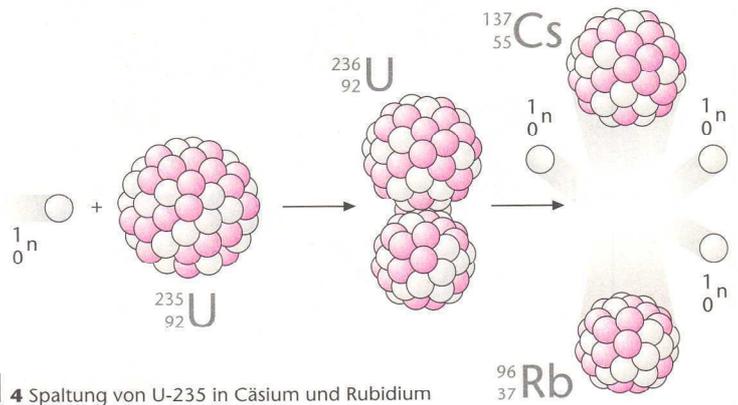


3 Kernumwandlung

Auf die Geschwindigkeit kommt es an
 Uranisotope lassen sich mit Neutronen besonders leicht spalten. Allerdings eignen sich nicht alle Neutronen gleich gut als Spaltmaterial. Es kommt auf ihre die Geschwindigkeit an. Langsame Neutronen – mit einer Geschwindigkeit von etwa 2 km/s – eignen sich besonders gut zur Spaltung von Uranisotopen mit der Nukleonenzahl 235.
 Uran-238 lässt sich nur mit sehr schnellen Neutronen (mindestens 20000 km/s) spalten.



4 Spaltung von U-235 in Cäsium und Rubidium

Mehr Energie und mehr Neutronen

Bei der Spaltung von Urankernen werden folgende Beobachtungen gemacht:
 1. Uran-235 kann durch langsame Neutronen besonders gut gespalten werden.
 2. Bei der Spaltung von Uran wird mehr Energie frei, als zum Beschuss mit Neutronen aufgewendet werden muss.
 3. Für jede einzelne Uranspaltung wird nur ein Neutron gebraucht. Es werden aber zwei bis drei Neutronen frei. Diese Neutronen können weitere Spaltungen auslösen.

${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \longrightarrow$	${}_{60}^{147}\text{Nd} + {}_{32}^{86}\text{Ge} + 3{}_0^1\text{n}$
${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \longrightarrow$	${}_{36}^{89}\text{Kr} + {}_{56}^{144}\text{Ba} + 3{}_0^1\text{n}$
${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \longrightarrow$	${}_{34}^{85}\text{Se} + {}_{58}^{148}\text{Ce} + 3{}_0^1\text{n}$
${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \longrightarrow$	${}_{42}^{103}\text{Mo} + {}_{50}^{131}\text{Sn} + 2{}_0^1\text{n}$
${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \longrightarrow$	${}_{53}^{137}\text{I} + {}_{39}^{96}\text{Y} + 3{}_0^1\text{n}$
${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \longrightarrow$	${}_{55}^{137}\text{Cs} + {}_{37}^{96}\text{Rb} + 3{}_0^1\text{n}$
${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \longrightarrow$	${}_{36}^{90}\text{Kr} + {}_{56}^{144}\text{Ba} + 2{}_0^1\text{n}$
${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \longrightarrow$	${}_{52}^{135}\text{Te} + {}_{40}^{98}\text{Zr} + 3{}_0^1\text{n}$
${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \longrightarrow$	${}_{51}^{133}\text{Sb} + {}_{41}^{101}\text{Nb} + 2{}_0^1\text{n}$
${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \longrightarrow$	${}_{51}^{129}\text{Sb} + {}_{41}^{104}\text{Nb} + 3{}_0^1\text{n}$

5 Spaltmöglichkeiten von U-235

Aufgaben

- 1 Rhodium kann sich durch Neutronenbeschuss in Palladium umwandeln. Vervollständige die Reaktionsgleichung. Verwende dabei das Periodensystem.



