

# KERNENERGIE

## **Was ist der Ursprung der enthaltenen Energie?**

Atomkerne sind aus mehreren Kernbausteinen, Nukleonen genannt, aufgebaut. Dabei unterscheidet man die sogenannten Neutronen und Protonen, wobei letztere pro Baustein jeweils eine positive elektrische Ladung tragen. Die Neutronen sind, wie der Name schon sagt, elektrisch neutral und in der Masse nahezu identisch mit den Protonen.

Normalerweise würde man erwarten, dass sich die Protonen aufgrund ihrer positiven Ladungen gegenseitig abstoßen würden. Dennoch werden die Nukleonen im Atomkern zusammengehalten, sonst gäbe es keine Materie in unserem Universum. Dafür ist eine Kraft verantwortlich, welche man Kernkraft nennt. Das Wesensmerkmal dieser Kraft ist, dass sie erstens nur anziehend wirkt (ähnlich wie die Gravitationskraft) und dass sie zweitens nur dann wirken kann, wenn sich die Nukleonen sehr nahe kommen. Bei größerem Abstand nimmt die Kernkraft stark ab.

## **Doch wie kann man nun diese Kernkraft zur Energiegewinnung nutzbar machen?**

Dies kann auf zweierlei Weise geschehen: Durch Kernfusion, d.h. Verschmelzung von zwei Atomkernen und durch Kernspaltung (Fission) eines größeren Kerns in zwei kleinere.

Kernfusion:

Bei der Fusion von zwei kleineren Kernen ziehen sich die Nukleonen der beiden Kernen aufgrund der Kernkraft an und binden sich aneinander. Die dabei freigesetzte Bindungsenergie wird in Wärmeenergie umgewandelt. Dieser Prozess erfordert sehr extreme Bedingungen. Er findet z. B. im Inneren der Sonne unter hohem Druck und bei Temperaturen von mehreren Millionen Grad Celsius bei der Verschmelzung von Wasserstoffkernen zu Heliumkernen statt. Die dabei freiwerdende Energie gelangt zu uns als Sonnenenergie. Auf der Erde ist es bislang noch nicht gelungen, die Kernfusion in einem Kraftwerk zur Stromerzeugung großtechnisch nutzbar zu machen.

Kernspaltung:

Bei größeren Kernen kommt der Umstand hinzu, dass der anziehenden Kernkraft die abstoßende elektrische Kraft der positiven Ladungen der Protonen entgegenwirkt. Bei Protonen, welche sich in einem größerem Abstand zueinander befinden, überwiegt nun die abstoßende Wechselwirkung und der gesamte Atomkern wird weniger stabil. Daher ist es energetisch günstiger, wenn sich der große Atomkern in kleinere Atomkerne aufspaltet. Dies passiert bei radioaktiven Elementen zufällig und bei dem Zerfallsprozess wird ebenfalls Bindungsenergie in Form von Wärme abgegeben, da in den kleineren Atomkernen die Nukleonen stärker aneinander gebunden sind. Daher sind alle natürlich vorkommenden radioaktiven Elemente zugleich schwere Elemente mit großem Atomkern. Das schwerste, natürlich vorkommende Element ist das Uran und wird daher als Kernbrennstoff in Kernkraftwerken verwendet.

Nach Einstein gilt für Masse und Energie:

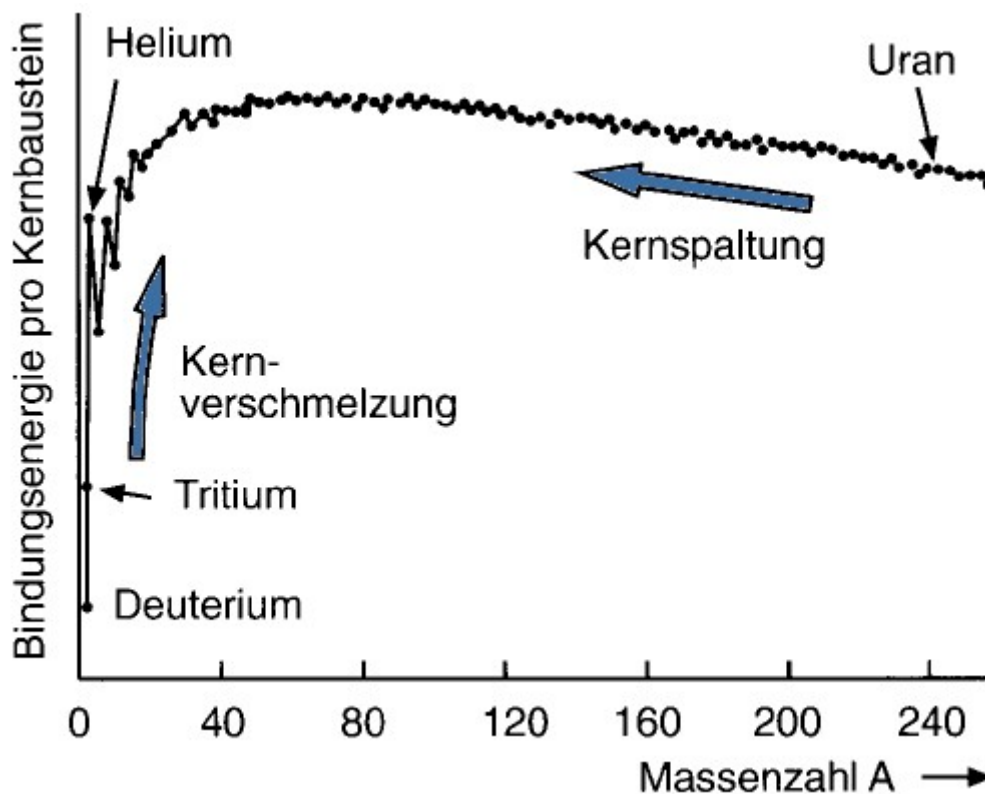
$$E = m \cdot c^2$$

Masse kann in Energie umgewandelt werden und umgekehrt.

Bei der Verschmelzung (Fusion) von Kernbausteinen kann also Energie freigesetzt werden, weil ein Teil der Masse in Form von Energie abgegeben wird. Man spricht vom Massendefekt.

Bei der Spaltung von schweren  
 der einzelnen Bausteine verglichen mit der Masse des Endprodukts.

Beispielillustration:



Quelle: Zukunftswerkstatt Jena: <https://www.zw-jena.de/energie/kernenergie.html>

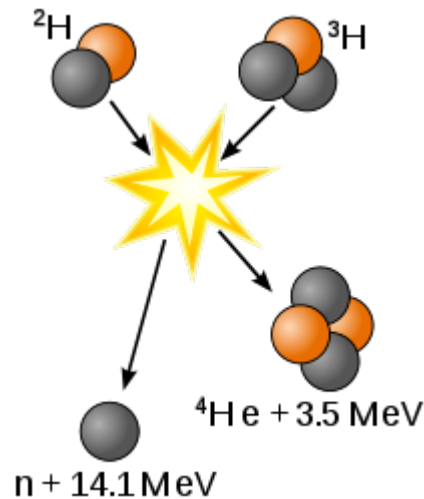
### Kernspaltung

Die erste Möglichkeit ist die Kernspaltung. Dabei wird meist ein sehr schwerer Urankern ( $^{235}\text{U}$ ) mit einer Massenzahl von 235 gespalten. Die mittlere Bindungsenergie beträgt bei Uran 235 in etwa 7,6 MeV je Kernbaustein. MeV bedeutet Megaelektronenvolt. 1MeVentspricht in etwa  $1,6 \cdot 10^{-13}$ Joule. Zur Zerlegung des Urankerns sind damit  $235 \times 7,6$  MeV, also insgesamt 1.786 MeV erforderlich. Diese Energiemenge liefert im Reaktor ein Neutron, das den Urankern trifft. Dieser wird als U236 instabil und zerfällt. Aus den 236 Kernbausteinen bilden sich dann meist zwei neue, mittelgroße Kerne. Außerdem werden je nach sich bildenden Spaltprodukten (es sind viele verschiedene Kombinationen möglich) zwei oder drei Neutronen frei. Die mittlere Bindungsenergie, die im Moment der Entstehung der Kerne freigesetzt wird, beträgt in etwa 8,4 MeV je Kernbaustein. Betrachten wir die Energiebilanz für die beispielhaften Spaltprodukte  $^{94}\text{Kr}$  (Krypton) und  $^{139}\text{Ba}$  (Barium): Insgesamt 233 Kernbausteine sind in beiden Kernen gemeinsam enthalten. Es wurden also bei dieser Reaktion 3 Neutronen ( $236-233$ ) und 1.957 MeV ( $233 \times 8,4$  MeV) Bindungsenergie freigesetzt. Verbleiben als Gewinn also 173 MeV ( $1.957$  MeV – 1.786 MeV).

