

Kernenergie

Handout zum Vortrag im Rahmen des
Fortgeschrittenenseminars im SS 13

Sonja Spies

Betreuung: Prof. Dr. Frank Maas

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Physikalische Grundlagen	2
2.1	Bindungsenergie	2
2.2	Induzierte Kernspaltung	3
2.3	Kettenreaktion	4
3	Anwendung in Kernreaktoren	5
3.1	Moderator	5
3.2	Aufbau eines Reaktors	6
3.3	Beispiele von Kernreaktortypen	7

1 Einleitung

Schon in den 30er Jahren gab es bereits Versuche, bei denen Urankerne mit Neutronen beschossen wurden. Doch anfangs war noch nicht klar, welche Reaktion dabei stattfindet. Erst 1938 wurde zum ersten Mal von Fritz Strassmann und Otto Hahn gezeigt, dass durch den Beschuss von Urankernen mit Neutronen eine Kernspaltung induziert wird. Den ersten Kernreaktor, d.h. die erste Anlage, in der eine Kettenreaktion von Kernreaktionen kontrolliert stattfindet, entwickelte Enrico Fermi 1942 in Chicago. Das erste Kernkraftwerk, das zur elektrischen Stromerzeugung diente, wurde 1954 in Russland gebaut. In Deutschland gab es 1962 das erste Kernkraftwerk. Derzeit gibt es in Deutschland noch neun aktive Kernkraftwerke, die rund 16 % des Bruttostroms liefern.

Warum Kernenergie trotz der vielen Risiken genutzt wird, zeigt der Vergleich mit anderen Energiequellen. So liefert z.B. die Verbrennung von 1 kg Steinkohle bzw. Erdöl eine Energie von 8 kWh bzw. 12 kWh. Bei der Spaltung von 1 kg Uran-235 wird dagegen eine Energie von 24.000.000 kWh frei.

2 Physikalische Grundlagen

2.1 Bindungsenergie

In Kernkraftwerken wird die bei der Kernspaltung freiwerdende Energie genutzt. Um zu verstehen, wie es zu dieser freigesetzten Energie kommt, müssen wir zunächst die energetischen Prozesse bei der Entstehung eines Atomkerns klären.

Atomkerne bestehen aus Protonen und Neutronen. Aufgrund der positiven Ladung der Protonen herrscht eine abstoßende Kraft zwischen ihnen. Es muss also noch eine zusätzliche anziehende Kraft zwischen den Nukleonen

geben, die für den Zusammenhalt der Nukleonen sorgt. Um diese zu erklären, schauen wir uns einmal die Massen des Kerns und die seiner Nukleonen an. Es fällt auf, dass die Kernmasse kleiner ist als die Summe der Massen seiner Nukleonen. Dieser Effekt wird auch als Massendefekt bezeichnet. Nach Einstein sind Masse und Energie äquivalent, dieser Massendefekt entspricht also einer Energie, der Bindungsenergie des Atomkerns. Wenn Protonen und Neutronen zu einem Kern verschmelzen, tritt ein Massenverlust auf und die Bindungsenergie wird also freigesetzt. Wenn wir den Kern wieder in seine Nukleonen zerlegen wollen, müssen wir diese Energie wieder zuführen. Die Bindungsenergie sorgt also für den Zusammenhalt der Nukleonen, also der sogenannten starken Wechselwirkung zwischen ihnen.

