

## Atomenergie durch Kernspaltung

Die Kernkraft spielt neben der Kohle, dem Erdöl und dem Erdgas für die Weltenergieversorgung eine wichtige Rolle und viele Länder können und wollen auf Atomenergie auch in absehbarer Zukunft nicht verzichten. Der Anteil der Kernkraft an der Stromerzeugung liegt weltweit bei 17 % und innerhalb der EU bei 31%. Derzeit betreiben 31 Staaten 444 Reaktorblöcke und 23 neue Blöcke sind in Bau. [1]

Bei der Kernspaltung spalten langsame Neutronen schwere Atomkerne, z.B. das Uranisotop  $^{235}\text{U}$ , in zwei größere Kerne und 2 bis 3 Neutronen, die dann eventuell nach einer Abbremsung weitere Kerne spalten. Der Spaltungsvorgang läuft in Kernreaktoren in einer kontrollierten Kettenreaktion ab. Bei der Spaltung eines Kerns des Isotops Uran 235 werden rund 200 MeV Energie frei. Demnach liefert 1 kg Uran 235 eine Wärmemenge von etwa  $8,38 \cdot 10^{10} \text{ kJ} = 2400 \text{ MWh}$ , das entspricht einer Verbrennungswärme von 3000 Tonnen Steinkohle. [2]

Die Kernkraft bietet Vorteile wie geringe Stromkosten, geringe  $\text{CO}_2$ -Emission und die Unabhängigkeit von Energieimporten. Aber es stellt sich auch die Frage nach der Reichweite der Uranvorkommen.

Probleme bereitet auch die Entsorgung der radioaktiven Abfälle. Man kann zunächst die abgebrannten Brennstäbe wiederaufbereiten, indem man Uran und Plutonium abtrennt und diese zu neuen Brennstäben verarbeitet. Die restlichen radioaktiven Abfälle müssen in geeigneten geologischen Formationen, z.B. in Salzstöcken, lange Zeit aufbewahrt werden.

### Kernspaltung

Kernspaltung bezeichnet einen Prozess, bei dem ein Atomkern in zwei oder mehrere Bestandteile zerlegt wird. Bei sehr schweren Kernen mit Kernladungszahlen größer als 92 tritt spontane Kernspaltung auf.

Im Allgemeinen ist aber zur Kernspaltung die Zufuhr einer Anregungsenergie erforderlich. Diese Anregungsenergie kann den Kernen durch Beschuss mit Teilchen zugeführt werden. Neutronen sind für Kernspaltungen besonders gut geeignet, da sie keine Ladung besitzen. Sie werden also nicht von den Protonen im Kern abgestoßen oder von den Elektronen in der Hülle abgebremst.

Bei einer induzierten Kernspaltung trifft ein Neutron einen Atomkern und wird von diesem absorbiert. Dabei wird die zur Kernspaltung erforderliche Anregungsenergie nicht nur durch die kinetische Energie des Neutrons geliefert, sondern hauptsächlich durch die Bindungsenergie, die beim Einbau des Neutrons in einen kurzfristig entstehenden Zwischenkern frei wird.

Der Kern gewinnt dadurch die Bindungsenergie und zusätzlich auch eventuelle kinetische Energie des Neutrons, befindet sich also in einem angeregten Zustand und spaltet sich.

Die Spaltung kann man sich im Modell so vorstellen, dass nach dem Einfang des Neutrons der Kern zu schwingen beginnt, sich ellipsenförmig einschnürt und letztlich in zwei mittelschwere Trümmerkerne sowie in zwei bis drei Neutronen zerfällt. Die bei der Spaltung entstehenden Trümmerkerne sind instabil und gehen durch mehrere  $\beta$ -Zerfälle in stabile Nuklide über. Die Spaltprodukte haben eine größere Bindungsenergie pro Nukleon als der ursprüngliche schwere Kern. Diese Differenz der Bindungsenergien wird unter anderem in kinetische Energie der Spaltprodukte umgewandelt. Die freiwerdende Energie tritt also

überwiegend als kinetische Energie der Spaltprodukte, Neutronen, Elektronen, Neutrinos und als Energie der Gammastrahlung auf. [3]

Bei der Kernspaltung entstehen neben den beiden Spaltprodukten noch einige Neutronen. Man hat somit die Möglichkeit, einen sich selbst erhaltenden Kernspaltungsprozess ablaufen zu lassen. Unter geeigneten Bedingungen können nämlich die freigesetzten Neutronen sofort weiter Uranatome spalten. Dies bezeichnet man als Kettenreaktion.