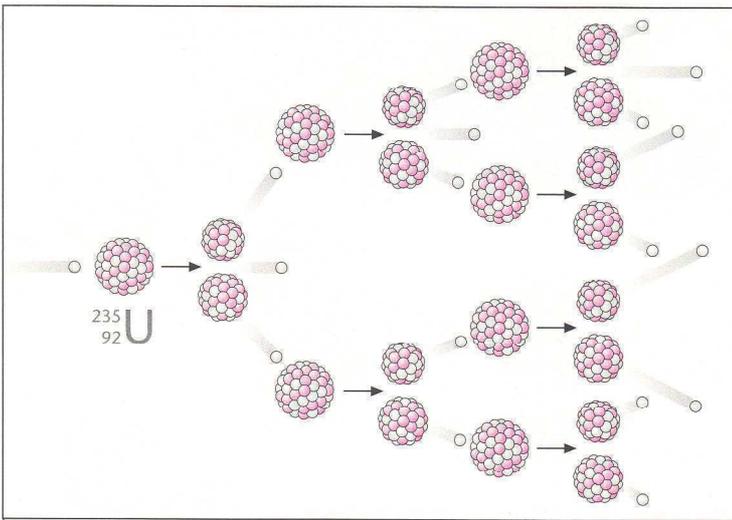
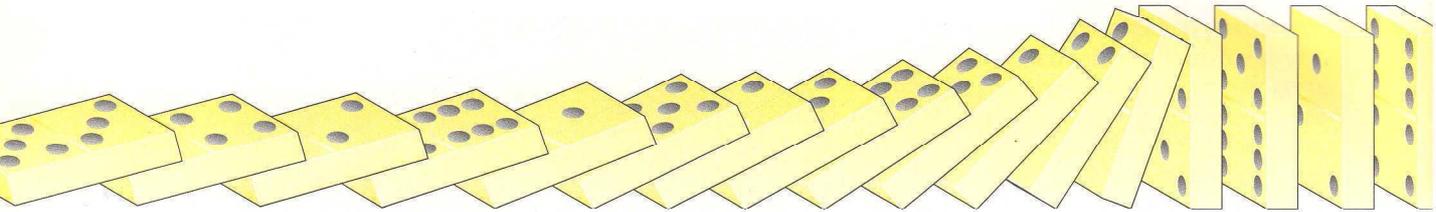
- 2 Uran-235 kann durch Neutronenbeschuss gespalten werden. Vervollständige die Reaktionsgleichungen. Verwende dabei das Periodensystem.



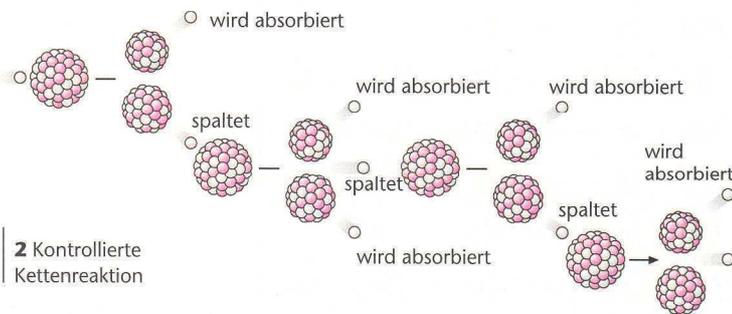
6 Nur nicht zu schnell, sonst klappt die Spaltung nicht.

Ohne Kettenreaktion kein Kernkraftwerk und auch keine Atombomben

Die Kettenreaktion



1 Unkontrollierte Kettenreaktion



2 Kontrollierte Kettenreaktion

Kettenreaktion

Stelle dir eine Reihe von hintereinander aufgestellten Dominosteinen vor.

Wird der erste Stein in Richtung des nächsten Steines gekippt, fällt ein Stein nach dem anderen um. Eine Kettenreaktion ist in Gang gekommen. Übertragen wir dieses Modell auf unsere Neutronen bei der Kernspaltung.

Kontrollierte Kettenreaktion

Für die kontrollierte Kettenreaktion kann das Domino-Modell als Anschauung dienen. Jedes Steinchen wirft immer nur ein anderes um. Man könnte sagen, das Umkippen der Steine geht ganz gleichmäßig und geregelt vor sich. Bei der

kontrollierten Kettenreaktion funktioniert es ähnlich.

Bei jeder Uranspaltung werden im Durchschnitt zwei bis drei Neutronen frei. Für eine Spaltung wird aber nur ein Neutron benötigt. Die übrigen Neutronen muss man einfangen, damit es zu einer kontrollierten Kettenreaktion kommt (▷ B 2).