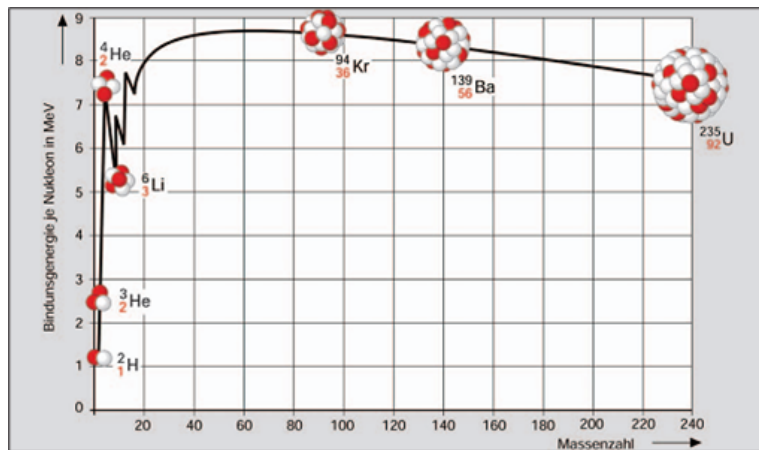


Abbildung 1: Bindungsenergie je Nukleon in Abhängigkeit der Massenzahl

In Abb. 1 sehen wir die Bindungsenergie pro Nukleon in Abhängigkeit der Massenzahl. Bis auf Abweichungen bei kleinen Massenzahlen steigt die Bindungsenergie bis zu einem Maximum bei Massenzahl 56 (Eisen) an und wird dann bei steigender Massenzahl wieder geringer. Es gibt also zwei Wege zur Energiegewinnung: die Kernfusion leichter Kerne zu mittelschweren Kernen und die Kernspaltung schwerer Kerne in mittelschwere Kerne. In beiden Fällen wird jeweils die Differenz der Bindungsenergien frei. Im Folgendem werden wir nur die Kernspaltung weiter diskutieren.

2.2 Induzierte Kernspaltung

Für die Energiegewinnung durch Kernspaltung ist Uran besonders geeignet, da es das schwerste natürlich vorkommende Element ist. Wie alle schweren Kerne ist auch Uran radioaktiv. Das natürliche Uran besteht aus verschiedenen Isotopen, wobei es zu 99 % aus Uran-238 und zu 0,7 % aus Uran-235 besteht.

Es gibt zwei Möglichkeiten der Kernspaltung. Eine Möglichkeit ist die spontane Spaltung. Uran hat allerdings sehr hohe Halbwertszeiten, weshalb diese Methode nicht zur Energiegewinnung geeignet ist. Daher müssen wir die Spaltung induzieren. Dies kann z.B. durch den Beschuss mit Neutronen erfolgen.

In Abb. 2 ist der Prozess der induzierten Spaltung schematisch dargestellt.

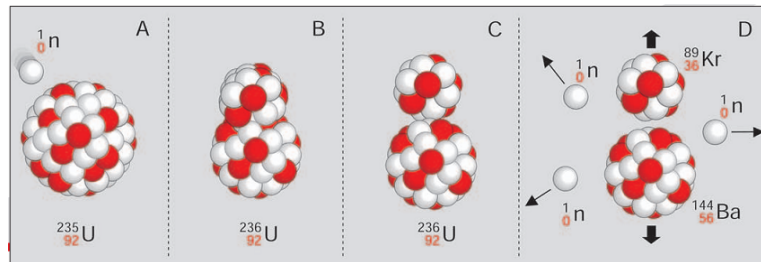


Abbildung 2: Schematische Darstellung einer induzierten Kernspaltung

Trifft ein Neutron auf einen Urankern, wird es von diesem aufgenommen. Es entsteht ein kurzlebiges Uran-Isotop 236, das sich in einem hoch angeregten Zustand befindet. Diese Anregungsenergie bewirkt eine Verformung der Oberfläche des Kerns. Die vorher kugelförmige Oberfläche schnürt sich in der Mitte zusammen, bis die abstoßenden Kräfte zwischen den Nukleonen überwiegen und der Kern sich spaltet. Es entstehen zwei Spaltprodukte, hier Barium und Krypton. Wie die meisten entstehenden Spaltprodukte sind diese radioaktiv und dementsprechend gefährlich. Zusätzlich entstehen noch neue freie Neutronen.

Die Wahrscheinlichkeit für eine neutroneninduzierte Spaltung hängt von deren kinetischen Energie ab (siehe Abb. 3). Uran-238 kann nur bei sehr hohen Energien im MeV-Bereich gespalten werden, Uran-235 dagegen auch mit langsamen Neutronen, sogenannten thermischen Neutronen. Dabei ist der Wirkungsquerschnitt um den Faktor 1000 größer. Daher ist für die Energiegewinnung Uran-235 besonders interessant.