Der Verlauf der Kurve in Abbildung 1 ermöglicht zwei Wege Kernenergie nutzbar zu machen. Die erste Möglichkeit spielt sich im Bereich der ganz kleinen Massenzahlen, also ganz links im Diagramm ab: die Kernfusion.

## Kernfusion

Bei der Kernfusion werden sehr leichte Atomkerne zu einem schwereren Atomkern verschmolzen.  
Fusion von Deuterium und Tritium zu einem Heliumkern:

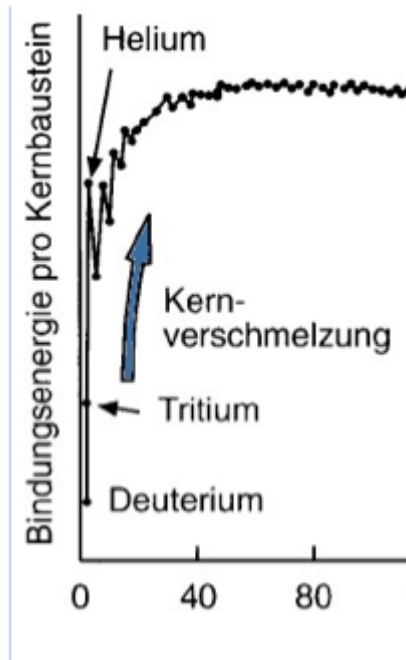


Quelle: <https://en.wikipedia.org/wiki/File:D-t-fusion.png>

In der obigen Grafik spielt sie sich im Bereich der ganz kleinen Massenzahlen ab. Alle gegenwärtig intensiv erforschten Konzepte setzen zu gleichen Teilen die Wasserstoffisotope Deuterium (Massenzahl 2) und Tritium (Massenzahl 3) ein. Die Produkte der Fusion sind ein Heliumkern, ein freies Neutron und Energie.

	Anzahl Kernbausteine u	Energie je Kernbaustein	Energie gesamt
		[MeV]	[MeV]
<b>Deuterium</b>	2	1,113	2,226
<b>Tritium</b>	3	2,827	8,481
		SUMME	10,707
<b>Helium</b>	4	7,074	28,296
		DIFFERENZ	17,589

Tabelle 1: Energiebilanz Kernfusion (Quelle: (Dirk W. Hoffmann: Einsteins Relativitätstheorie, Eine geführte Reise durch Raum, Zeit und die Geschichte der Physik)



Quelle: Zukunftswerkstatt Jena; <https://www.zw-jena.de/energie/kernenergie.html>

Zunächst müssen wir die Bindungsenergie aufbringen, um das Deuterium (2,2 MeV) und das Tritium (8,5 MeV) „auseinanderzunehmen“. Das macht gemeinsam 10,7 MeV, die zunächst in den Prozess hineingesteckt werden müssen (siehe Tabelle 1). Bei der Fusion setzt der Heliumkern dann 28,3 MeV Bindungsenergie frei. Zieht man den Aufwand vom Ertrag ab, weist die Kernfusion unter dem Strich also eine positive Energiebilanz von 17,6 MeV aus. Das klingt zunächst nicht nach viel. Hält man sich aber vor Augen, dass man mit einem einzigen Gramm Deuterium/Tritium so viel Wärme erzeugen kann, wie vier durchschnittliche Einfamilienhäuser in einem Jahr benötigen, wird das Potenzial der Kernfusion deutlich.