### Kernreaktor

In einem Kernreaktor läuft folgender Vorgang ab: Atomkerne eines spaltbaren Materials, z.B. des Uran-Isotops 235, werden durch Neutronen in zwei Bruchstücke gespalten. Daneben entstehen bei jeder Spaltung 2 oder 3 freie Neutronen, die wiederum zur Spaltung weiterer Kerne führen können. Die Kettenreaktion wird gesteuert, so dass die Reaktionsrate konstant bleibt, d.h., dass im Mittel genau eines der neuen Neutronen wieder eine Spaltung auslöst, so dass die Anzahl der Kernspaltung nicht unkontrolliert anwächst. Bei jedem Spaltvorgang wird Energie frei, zunächst als kinetische Energie der Spaltprodukte und Neutronen. Diese Energie wird durch Stöße an Atome der Umgebung übertragen und damit in Wärmeenergie umgewandelt. Mit Hilfe eines Kühlmittelkreislaufs wird die Wärme abgeführt und in einem Dampf- oder Gasturbinenprozess in mechanische Energie und schließlich im Generator in elektrische Energie umgewandelt.

Hauptbestandteile eines Kernreaktors:

- Brennstoff (Spaltbares Material)
- Moderator (Bremssubstanz)
- Steuerungs- und Kontrolleinrichtungen (Steuerstäbe)
- Moderator (Bremssubstanz)
- Kühlmittel
- Strahlenschutzbarrieren

#### *Brennstäbe:*

Man braucht eine ausreichende Masse an spaltbarem Material. Verwendbar sind die Uranisotope der Massenzahlen 235 und 233 sowie das Plutoniumisotop 239.

Das Isotop Uran 235 findet sich im natürlichen Uran zu 0,73 % neben 99,27 % Uran 238. Verwendet werden natürliches Uran und angereichertes Uran. Angereichertes Uran bedeutet, dass der Prozentsatz des Isotops 235 erheblich erhöht ist. Meistens liegt im angereicherten Uran der Uran-235-Anteil bei ca. 3 bis 4 %.

Die spaltbaren Isotope Uran 233 und Plutonium 239 müssen erst in Brutreaktoren erzeugt werden. Uran 233 entsteht aus Thorium 232 und Plutonium 239 aus Uran 238. [3]

In den meisten heute betriebenen Kernkraftwerken wird angereichertes Uran als Kernbrennstoff eingesetzt. Es gibt aber auch Kraftwerke, die MOX-Brennelemente benutzen. Mischoxid (MOX) ist ein Gemisch aus Uranoxid und Plutoniumoxid. Der Brennstoff wird in Tablettenform (Pellets) in Rohre aus Zircaloy gefüllt und man erhält die Brennstäbe.

#### *Moderator:*

Ein Moderator dient dazu, freie Neutronen abzubremsen. Neutronen, die bei der Spaltung von Kernen des Uran 235 freigesetzt werden, haben eine relativ hohe Geschwindigkeit. Damit ist

die Wahrscheinlichkeit, dass sie weitere Kernspaltungen hervorrufen sehr gering. Diese schnellen Neutronen verlieren durch Stöße an den Kernen des Moderatormaterials ihre Energie und werden abgebremst.

Ein guter Moderator soll also die schnellen Neutronen durch wenige Stöße abbremsen und darf selbst nur eine geringe Neigung zum Einfang von Neutronen besitzen.

Die Moderation ist umso wirksamer, je leichter die Kerne des Moderators sind. Am stärksten ist die durchschnittliche Bremswirkung bei gleicher Masse der Stoßpartner. Deshalb ist Wasserstoff, besonders sein häufigstes Isotop H-1, dessen Kern ein einzelnes Proton ist, der wirksamste Moderator. Verwendbar sind auch Deuterium, Beryllium und Kohlenstoff. Die ebenfalls leichten Elemente Lithium und Bor sind ungeeignet, da sie große Wirkungsquerschnitte für Neutronenabsorption besitzen. [4]

#### *Steuerstäbe:*

In einem Reaktor wird die Kettenreaktion dadurch gesteuert, dass man von außen in den Neutronenhaushalt eingreift. Dieses Steuerungs- und Kontrollinstrument sind die Steuerstäbe. Die Steuer- oder Regelstäbe dienen zur Regelung und Abschaltung des Kernreaktors. Sie bestehen aus Stoffen, die eine große Neigung zur Absorption von Neutronen besitzen, das sind z.B. Bor, Indium, Silber oder Cadmium. [3]

Die Steuerstäbe werden dazu eingesetzt, um die Kettenreaktion zu kontrollieren und die Leistung des Reaktors zu regeln. Je tiefer die Steuerstäbe in der Spaltzone sind, desto mehr Neutronen absorbieren sie. Diese Neutronen stehen dann für weitere Kernspaltungen nicht mehr zur Verfügung. Zieht man die Steuerstäbe wieder heraus, ist die Neutronenabsorption entsprechend geringer und die Anzahl der Kernspaltungen nimmt wieder zu und die Leistung des Reaktors steigt an. Durch das vollständige Einfahren der Steuerstäbe in den Reaktorkern kann die Kettenreaktion unterbrochen werden und der Reaktor abgeschaltet werden.

