung der menschlichen Spezies und der meisten höheren Lebensformen auf der Erde führen würde. Im günstigsten Fall würde die Menschheit auf den Stand der Steinzeit zurückgeworfen. Die Entwicklung von Kernwaffen gehört zu deshalb zu den negativsten Folgen wissenschaftlicher Forschung in der Physik. Im folgenden Kapitel soll die Funktionsweise von Kernwaffen erklärt und die Folgen, die eine Zündung dieser Kernwaffen hätte beschrieben werden.

1. Atombomben

Unter Atombomben versteht man Kernspaltungsbomben, bei denen innerhalb kürzester Zeit große Mengen waffenfähiges Uran oder Plutonium in einer unkontrollierten Kettenreaktion gespalten werden. Die Bauweise von Atombomben kann stark variieren. Bei den meisten Atombomben werden jedoch durch eine „herkömmliche“ Sprengung zwei unterkritische Mengen an Uran so zusammengeführt oder komprimiert, dass die kritische Masse überschritten wird und es zu einer unkontrollierten Kettenreaktion kommen kann. Die nachfolgende Abbildung zeigt das sog. „Gun-Design“, das unter anderem beim Atombombenabwurf über der japanischen Stadt Hiroshima verwendet wurde.



Bei einer anderen Bauweise ist das Spaltmaterial in Form einer Hohlkugel angeordnet und wird mit Hilfe einer Implosion durch konventionellen Sprengstoff so stark komprimiert, dass es zu unkontrollierten Kettenreaktion kommt. Bei beiden Bauweisen ist die Bombe von einem Neutronenreflektor umgeben, durch den bei der Kernspaltung freiwerdende Neutronen in Bombe zurückreflektiert werden. Hierdurch wird die Sprengkraft der Bombe erheblich gesteigert.

Die Zündung einer Atombombe über einem bewohnten Ballungsgebiet hätte innerhalb eines Radius von ca. 10km um das Explosionszentrum (Totaler Zerstörungsradius) die Vernichtung allen tierischen und menschlichen Lebens, sowie aller Gebäude und Pflanzen in diesem Gebiet zur Folge. Bei modernen Atombomben würde die Anzahl der direkt durch die Explosion getöteten Menschen bei mehreren Millionen Toten liegen. Der anschließende radioaktive Fallout (Niederschlag) würde weitere Millionen Todesopfer zur Folge haben.

Neutronenbomben:

Neutronenbomben sind sog. taktische Kernwaffen, die im Vergleich zu oben beschriebenen Kernwaffen nur eine geringe Sprengkraft haben. Im Gegensatz dazu erzeugen sie jedoch eine alles Leben im Umkreis der Explosion vernichtende Neutronenstrahlung. Neutronenbomben hätten auf den ersten Blick den „Vorteil“, dass die Infrastruktur im angegriffenen Gebiet unbeschädigt bleiben würde. Da das Gebiet jedoch durch die Neutronenstrahlung radioaktiv verseucht würde, wäre es auf viele Jahrhunderte unbewohnbar. Neutronenbomben gehören zu den grausamsten Kernwaffen, da ein Tod durch eine Neutronenbombe besonders qualvoll ist. Ein Mensch der starker Neutronenstrahlung ausgesetzt wäre, würde nach mehrmonatigem Leiden mit Haarausfall, Lähmungen, Verlust der Sinneswahrnehmung, unkontrolliertem Durchfall und Flüssigkeitsverlust schließlich qualvoll sterben.

Schmutzige Bombe:

Unter einer schmutzigen Bombe versteht man Kernwaffen bei denen der eigentliche Sprengkopf von einem Kobaltmantel umgeben wird. Das Metall Kobalt wird bei der Zündung der Kernwaffe in das hochradioaktive Isotop Co-60 umgewandelt. Neben der direkten Explosionswirkung würde bei einer derartigen Atombombe die vernichtende Wirkung durch jahrelangen großflächigen radioaktiven Fallout verstärkt.

Wasserstoffbomben:

Wasserstoffbomben sind Kernwaffen mit der größtmöglichen Sprengkraft. So zündete die ehemalige UDSSR im Jahr 1961, die stärkste jemals von Menschen gezündete Kernwaffe. Die Schockwelle der Explosion in der Atmosphäre war dabei so groß, dass sie noch nach der dritten Umrundung der Erde gemessen werden konnte.

Bei Wasserstoffbomben werden mit Hilfe einer herkömmlichen Atombombe die Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium derart stark komprimiert, dass sie zu Helium verschmelzen (Kernfusion). Man spricht deshalb auch von Kernfusionswaffen. Die Zündung von Wasserstoffbomben kann nur durch eine Kernspaltungsbombe erfolgen, da die für die Kernfusion erforderlichen Energiemengen enorm sind. Nach Einsetzen des Fusionsvorgangs wird jedoch so viel Energie frei, dass Wasserstoffbomben die Sprengkraft von Atombomben um ein Vielfaches übersteigen.