

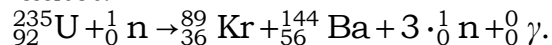
---

# **7 Ausblick auf Kerntechnik und Elementarteilchenphysik**

## **7.1 Grundlagen der Kernenergie-technik; Kernspaltung, Kernenergie; Entsorgung, Wiederaufbereitung**

### **Kernspaltung**

1938 entdeckten Otto Hahn (1879 - 1968, NP 1945) und Fritz Straßmann (1902 -1980) beim Beschuss von natürlichem Uran mit thermischen Neutronen, dass nicht etwa die gewünschten Transurane entstanden, sondern in den Reaktionsprodukten Barium nachgewiesen werden konnte. Sie deuteten das Ergebnis sofort richtig: Ein U-235-Kern spaltet sich nach der Aufnahme des langsamen Neutrons in zwei ungefähr gleich schwere Teile, wobei mehrere schnelle Neutronen und Gammastrahlung frei werden. Die beiden Kernbruchstücke fliegen mit sehr hohen Energien in der Größenordnung von 170 MeV auseinander. Die Reaktionsgleichung für diesen Prozess lautet:



### **Spontane und erzwungene Kernspaltung**

In seltenen Fällen können sich Kerne ohne äußere Einflüsse spalten ( $1 \text{ g}^{-1}\text{s}^{-1}$ ). In der Nuklidkarte sind solche Kerne grün eingezeichnet. Meist wird eine Kernspaltung induziert; dabei wird ein schwerer Kern durch Beschuss mit Neutronen, Protonen, Deuteronen, Alphateilchen oder Gammaquanten energetisch angeregt, und der dabei entstehende Compoundkern zerfällt in zwei Bruchstücke.

Aufgrund des Maximums der Bindungsenergie je Nukleon bei den mittelschweren Kernen ist eine Spaltung mit Energiegewinn bei allen Nukliden möglich, deren Masse größer als 130 u ist. Die Spaltschwelle (Energie, die dem Kern zur Spaltung zugeführt werden muss) liegt bei Kernen mit einer Massenzahl um 130 bei etwa 100 MeV, für A um 200 bei etwa 30 MeV, für  $A > 230$  bei etwa 10 MeV.

Zur Energiegewinnung mittels Kernfission eignen sich also Kerne mit  $A > 230$ . Als Projektile werden Neutronen verwendet, weil sie keine Coulombabstoßung erfahren und daher leicht in Kernnähe gelangen können. Besonders geeignet sind die gg-Kerne U-233, U-235 und Pu-239; fangen diese Kerne nämlich ein thermisches Neutron ein, so werden sie zu gg-Kernen. Derartige Kerne liegen wegen der freiwerdenden Paarungsenergie

energetisch tiefer. Diese Energie reicht aus, um eine Spaltung auszulösen. Will man dagegen die stabileren gg-Kerne wie U-238 spalten, so braucht man schnelle Neutronen, die viel kinetische Energie mitbringen.

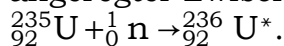
Die Spaltung mit thermischen Neutronen bringt noch einen weiteren Vorteil: Die Verweildauer von thermischen Neutronen in Kernnähe ist weitaus größer als die von Neutronen mit großer Geschwindigkeit. Daher ist die Wahrscheinlichkeit für den Neutroneneinfang durch einen getroffenen Kern um den Faktor 103 größer als bei schnellen Neutronen.

Zusammenfassung: Thermische Neutronen spalten die (gu-)Kerne U-233, U-235 und Pu-239. Für die Spaltung von Th-232 und U-238 benötigt man schnelle Neutronen.

### Mechanismen der Kernspaltung am Beispiel von U-235

Die Spaltprodukte von U-235 sind von Fall zu Fall verschieden. Ein möglicher Ablauf sieht so aus:

Ein thermisches Neutron trifft auf einen U-235-Kern, es entsteht ein angeregter Zwischenkern:

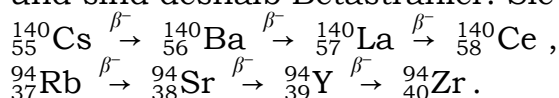


Der Compoundkern zerfällt mit einer Wahrscheinlichkeit von 86 % in zwei Spaltkerne mit Massenzahlen um 90 und 140 sowie einige Neutronen und Energie, z. B.



Bei diesen Vorgängen bleibt die Summe der Kernladungszahlen stets gleich.

Die entstandenen Spaltkerne zeigen einen relativen Neutronenüberschuss und sind deshalb Betastrahler. Sie zerfallen in folgenden Übergängen:



Die entstehenden Betateilchen und Antineutrinos sind in den skizzierten Abläufen nicht aufgeführt.