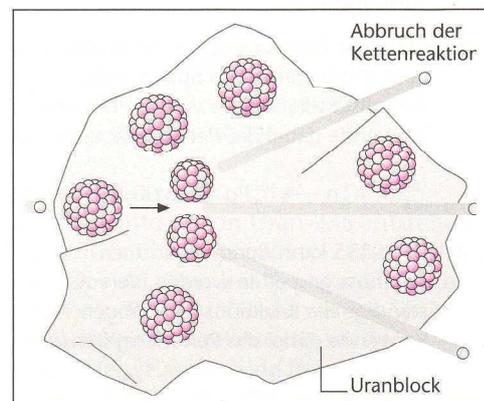
Unkontrollierte Kettenreaktion

Spaltet jedes der zwei bis drei Neutronen wieder einen Urankern, dann wächst die Zahl der Spaltungen schnell an (▷ B 1). In Bruchteilen von Sekunden wird so eine riesige Energiemenge freigesetzt. Das geschieht z. B. bei einer Atombombe.

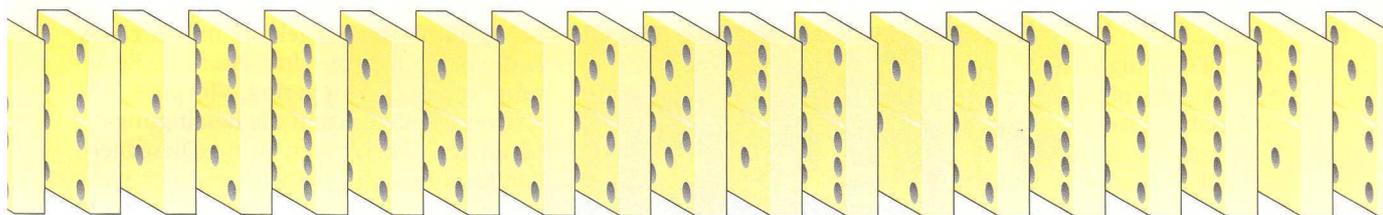
Kritische Masse

Neutronen, die bei einer Uranspaltung freigesetzt werden, können einen Uranblock durch dessen Oberfläche verlassen (▷ B 3), bevor sie eine Spaltung verursachen. Verlassen mehr Neutronen das Uran als neue durch Spaltung hinzukommen, kommt keine Kettenreaktion zustande.

Ob eine Kettenreaktion möglich ist, hängt von der Form und der Masse des Uranblocks ab. Die Mindestmasse, ab der eine Kettenreaktion möglich ist, nennt man kritische Masse. Sie beträgt für reines Uran-235 in Kugelform ca. 50 kg. Eine Kugel mit dieser Masse hat einen Durchmesser von etwa 17 cm.



3 Hat der Uranblock die kritische Masse nicht erreicht, dann bricht die Kettenreaktion ab.



Keine Kettenreaktion im Natururan

Im Natururan kann es aus zwei Gründen zu keiner Kettenreaktion kommen. Zunächst muss ein Anfangsneutron für die erste Spaltung vorhanden sein. Dieses Neutron kann der Höhenstrahlung oder einem Spontanzerfall eines Urankerns, der sehr selten ist, entstammen.

Dieses Anfangsneutron muss jedoch die richtige Geschwindigkeit besitzen, um Uran-235 spalten zu können. Normalerweise ist die Geschwindigkeit aber zu groß.

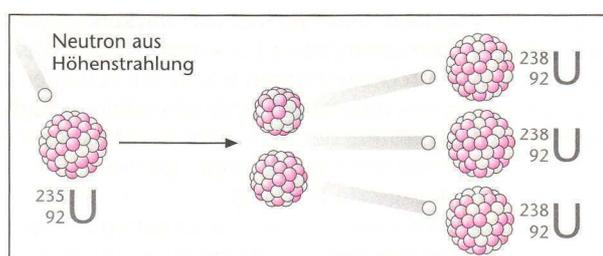
Ein weiteres Problem sind die Uran-238-Kerne. Sie absorbieren freie Neutronen, bevor diese einen Uran-235-Kern spalten können (▷ B5). Aufgrund der großen Zahl von Uran-238-Kernen ist die Wahrscheinlichkeit nämlich sehr gering, dass ein Neutron auf einen Uran-235-Kern trifft. So kommen auf einen U-235-Kern ca. 142 U-238-Kerne.

Frelgesetzte Energie

Bei der Spaltung von 1 kg Uran-235 wird eine Energie von etwa 23 000 000 kWh freigesetzt. Das entspricht in etwa der Energie, die bei der Verbrennung von 2 600 t Stein-

kohle, 6 400 t Holz oder 2 200 000 l Heizöl frei wird.