#### *Kühlmittel:*

Es wird ein Medium zur Wärmeabführung benötigt. Man verwendet Gase wie Kohlendioxid, Luft und Helium. Aber auch Wasser, Schweres Wasser, Quecksilber und leicht schmelzende Metall wie Natrium. [3]

Bei der Kernspaltung wird Energie freigesetzt. Diese Energie tritt als kinetische Energie der schnellen Neutronen und der Bruchstücke der Uran-235-Kerne auf und wird an das die Brennstäbe umgebende Kühlmittel abgegeben. Das Kühlmittel führt dann die freigesetzte Energie ab. Ist das Kühlmittel zum Beispiel Wasser, dann erhitzt die Wärme dieses, so dass Dampf erzeugt wird. Dieser Dampf treibt eine Turbine an, die an einen Generator gekoppelt ist.

Bei einigen Reaktortypen wird aus reaktorphysikalischen Gründen als Reaktorkühlmittel ein anderes Medium wie Gas (z. B. Helium) oder flüssiges Metall (z. B. Natrium oder eine Bleilegierung) verwendet, das seinerseits die Wärme an einen zweiten Kühlkreislauf mit Wasser abgibt. Aus dem erhitzten Wasser wird Wasserdampf, welcher dann eine Dampfturbine antreibt. Und dann wird die Bewegungsenergie durch den Generator in elektrische Energie umgewandelt.

#### *Barrieren für den Strahlenschutz und die Rückhaltung radioaktiver Stoffe:*

Kernkraftwerke besitzen eine Reihe von Barrieren, die zwei Funktionen erfüllen. Sie schirmen die Direktstrahlung ab und sie verhindern das Austreten radioaktiver Stoffe.

Die Brennstäbe sind gasdicht, so dass radioaktive Gase, die direkt bei der Spaltung entstehen, weitgehend eingeschlossen bleiben. Die Brennelemente befinden sich im Wasser, so dass Alpha- und Betastrahlen durch das Kühlwasser vollständig abgeschirmt werden. Das alles wird vom Reaktordruckbehälter umgeben, der aus 20 bis 25 cm dicken Stahl besteht. Um das Reaktordruckgefäß herum befindet sich eine Betonschicht, die der Sicherheitsbehälter umgibt. Darüber wölbt sich bei Druckwasserreaktoren die typische meterdicke Betonkuppel, die vor allem Einwirkungen von außen, wie z.B. Zerstörungen durch einen Flugzeugabsturz, verhindern soll. Der Siedewasserreaktor ist eckig gebaut. [3]

### Verschiedene Reaktortypen

In Kernkraftwerken werden unterschiedliche Reaktortypen eingesetzt, die sich im Wesentlichen durch die verwendeten Kernbrennstoffe, Kühlkreisläufe und Moderatoren unterscheiden. Die wichtigsten sind:

- Leichtwasserreaktor: Siedewasserreaktor, Druckwasserreaktor
- Schwerwasserreaktor
- RBMK
- Brutreaktor (Schneller Brüter)
- Hochtemperaturreaktor

Die Erzeugung elektrischer Energie geschieht indirekt: Die Wärme, die bei der Kernspaltung entsteht, wird auf ein Kühlmedium, meist Wasser, übertragen, wodurch dieses erwärmt wird. Direkt im Reaktor oder indirekt in einem Dampferzeuger entsteht Wasserdampf. Dieser Wasserdampf treibt eine Dampfturbine, die an einen Drehstromgenerator gekoppelt ist, an. Bei Leichtwasserreaktoren, die in den Varianten Siedewasser- und Druckwasserreaktoren existieren, verwendet man gewöhnliches Wasser als Reaktorkühlmittel und Moderator. Bei den Reaktoren vom Typ RBMK ist Graphit der Moderator und Wasser das Kühlmittel. Der Brutreaktor dient nicht nur zur Energiegewinnung, sondern gleichzeitig zur Erzeugung von neuem Kernbrennstoff. Diese Technik könnte die Frist der schwindenden Uranvorräte verlängern. [3]