Bei diesen Betazerfällen werden 23 MeV frei, so dass man bei der Spaltung eines U-235-Kerns insgesamt eine Energie von 198 MeV erhält.

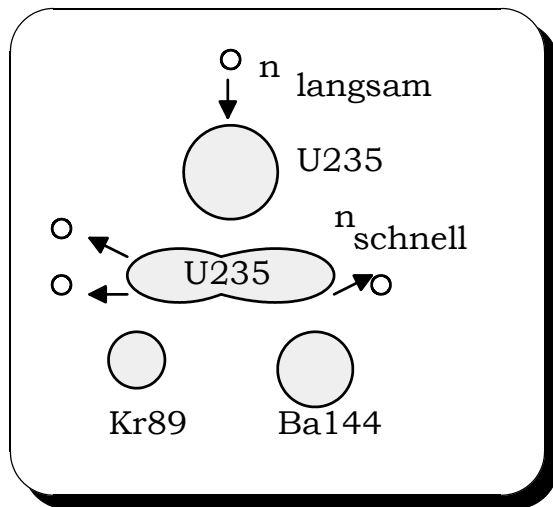
Die Spaltung ist nicht die einzige Möglichkeit der Reaktion eines Kerns beim Beschuss mit Neutronen. So treten mit einer gewissen (geringen)

Wahrscheinlichkeit auch folgende Reaktionen auf:

1. (n,γ)-Reaktion: Neutroneneinfang mit Abstrahlung der Bindungsenergie als γ-Strahlung.
2. (n,n')-Reaktion: Unelastische Streuung.
3. (n,n)-Reaktion: Elastische Streuung; ein Neutron mit derselben Energie (abgesehen vom Rückstoß) wie das eingefangene wird abgegeben.

Anhand des Tröpfchenmodells für den Atomkern kann man sich den Ablauf einer Kernspaltung so vorstellen:

Die durch den Neutroneneinfang freiwerdende Energie verformt den zunächst kugelförmigen Kern elliptisch. Die Oberflächenkräfte versuchen, diese Verformung rückgängig zu machen; als Folge gerät der Kern in Formschwingungen. Dabei nimmt er unter anderem hantelförmige Gestalt an. Im Bereich der Einschnürung befinden sich nur wenige Nukleonen, die mit ihren Kernkräften von kurzer Reichweite die weitreichenden Coulombkräfte der positiven Kernteile nicht mehr kompensieren können. Der Kern bricht schließlich auseinander. (vgl. Abb.):



## Die Kettenreaktion

Bei der Kernspaltung von U-235 werden durchschnittlich 2,56 Neutronen frei. Diese können ihrerseits wieder Kernspaltungen auslösen, so dass die Zahl der Spaltungen innerhalb sehr kurzer Zeit lawinenartig ansteigt: Es kommt zu einer Kettenreaktion.

Eine Größe, die das kinetische Verhalten der Reaktion beschreibt, ist der sog. Multiplikationsfaktor  $k$ . Er gibt an, um welchen Faktor sich die Zahl der wirksamen Neutronen von Generation zu Generation verändert:

$k > 1$ : unkontrollierte Kettenreaktion; in Bruchteilen von Sekunden wird eine große Uranmenge gespalten (Atombombe!).

$k = 1$ : kontrollierte Kettenreaktion; die Zahl der Spaltungen bleibt konstant (kontinuierlicher Reaktorbetrieb).

$k < 1$ : die Kettenreaktion erlischt (Abschalten eines Reaktors).

## Die kritische Masse

Die bei der Spaltung frei werdenden Neutronen können, ohne eine weitere Spaltung ausgelöst zu haben, aus der zu spaltenden Substanz über die

---

Oberfläche entweichen. Ist die Zahl der entweichenden Neutronen zu groß, so kann keine Kettenreaktion stattfinden.

Der prozentuale Neutronenverlust über die Oberfläche wird um so geringer, je größer die zu spaltende Masse ist, da das Volumen mit zunehmender Masse schneller wächst als die Oberfläche. Zum Auslösen einer Kettenreaktion ist daher eine Mindestmenge, die sog. kritische Masse, erforderlich; sie beträgt für U-235 ca. 50 kg (Handballgröße). Eine Atombombe kann z. B. gezündet werden, indem man konzentrisch ausgerichtete, aber zunächst getrennte U-235-Segmente durch eine herkömmliche Explosion verschmilzt.