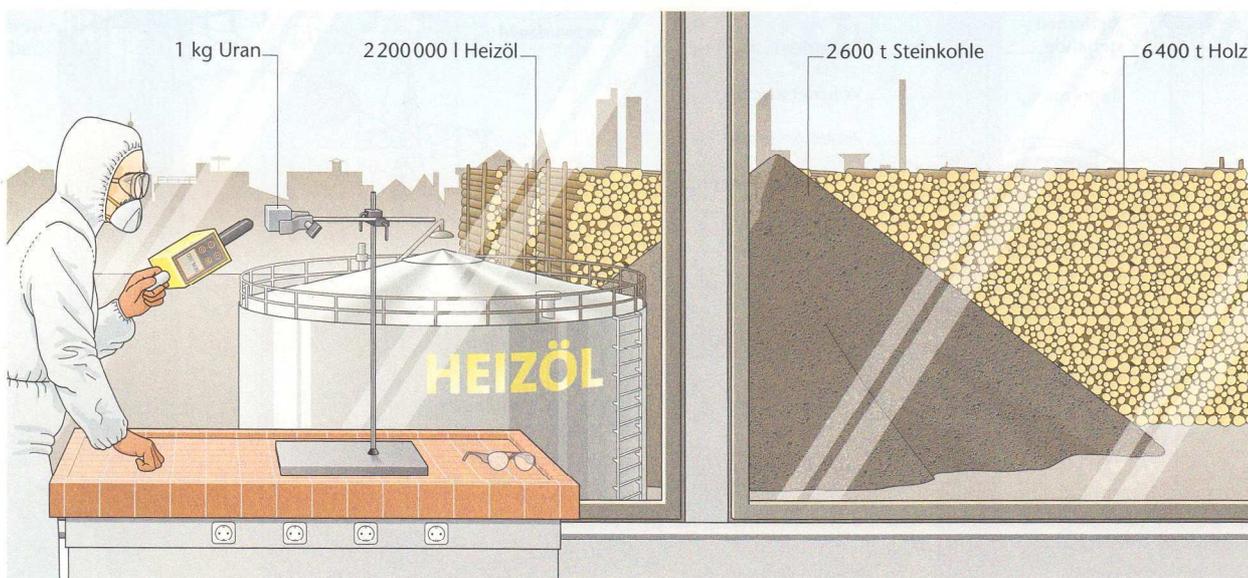
Mit dieser Energiemenge könnte man 1 000 Einfamilienhäuser ein Jahr lang beheizen.



5 Kernspaltung mithilfe der Höhenstrahlung

Aufgaben

- 1 Mit welchen Neutronen lässt sich Uran-235 besonders gut spalten?
- 2 Warum kann im Natururan keine Kettenreaktion von selbst ablaufen?
- 3 Was versteht man unter der kritischen Masse?



4 Um auf die Energie zu kommen, die bei der Spaltung von 1 kg U-235 frei wird, benötigt man große Mengen konventioneller Brennstoffe.

Aufbau und Funktionsweise von Kernkraftwerken



1 Kernkraftwerk

Vergleich von Wärmekraftwerken

In konventionellen Kraftwerken wird Wasser durch Verbrennen von Kohle, Öl oder Gas verdampft. In Kernkraftwerken erfolgt dies mithilfe der Kernspaltung. Die Herstellung des Wasserdampfes geschieht im Reaktorgebäude (▷ B 2).

Ein weiterer Unterschied zwischen einem Kernkraftwerk und einem konventionellen Kraftwerk ist die Art der Umweltbelastung.

Bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe entstehen große Mengen Kohlenstoffdioxid. Dieses Gas wird von Wissenschaftlern für den Treibhauseffekt und somit für die Veränderung des Weltklimas verantwortlich gemacht. Zudem können bei der Verbrennung Schwefel- und Stickstoffverbindungen in die Luft entweichen. Diese Verbindungen tragen zur Entstehung von saurem Regen bei.