### Wie wird der Energieträger bereitgestellt?

#### Kernspaltung

Uranerz wird, wie fossile Energieträger auch, in Lagerstätten abgebaut. Der Erzanteil an der durch den Abbau bewegten Gesamtmasse macht nur ungefähr 1‰ aus.

Das Uran wird in aufwendigen, mehrstufigen Verfahren vom Restgestein getrennt und konzentriert. Am Ende dieses Prozesses steht der sogenannte Yellowcake, der zu einem sehr hohen Anteil aus Uranoxiden (Verbindungen von Uran mit Sauerstoff) besteht.

Der Yellowcake besteht durchschnittlich zu über 99 % aus dem schwer spaltbaren Uranisotop U 238. Das eigentlich gewünschte leicht spaltbare U 235 macht dementsprechend nicht einmal einen Anteil von 1% aus. Eine nukleare Kettenreaktion läuft aber in den meisten Reaktortypen erst ab einem Uran 235 Anteil von mehreren Prozent ab. Deshalb ist es erforderlich, den U 235 Anteil zu erhöhen. Es gibt mehrere verschiedenen Verfahren der Urananreicherung, die den minimalen Masseunterschied der beiden Uranisotope nutzen, um sie zu trennen. Das gängigste und energieeffizienteste Verfahren trennt die beiden Uranisotope mit Hilfe von Gaszentrifugen. Dafür wird das Uranoxid über eine Kette chemischer Reaktionen in das Produkt Uranhexafluorid (UF<sub>6</sub>) überführt. Das UF<sub>6</sub> lässt sich leicht verdampfen und wird dann in die Gaszentrifugen geleitet. Nach dem Zentrifugieren erhält man dann ein mit U235 Isotopen angereichertes und ein abgereichertes UF<sub>6</sub>-Gas, die wieder in den Feststoff überführt werden.

Das abgereicherte Uran wird gegenwärtig nicht genutzt und eingelagert. Das angereicherte Uran wird nach weiteren Prozessen in Form von Urandioxid (UO<sub>2</sub>) zu tablettenähnlichen Pellets gepresst und anschließend gebrannt. Die Kernbrennstoffpellets werden dann in lange, dünne Rohre gefüllt, die aus einer Speziallegierung bestehen. Diese Rohre bezeichnet man als Brennstäbe. Mehrere Brennstäbe werden zu einem Brennelement zusammengefasst. In dieser Form werden sie dann in den Reaktoren der Kernkraftwerke eingesetzt.

### Kernfusion

Ausgangsstoffe für die Kernfusion sind die Wasserstoffisotopen Deuterium (D) und Tritium (T). Deuterium kann direkt aus der Umwelt gewonnen werden. Es kommt als schweres Wasser (D<sub>2</sub>O) und als halbschweres Wasser (DHO) natürlicherweise vor und kann durch Anreicherung aus normalem Wasser (H<sub>2</sub>O) gewonnen werden.

Tritium hingegen kommt in der Umwelt nur in ganz geringen Konzentrationen vor. Es ist radioaktiv und hat eine Halbwertszeit von etwas mehr als zwölf Jahren. Für die technische Nutzung ist vorgesehen, es aus Lithium zu produzieren. Lithium macht rund ein halbes Prozent der Erdkruste aus, stünde also in ausreichender Menge zur Verfügung.

Die Forschung konzentriert sich aktuell (2018) auf Tokamaks und Stellaratoren. Diese Reaktorkonzepte beruhen auf der Technik des magnetischen Einschlusses. Eine kleine Menge von wenigen Gramm des Deuterium-Tritium-Gasgemisches wird in ein luftleeres, viele Kubikmeter großes, torusförmiges Behältnis eingebracht und auf 100 bis 150 Millionen Grad Celsius erhitzt. Bei diesen Temperaturen sind Elektronen und Atomkerne voneinander getrennt und bilden ein elektrisch leitendes Plasma.