### Atommüll

Der mengenmäßig überwiegende Teil der Abfälle entsteht durch die Uranwirtschaft: Der größte Teil mit rund 80 % der radioaktiven Abfälle stammt aus dem Uranabbau und wird in der Nähe des jeweiligen Uranbergwerks gelagert. Weitere Teile stammen aus Kernkraftwerken, nämlich aus den abgebrannten Brennelementen und den Abfällen aus der Wiederaufarbeitung. [5]

Radioaktive Abfälle werden nach verschiedenen Kriterien unterschieden, nämlich nach dem Gehalt an radioaktiven Stoffen, der Wärmeentwicklung, dem physikalischen Zustand und den enthaltenen Radionukliden. So werden radioaktive Abfälle in schwach-, mittel- und hochradioaktive Abfälle unterteilt. Zusätzlich gibt es noch die Unterscheidung in wärmeentwickelnde und nicht wärmeentwickelnde Abfälle. [5]

In Deutschland sind etwa 90 Prozent der anfallenden nuklearen Abfälle schwach- und mittelradioaktiv (ca. 270.000 Kubikmeter) und etwa 10 Prozent hochradioaktiv (ca. 24.000 Kubikmeter). Zurzeit befinden sich die radioaktiven Abfälle in Zwischenlagern. Danach sollen sie in tiefen geologischen Formationen endgelagert werden. Geeignet sind Ton-, Granit- oder Salzlager. [6]

Nach bisherigen Experimenten und Erfahrungen reicht Glas und Edelstahl aus, um sicherzustellen, dass das eingeschlossene radioaktive Material auch nach 10.000 Jahren nicht in die Umwelt entweichen kann. Die Umhüllung hält also der Strahlenbelastung für 10.000 Jahre stand. Für weitere Barrieren haben Salzstöcke wichtige Eigenschaften, wie gute Wärmeleitfähigkeit, keine Grundwasserbewegung und plastische Verformbarkeit, so dass sich entstandene Risse von selbst wieder schließen. [7]

### Ausblick

Neben der bis jetzt nicht realisierten Endlagerung stellt sich auch die Frage nach der zeitlichen Reichweite der Spaltstoff-Vorräte. Der weltweite Jahresbedarf an Natururan beträgt 68.000 Tonnen. An Reserven sind 7,36 Mio. Tonnen mit Förderkosten von 80 – 130 \$ / kg U vorhanden. An Ressourcen gibt es 8,17 Mio. Tonnen, die zu Kosten bis 130 \$ / kg U gewonnen werden könnten. Über diese konventionellen Reserven und Ressourcen hinaus sind in Phosphaten etwa 22 Mio. Tonnen und im Meerwasser etwa vier Milliarden Tonnen Uran enthalten, wobei die Förderkosten hier 100 – 300 \$ / kg U betragen. [7]

Die Kernkraft hat im Vergleich zu anderen Stromerzeugern kostengünstige Strompreise von 2,65 Cent/kWh. [8] Zwar fällt auch bei der Produktion von Atomstrom Kohlendioxid an, z.B. beim Bau des Kraftwerks oder beim Uranabbau, aber der  $CO_2$ -Ausstoß pro Kilowattstunde liegt bei ca. 32 g und ist somit viel niedriger als die Belastungen durch Braunkohle- oder Gaskraftwerke. [1]

### Quellen:

[1] Bethge, Philip; Dohmen, Frank; Evers, Marco: Kernkraft – ja bitte? In: Der Spiegel (2008), Nr. 28, S. 20-32

[2] Gerthsen, Christian; Meschede, Dieter (Hrsg.): Gerthsen Physik. 22. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 2004

[3] Volkmer, Martin; Informationskreis Kernenergie (Hrsg.): Basiswissen zum Thema Kernenergie. 1. Aufl. Köln: UbiaDruckKöln, 2004

[4] Wikipedia, Die freie Enzyklopädie (Hrsg.): Moderator (Neutronenphysik). URL [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Moderator\\_\(Neutronenphysik\)&oldid=53752398](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Moderator_(Neutronenphysik)&oldid=53752398) Stand 30.12.2008

[5] Wikipedia, Die freie Enzyklopädie (Hrsg.): Radioaktiver Abfall. URL [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Radioaktiver\\_Abfall&oldid=54611341](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Radioaktiver_Abfall&oldid=54611341) Stand 30.12.2008

[6] Deutsches Atomforum e.V. (Hrsg.): Aufbewahrung radioaktiver Abfälle – Zwischenlösung bis zur Endlagerung. 2007

[7] von Alvensleben, Alvo: Die Zukunft der Kernenergie. Vortrag vor Old Table 15 Freiburg am 16.2.2006

[8] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Hrsg.): Bedeutung der Kernenergienutzung in Deutschland URL

<http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/kernenergie,did=156016.html?view=renderPrint&page=7> Stand 30.12.2008