2.3 Kettenreaktion

Wir haben bereits gesehen, dass bei der Kernspaltung wieder Neutronen frei werden. Im Schnitt entstehen 2-3 freie Neutronen pro Kernspaltung. Diese können wieder dazu genutzt werden, um weitere Kernspaltungen zu induzieren. Somit ist eine Kettenreaktion möglich.

Pro Kernspaltung wird etwa eine Energie von ca. 200 MeV frei. Wenn wir eine Reaktorperiode, also die Zeit zwischen zwei Kernspaltungen, von $1 \mu\text{s}$ annehmen, wird nach $100 \mu\text{s}$ bereits eine Energie von $3 \cdot 10^{19} \text{J}$ frei. Das entspricht dem zehnfachen des jährlichen Gesamtstromverbrauchs in Deutschland. Es wird also deutlich, dass eine Steuerung der Kettenreaktion zwingend

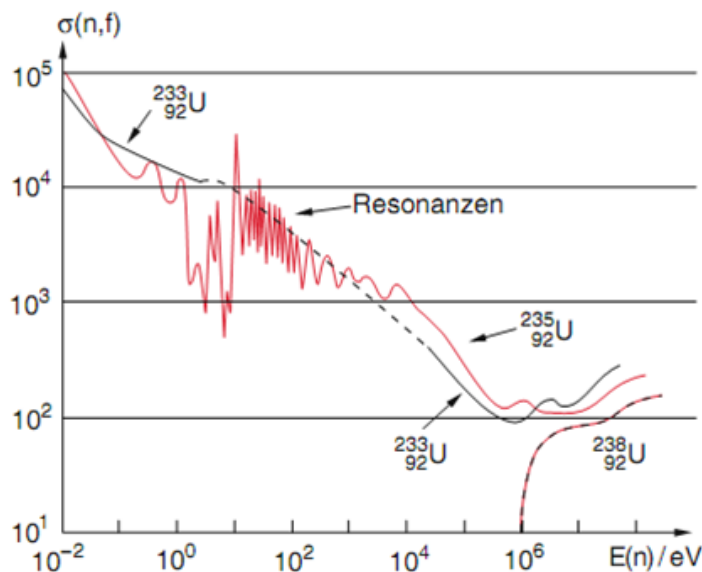


Abbildung 3: Spaltungsquerschnitt in Abhängigkeit der kinetischen Energie der Neutronen

erforderlich ist.

Um die Steuerung möglich zu machen, ist die Art und Weise, auf die die Neutronen bei der Kernspaltung freigesetzt werden, entscheidend. Nur rund 99% der Neutronen werden direkt, also prompt freigesetzt. Etwa 0.7% der entstehenden Neutronen werden verzögert um bis zu 80s frei. Diese Neutronen verlängern die Reaktorperiode erheblich und man hat somit mehr Zeit, um auf die Kettenreaktion Einfluss zu nehmen. Der Grund dafür, warum ein Teil der Neutronen erst verzögert freigesetzt wird, ist der Folgende: Diese Neutronen entstehen nicht bei der Kernspaltung selber, sondern erst bei dem Zerfall der zumeist radioaktiven Spaltprodukte.

3 Anwendung in Kernreaktoren

3.1 Moderator

Wie bereits diskutiert werden pro Kernspaltung 2-3 Neutronen frei. Diese sind schnelle Neutronen mit Energien im MeV-Bereich. Aus Abschnitt 2.2 geht aber hervor, dass die Spaltwahrscheinlichkeit für Uran-235 bei langsamen Neutronen deutlich größer ist. Wenn die frei werdenden Neutronen nun wieder neue Kernspaltungen induzieren sollen, ist es daher sinnvoll, diese auf thermische Energien abzubremsen. Diese Aufgabe übernimmt der Moderator. Die Abbremsung der Neutronen erfolgt durch elastische Stöße mit den Moderatoratomen. Ein Moderator sollte im Wesentlichen zwei Eigenschaften vorweisen: ein gutes Abbremsvermögen und einen geringen Neutronen-

einfang. Stoffe, die diese beiden Eigenschaften erfüllen, sind z.B. Wasser, schweres Wasser und Graphit. In unseren westlichen Kernkraftwerken wird Wasser verwendet.