### **Kernreaktoren**

Anlagen, bei denen Kettenreaktionen von Kernspaltungen kontrolliert ablaufen, nennt man Kernreaktoren. Der erste Kernreaktor wurde 1942 von Enrico Fermi in Chicago in Betrieb genommen. Konstruktion und Betrieb eines Reaktors erforderten die Entwicklung einer neuen Technologie; einige der Hauptüberlegungen und Schwierigkeiten sollen hier beschrieben werden:

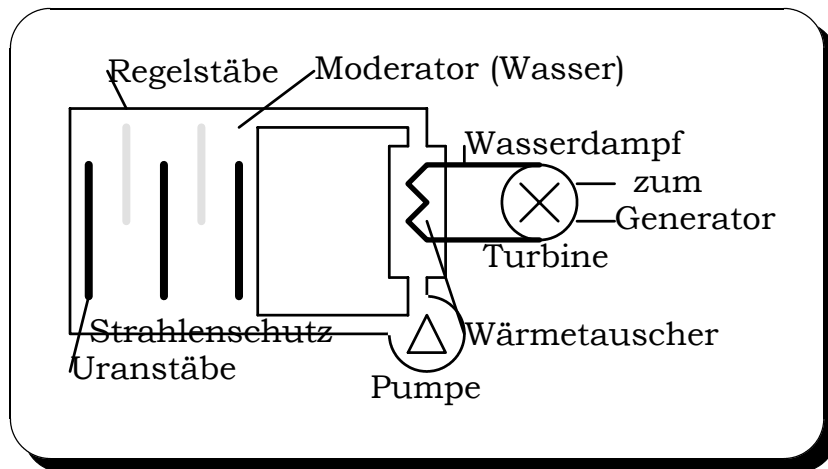
Zum Betrieb eines Reaktors kann man das hauptsächlich vorkommende Isotop U-238 nicht verwenden. Die meisten entstehenden Neutronen verlieren nämlich ihre Energie bei inelastischen Stößen, so dass sie anschließend keine U-238-Kerne mehr spalten können. Dies gilt auch für das in der Natur vorkommende Th-232. Aus beiden Isotopen kann man aber die spaltbaren Stoffe Pu-239 und U-233 erbrüten. Nur mit diesen und U-235 kann man tatsächlich Reaktoren betreiben.

Die bei der Spaltung von Uran frei werdenden Neutronen besitzen eine sehr große kinetische Energie. Diese müssen, um weitere Spaltungen auslösen zu können, abgebremst werden (thermische Neutronen). Die Abbremsung übernehmen die Moderatoren. Als Moderatoren eignen sich Nuklide mit einer Masse, die möglichst gleich der Neutronenmasse ist, da beim zentralen Stoß zweier Körper mit gleichen Massen die größte Energieübertragung stattfindet. Daneben sollen sie möglichst wenige Neutronen absorbieren. Daher finden als Moderatoren Deuterium, leichtes Wasser oder auch Graphit Verwendung.

Der weiter oben erwähnte Multiplikationsfaktor  $k$  wird mit den sog. Regelstäben gesteuert, die aus stark neutronenabsorbierenden Elementen (z. B. Bor oder Cadmium) bestehen. Man schiebt diese mehr oder weniger weit zwischen die Brennstäbe und hält so den Reaktor kritisch.

Die unten stehende Abbildung zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Siedewasserreaktors. Zwischen den bis zu 3 % mit U-235 angereicherten Brennstäben befindet sich Wasser als Moderator, das gleichzeitig als Kühlmittel für die durch Kernspaltungen stark erhitzten Brennstäbe dient. Das Wasser

siedet, und der Dampf führt die freigesetzte Energie nach außen ab. Im anschließenden Kraftwerk wird damit elektrische Energie erzeugt: Das Kernkraftwerk ist also ein Wärmekraftwerk.



Gerade bei einem so hochsensiblen System wie einem Kernreaktor ist für extreme Sicherheit zu sorgen. Mit mehrfachen physikalisch verschiedenen Sicherheitssystemen versucht man zu verhindern, dass die Kettenreaktion unkontrolliert abläuft. Daneben sollen mechanische Sicherheitseinrichtungen (Stahlhülle, Betonmantel) weitere Sicherheit gewährleisten.

Der Spaltstoff im Reaktor wird mit der Zeit verbraucht. Will man diese ausgedienten, aber hochaktiven Brennelemente nicht endlagern, so sollen sie nach einer Zwischenlagerung von etwa einem Jahr in einer Wiederaufbereitungsanlage chemisch getrennt werden. Dabei sollen über 98 % der spaltbaren Stoffe aus den abgebrannten Brennstäben separiert und der Wiederverwertung zugeführt werden können. Den geplanten Brennstoffkreislauf zeigt die unten stehende Skizze.