Der Plasmaeinschluss wird durch torusförmige Magnetfelder erzeugt, wobei diese noch schraubenförmig verdrillt werden. Diese Verdrillung kann man im Wesentlichen auf zwei Arten erreichen und unterscheidet damit die beiden Fusionsreakortypen – Stellarator und Tokamak. Das schon sehr früh technisch realisierbare Prinzip des Tokamak erreicht die Verdichtung der Magnetfeldlinien durch einen Strom, der im Plasma kreisförmig fließt. Dieser Strom führt ein Magnetfeld mit sich, das sich mit dem Magnetfeld der torusförmigen Spulen überlagert und so zur Verdrillung führt.

Beim Stellarator wird die Verdrillung des Magnetfeldes vollständig von äußeren, stromdurchflossenen Spulen erzeugt. Im Plasma fließt also kein Gesamtstrom, wodurch das Stellaratorprinzip intrinsisch den für eine Kraftwerkstauglichkeit der Kernfusion erforderlichen Dauerbetrieb erfüllt.

### **Wie wird die Kernenergie gewandelt?**

Ein Kernkraftwerk ist vom Prinzip her ein Wärmekraftwerk. Die bei Kernreaktionen freigesetzte Wärme wird dazu verwendet Wasser zum Sieden zu erhitzen und damit eine Dampfturbine anzutreiben. Ein angeschlossener Generator erzeugt elektrischen Strom.

### Kernspaltung

Das Herzstück eines Kernkraftwerkes ist der Reaktor. In ihm läuft die Kernspaltung ab. Es gibt viele verschiedene Bauformen von Kernreaktoren. Die häufigste Bauform weltweit ist der Druckwasserreaktor, der sich am besten durch drei Kreisläufe erklären lässt:

### Primärkreislauf und Reaktorleistung

Der erste ist der Primärkreislauf: Im Reaktorsicherheitsbehälter aus meterdickem Stahlbeton befindet sich das Herzstück der Anlage: der Reaktordruckbehälter. In ihm wiederum befinden sich in einem Wasserbecken die Brennstäbe. Das Wasser nimmt die in Wärme umgewandelte Strahlung der Kernreaktionen auf und kühlt so gleichzeitig die Brennstäbe. Das erhitzte Wasser überträgt dann in einem Dampferzeuger die Wärme an einen zweiten Kreislauf (Sekundärkreislauf) und wird anschließend wieder in den Reaktor geleitet. Somit ist der erste Kreislauf geschlossen. Doch bevor wir uns der Turbine zuwenden, müssen wir noch eine Frage beantworten: Wie hält man die Kernreaktionsrate auf dem gewünschten Level?

Die Leistung eines Kernreaktors bleibt dann konstant, wenn eine Kernspaltung genau eine weitere Kernspaltung auslöst (Kettenreaktion). Wenn dafür lediglich ein Neutron benötigt wird, aber zwei oder drei je Kernspaltungsreaktion freigesetzt werden, besteht Handlungsbedarf, damit die Leistung des Reaktors nicht unkontrolliert ansteigt.

Das Problem wird durch die Versetzung des Kühlwassers mit Borsäure gelöst. Borsäure ist ein sogenannter Neutronenabsorber, d.h. sie reagiert ebenfalls mit den Neutronen und entzieht sie so dem Prozess der Kernspaltung. Über die Konzentration der Borsäure hat man also die Möglichkeit, die für die Kettenreaktion zur Verfügung stehende Anzahl von Neutronen und so letztlich die thermische Leistung des Reaktors langfristig zu regeln.

Kurzfristig wird die Leistung des Reaktors mit den so genannten Steuerstäben beeinflusst. Ein Steuerstab ist ein Rohr, das über einen Brennstab gefahren werden kann. Er absorbiert ebenfalls freie Neutronen und verhindert so weitere Kernreaktionen im abgedeckten Teil des Brennstabs. Sind die Steuerstäbe ganz in den Reaktor eingefahren, kommt die Kernreaktion zum Erliegen und der Reaktor ist abgeschaltet.

Allerdings besteht bei einem Kernkraftwerk auch nach dem Abschalten noch die Notwendigkeit einer Kühlung, da radioaktive Elemente trotzdem weiter zerfallen und dabei Nachzerfallswärme abgeben.

Nach einer gewissen Betriebszeit sind die Brennstäbe „verbrannt“. Die Konzentration an leicht spaltbarem Material ist dann so weit gesunken, dass sie gegen neue ausgetauscht und der Endlagerung zugeführt werden müssen.