3.2 Aufbau eines Reaktors

Ein Kernreaktor ist eine Anlage, in der eine Kettenreaktion von Kernreaktionen kontrolliert stattfindet. Der Reaktorkern, also der Bereich, in dem die Kernreaktionen stattfinden, besteht im Wesentlichen aus Kernbrennstoff, Moderator, Regeleinrichtung, Kühlsystem und einem Strahlenschutz (siehe Abb. 4).

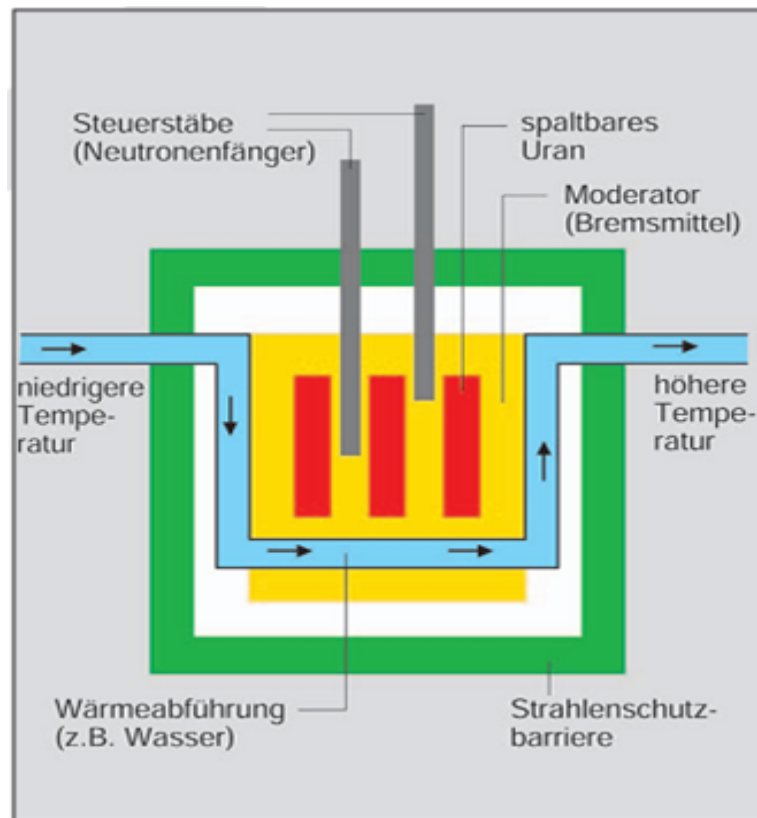


Abbildung 4: Aufbau eines Kernreaktors

Die Steuerstäbe bestehen aus einem neutronenabsorbierenden Material, wie z.B. Bor oder Cadmium. Diese können verschieden weit in den Reaktor hineingefahren werden und somit die Kettenreaktion beeinflussen. Werden sie weit in den Reaktor hineingefahren, absorbieren sie viele Neutronen und es stehen weniger Neutronen für die Kernspaltung zur Verfügung. Somit

werden weniger Kernspaltungen induziert und die Reaktivität des Reaktors wird verringert.

3.3 Beispiele von Kernreakortypen

Es gibt verschiedene Typen von Kernkraftwerken. In Deutschland werden Siedewasser- und Druckwasserreaktoren verwendet.