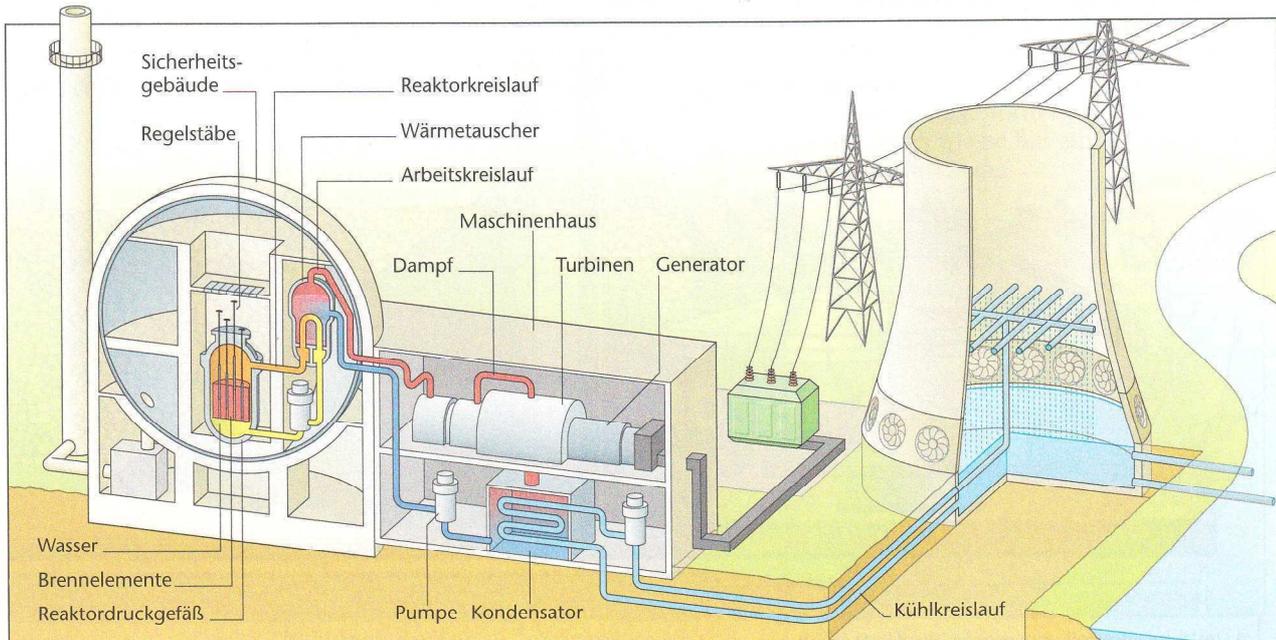
Bei Kernkraftwerken gelangt immer etwas Radioaktivität in die Umwelt. Diese Belastung ist jedoch sehr gering. Viel größere Schwierigkeiten macht die Beseitigung der benutzten radioaktiven Stoffe. Diese bleiben für sehr lange Zeit hoch radioaktiv.

Aufbau von Kernkraftwerken

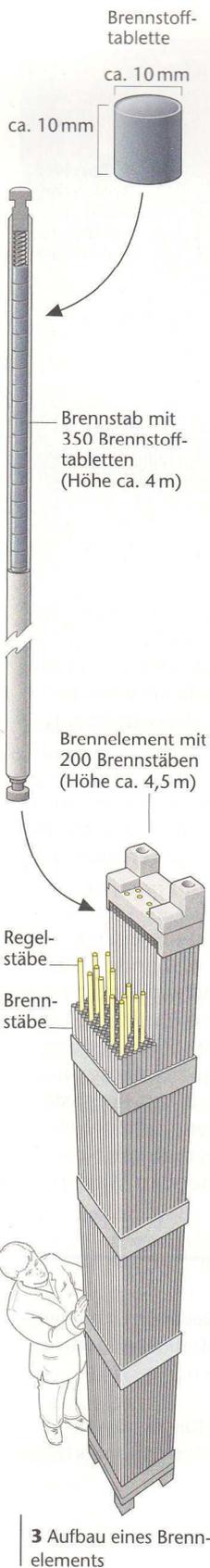
Im Reaktorgebäude befindet sich das Reaktordruckgefäß. Es enthält die Brennelemente mit dem Kernbrennstoff, die in Wasser eintauchen. Im Druckbehälter wird durch Kernspaltungen Energie freigesetzt. Dadurch erhitzt sich das Wasser auf Temperaturen von über 300°C. Der hohe Druck im Druckbehälter verhindert das Sieden des Wassers. Das heiße Wasser wird durch den Wärmetauscher geleitet und fließt von dort aus zurück in den Druckbehälter (Primärkreislauf).

Im Wärmetauscher überträgt das heiße Wasser einen Teil seiner Energie auf das Wasser in einem zweiten, unabhängigen Kreislauf (Sekundärkreislauf). Das Wasser im Wärmetauscher verdampft und treibt so eine Turbine an, die mit einem Generator gekoppelt ist. Dieser wandelt die mechanische Energie der Turbine in elektrische Energie um. Nachdem der Dampf Energie abgegeben hat, wird er an wassergekühlten Rohren vorbeigeleitet, kondensiert dort und gelangt zurück in den Wärmetauscher. Das dabei erwärmte Wasser wird in Kühltürmen wieder abgekühlt.

Einige Argumente für eine kritische Diskussion der Kernenergie.