### Sekundärkreislauf und Stromerzeugung

Der Berührungspunkt zwischen Primär- und Sekundärkreislauf ist der Dampferzeuger. Hier wird die Wärme des erhitzten, unter Druck stehenden Primärkreislaufwassers dazu genutzt, das Speisewasser aus dem Sekundärkreislauf zu verdampfen. Beide Kreisläufe vermischen sich dabei nicht. Das hat den Vorteil, dass die Radioaktivität innerhalb des Reaktorgebäudes bleibt und nachfolgende Anlagenteile nicht kontaminiert werden.

Der heiße Dampf wird dann in eine mehrstufige Turbine geleitet, die die thermische Energie in mechanische Energie transformiert. Die Turbine wiederum ist mit einem Generator verbunden, der die mechanische Energie in Strom wandelt, der dann ins Netz eingespeist wird.

Der entspannte Dampf verlässt die Turbine und wird in den Kondensator geleitet. Um den Kreislauf schließen zu können, muss der entspannte Dampf wieder zu flüssigem Speisewasser werden. Der Dampf muss dafür im Kondensator noch Energie loswerden- dies geschieht mit Hilfe des dritten Kreislaufs: dem Kühlwasserkreislauf.

### Kühlwasserkreislauf

Sekundärkreislauf und Kühlwasserkreislauf haben ihren Berührungspunkt im Kondensator. Dabei wird Wärme des Dampfes an das Kühlwasser übertragen. Der kühlt dadurch ab, kondensiert wieder zu Wasser und kann wieder dem Dampferzeuger zugeführt werden (Sekundärkreislauf).

Um den Kühlwasserkreislauf ebenfalls zu schließen, muss das Kühlwasser die aufgenommene Wärme beispielsweise über einen Kühlturm an die Umgebung abgeben können, bevor es wieder neue im Kondensator aufnehmen kann.

Die Kühlung kann auch in einem offenen Kreislauf realisiert sein. Dann wird das frische Kühlwasser einem Gewässer entnommen und das erwärmte Kühlwasser dann wieder zurückgeleitet.

### Kernfusion

Gegenwärtig ist die Menschheit schlicht noch nicht in der Lage, die komplexen Reaktionsbedingungen dauerhaft bereitzustellen. Auf Grund des noch sehr hohen Forschungsbedarfes wird die Kernfusion noch auf Jahrzehnte hinaus keine direkte Rolle in unserer Energieversorgung spielen können. Im Bereich der Grundlagenforschung werden enorme Anstrengungen unternommen, um die Kernfusion nutzbar zu machen.

Mit ITER (lat. „der Weg“, International Thermonuclear Experimental Reactor) bauen Europa, Japan, die USA, die russische Föderation, China, Süd-Korea und Indien zusammen in einem gemeinsamen Forschungsprojekt einen ersten Experimentalreaktor, der zeigen soll, dass es technisch möglich ist durch Kernfusion Energie zu gewinnen. ITER soll eine Fusionsleistung von 500 MW liefern, was dem zehnfachen an Energie entspricht, die zum Heizen des Plasmas aufgewendet wurde. ITER ist ein nach dem Tokamak-Prinzip erdachtes Experiment, das seit 2007 im französischen Cadarache im Aufbau ist. Die weltweit größte Fusionsanlage, die nach dem Stellaratorprinzip gebaut ist, wurde in Deutschland, in Greifswald, aufgebaut und lieferte das erste Plasma am 10.12.2015. Mit bis zu 30 Minuten dauernden Entladungen soll Wendelstein 7-X zeigen, dass sich das Stellaratorprinzip für den Dauerbetrieb eines Kraftwerks eignet.

Indirekt versorgt sie die Erde aber schon immer mit Energie. Die Kernfusion, die im Inneren der Sonne abläuft, setzt so viel Energie frei, dass der Massendefekt je Sekunde etwa vier Millionen Tonnen ausmacht. Ein kleiner Teil dieser Sonnenenergie erreicht die Erde und ermöglicht Leben auf unserem Planeten. Zudem ist sie der Ursprung für fast alle Energiequellen auf der Erde.