In Abb. 5 ist ein Siedewasserreaktor dargestellt. Die Brennelemente be-

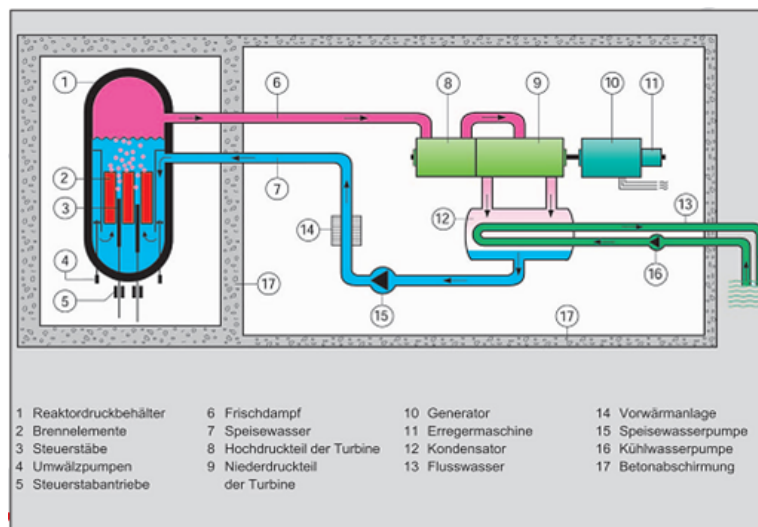


Abbildung 5: Siedewasserreaktor

finden sich in einem Druckbehälter, der zu zwei Drittel mit Wasser gefüllt ist. Die bei der Kernspaltung entstehende Wärme erwärmt das Wasser und der entstehende Wasserdampf wird zu einer Turbine geleitet, die wiederum an einen Generator angeschlossen ist. Der Wasserdampf wird mithilfe einer Flusswassereinspeisung gekühlt und fließt wieder zurück in den Reaktorkern. In diesem Beispiel dient das Wasser sowohl als Kühlmittel als auch als Moderator. Dies hat den Vorteil einer automatischen zusätzlichen Sicherheit: Finden zu viele Kernspaltungen statt, entsteht auch entsprechend mehr Wärme und das Wasser wird folglich mehr erwärmt und es entstehen Blasen. Dadurch stehen aber weniger Wassermoleküle zur Abbremsung der Neutronen zur Verfügung und es werden weniger Kernspaltungen induziert. Somit regelt sich die Kettenreaktion bis zu einem gewissen Maße automatisch.

Ein Druckwasserreaktor (Abb. 6) funktioniert sehr ähnlich, er hat aber zwei Wasserkreisläufe. Das Wasser des primären Kreislaufs steht dabei unter so hohem Druck, dass das Wasser auch nach der Erwärmung durch die Kernspaltungen nicht verdampft. Das Wasser des sekundären Kreislaufs wird durch das Wasser des primären erwärmt und der entstehende Wasserdampf

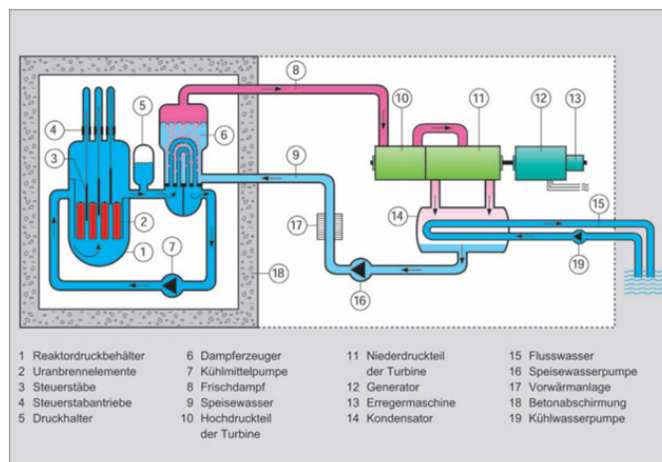


Abbildung 6: Druckwasserreaktor

treibt eine Turbine an. Eine Trennung in diese zwei Kreisläufe hat den Vorteil, dass das Wasser des sekundären Kreislaufs nicht mehr radioaktiv ist und somit nur noch ein Strahlenschutz um den Reaktorkern erforderlich ist.

Literatur

- [1] W. DEMTRÖDER, *Experimentalphysik 4*, Springer 2010
- [2] H. MICHAELIS UND C. SANDER, *Handbuch Kernenergie*, VWEV-Verlag 1995
- [3] M. VOLKMER, *Kernenergie Basiswissen*, InformationsKreis Kernenergie 2007
- [4] www.destatis.de
- [5] www.kernenergie.de