2 Aufbau eines Kernkraftwerks



4 Geöffneter Reaktorkern

Tabletten im Reaktordruckbehälter

Das Uran wird in Tablettenform gepresst. Diese Brennstofftabletten befinden sich in den **Brennstäben**. Ungefähr 200 Brennstäbe werden zu einem **Brennelement** zusammengefasst (> B 3). Hunderte von Brennelementen bilden den Reaktorkern, der vom Reaktordruckgefäß umgeben ist.

Spaltvorgänge

Bei der Spaltung eines Uran-235-Kerns werden zwei bis drei Neutronen frei. Weil U-238 Neutronen einfängt, muss die Trefferwahrscheinlichkeit zwischen einem Neutron und U-235 erhöht werden. Dies geschieht dadurch, dass der Anteil von U-235 von 0,7% auf 2 bis 4% erhöht wird. Man sagt, das Uran wird angereichert.

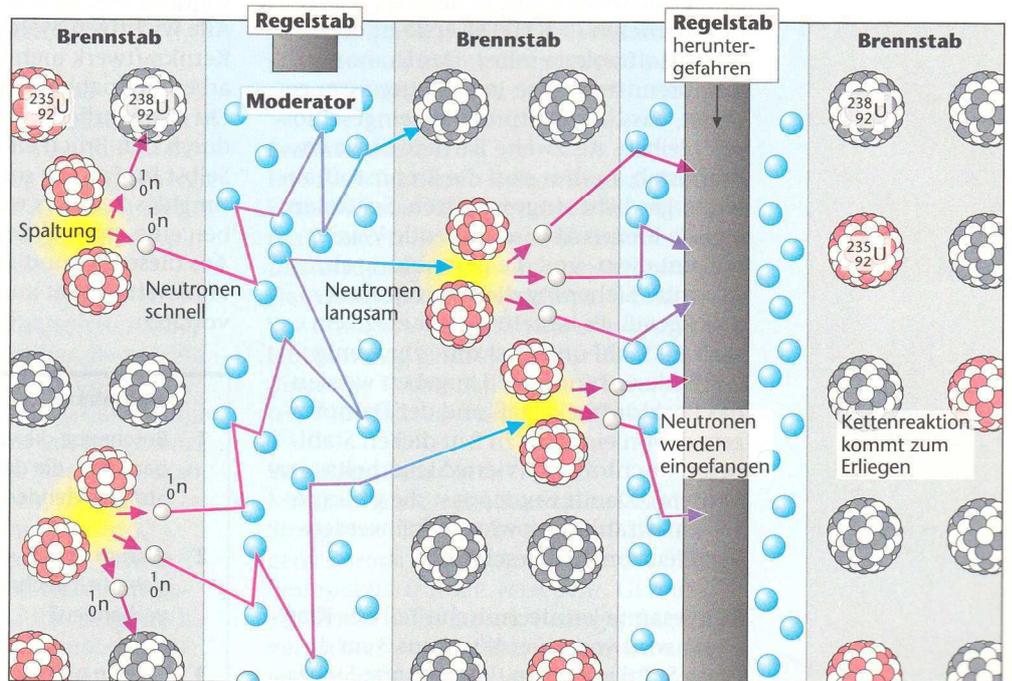
Gut moderiert

Da Uran-235 besonders gut von langsamen Neutronen gespalten wird, müssen die Neutronen abgebremst werden. Dies geschieht mit einer Bremssubstanz, dem so genannten **Moderator**. In vielen Reaktortypen handelt es sich um normales Wasser, das die Brennstäbe umgibt (> B 5). Eine andere Möglichkeit ist Graphit. Die Brennstäbe müssen einen kleinen Durchmesser haben, damit die Neutronen den Brennstab verlassen können, bevor sie von Uran-238 absorbiert werden. Dann müssen sie im Wasser abgebremst werden, um schließlich wieder in einen Brennstab zu gelangen und weitere Spaltungen vorzunehmen.

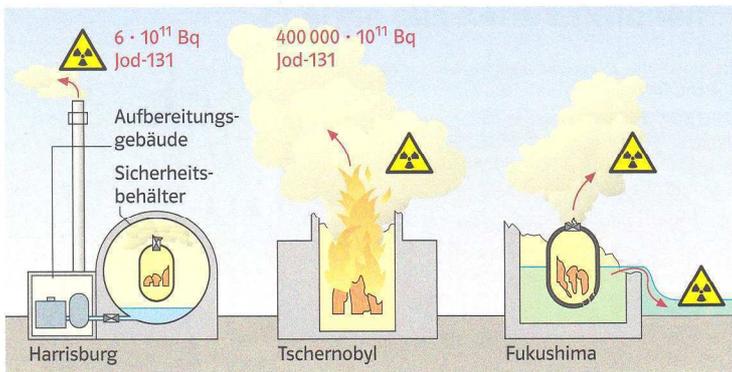
Fehlt der Moderator, werden weniger Kernspaltungen ausgelöst. Der Reaktor setzt immer weniger Energie frei. Er „schaltet“ sich von selbst ab.

Regelstäbe

Damit die kontrollierte Kettenreaktion gesteuert werden kann, befinden sich zwischen den Brennstäben die Regelstäbe. Diese bestehen aus Bor oder Cadmium. Beide Stoffe haben die Eigenschaft, Neutronen einzufangen. Befinden sich die Regelstäbe zwischen den Brennstäben, kommt die Kettenreaktion zum Erliegen.



5 Der Moderator bremst die Neutronen ab, Regelstäbe steuern die Anzahl der Kernspaltungen.



B1 Störfälle von Harrisburg, Tschernobyl und Fukushima

Reaktorsicherheit Durch das Einfahren von **Regelstäben** in den Reaktor lässt sich die Kettenreaktion steuern. Regelstäbe bestehen aus Bor oder Cadmium und absorbieren Neutronen. Zum raschen Beenden der Uranspaltung (Notabschaltung) können zusätzliche Stäbe in den Reaktor geschossen werden. In wenigen Sekunden fällt die Reaktorleistung auf 5% ab. Da aber der Zerfall der Spaltprodukte weitergeht, muss Kühlwasser weiterhin Energie abführen. Zur Sicherung der Kühlung gibt es Notkühlsysteme. Auch andere Steuereinrichtungen sind mehrfach vorhanden.

Ein Sicherheitssystem aus fünf Barrieren soll selbst bei schwersten Störungen ein Freiwerden radioaktiver Stoffe verhindern (→ B2).

Nutzen und Risiken Die Verbrennung von Kohle und Erdgas setzt große Mengen an Kohlenstoffdioxid frei, was durch den Treibhauseffekt eine Erwärmung der Atmosphäre und damit Klimaänderungen zur Folge hat. Daher wurde die Nutzung der Kernenergie als Übergangslösung angesehen. Allerdings sind mit dem Betrieb eines Kernkraftwerks erhebliche Risiken verbunden. Auch wenn die Unfallwahrscheinlichkeit gering ist, im Falle eines Unglücks können die Schäden gewaltige Ausmaße annehmen. Bei der Energieumwandlung in Kernkraftwerken stellt das Entweichen von radioaktiven Stoffen die größte Gefahr dar. Wegen möglicher menschlicher Fehler bei der Konstruktion und im Betrieb des Reaktors sind Unfälle nie ganz auszuschließen. Fallen z. B. alle Kühlsysteme aus, dann heizen sich die Brennelemente im Reaktor in wenigen Sekunden so stark auf, dass sie schmelzen und Teile des Reaktorinhalts verdampfen. Es kommt zum größten anzunehmenden Unfall, einem GAU.

Das Unglück von Tschernobyl (1986) war die Folge eines krassen Bedienungsfehlers, ebenso

wie das in Harrisburg 1979 (→ B1). Das Reaktorunglück in Fukushima 2011 wurde durch ein Erdbeben und einen damit verbundenen Tsunami ausgelöst. Mängel in der Konstruktion der Anlage gepaart mit Fehlern beim Notfallmanagement haben zum schwersten Reaktorunfall seit Tschernobyl geführt.

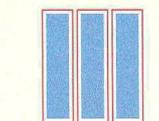
Aus dem geplatzten Reaktor in Tschernobyl entwichen etwa 3% des Inhalts als Gas und Staub – hauptsächlich radioaktive Spaltprodukte wie Iod, Caesium und Strontium. Eine unsichtbare radioaktive Wolke wurde vom Wind über weite Teile Europas getragen. Auch im 1600 km entfernten Deutschland stieg die Radioaktivität deutlich an. Gemüse und Milch waren für einige Zeit so stark belastet, dass vom Verzehr dringend abgeraten wurde. Auch die heute noch teilweise sehr hohe radioaktive Belastung von Waldpilzen ist eine Folge des Tschernobyl-Unfalls.

Über 150 000 Menschen wurden aus der Umgebung des geschmolzenen Reaktors dauerhaft evakuiert. Noch heute sind über 3 000 km² unbewohnbare Sperrzone. Man schätzt, dass viele Tausende an den Folgen des Unfalls starben und noch sterben, hauptsächlich an Krebs.

Ein weiteres Risiko ergibt sich aus den weltweit großen Mengen spaltbaren Materials, das beim Betrieb von KKW entsteht, da es teilweise zum Bau von Kernwaffen geeignet ist. Auch die Entsorgung radioaktiver Bauteile und Brennstäbe ist sehr problematisch. Nach etwa zwei Jahren müssen die Brennstäbe im Reaktor ausgewechselt werden, sie sind hochradioaktiv und können zuerst nur in der Nähe des Reaktors in einem Wassertank aufbewahrt werden, bis die stärkste Strahlung nachgelassen hat. In Anlagen zur Wiederaufbereitung werden sie später zerkleinert und chemisch zerlegt. Ein Teil des Urans findet erneut in Brennstäben Verwendung, der Rest wird in Blöcken aus Glaskeramik eingeschmolzen. Sie müssen für viele zehntausend Jahre sicher gelagert werden. Eine Lagerung in einer mehrere hundert Meter dicken Schicht Steinsalz in etwa 800 m Tiefe ist vorgesehen. Die Sicherheit der Transporte und der Salzschild ist aber umstritten.

■ **A1** Welche Sicherheitseinrichtungen sollen Unfälle verhindern helfen?

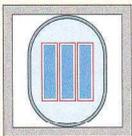
■ **A2** Welche Vor- und Nachteile bringt die Nutzung der Kernenergie mit sich?



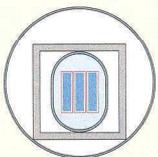
Metallhülle der Brennstäbe



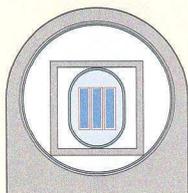
Stahlhülle des Reaktors (25 cm)



Strahlenschutz (1 m Stahlbeton)



Sicherheitsbehälter (3 cm Stahl)



Meterdicke Stahlbetonhülle

B2 Schutzbarrieren

Kernfusion statt Kernspaltung: eine andere Form der Kernenergie

kaum radioaktive Rückstände,
dafür technisch aufwendig und bisher gibt
es keine wirtschaftlichen Fusionsreaktoren

Energie aus der Kernfusion

Natürliche Fusion in der Sonne Ein 1,4 Millionen km dicker Feuerball mit einer Oberflächentemperatur von 5800 K ist unsere Sonne. Ihre Strahlungsleistung beträgt rund $4 \cdot 10^{26}$ W, davon treffen pro Sekunde $1,7 \cdot 10^{17}$ J unsere Erde – und das 10 Milliarden Jahre lang! Die von der gesamten Menschheit in einem Jahr umgewandelte Energiemenge liefert uns die Sonne in einer guten Stunde. Die Quelle dieser unvorstellbaren Energiemenge sind Kernfusionsprozesse im Sonnenzentrum. Dort ist der Wasserstoff, aus dem die Sonne zu 90% besteht, durch die Massenanziehungskräfte so stark komprimiert, dass Temperaturen von 10 Millionen Kelvin auftreten. Bei so hohen Temperaturen gibt es keine Atome mehr, sondern nur noch nackte Kerne und Elementarteilchen, man spricht von einem **Plasma**, dem vierten Aggregatzustand der Materie.

Die kinetische Energie der Protonen in diesem heißen Plasma ist so groß, dass sie sich trotz der elektrischen Abstoßungskraft so nahe kommen können, um in den Wirkungsbereich der starken anziehenden Kernkraft zu gelangen.

In einem solchen **Fusionsplasma** verschmelzen nacheinander vier Protonen zu Heliumkernen, wobei zwei davon im Kern zu Neutronen umgewandelt werden. Zum Teil helfen bei der Fusion Kohlenstoff-, Sauerstoff- und Stickstoffkerne wie Katalysatoren mit. Es werden pro gebildetem ${}^4_2\text{He}$ etwa 25 MeV Bindungsenergie aufgrund des Massendefekts freigesetzt. Etwa eine Million Jahre dauert es dann, bis diese Energie durch viele Absorptions- und Emissionsprozesse in der Strahlungszone die Sonnenoberfläche erreicht und hauptsächlich in Form von Licht abgestrahlt wird (\rightarrow B1).

Die Zukunft unserer Sonne und ihr Ende

Lange bevor der Wasserstoff aufgebraucht ist, verschiebt sich die Fusionszone weiter nach außen, weil sich das gebildete Helium im Kern der Sonne ansammelt. Dort steigt die Temperatur auf über 100 Millionen Kelvin an und durch Fusionen von Heliumkernen entstehen Kerne mit höheren Massenzahlen.

In etwa 3,5 Milliarden Jahren wird sich unsere Sonne durch die Vergrößerung der Fusionszone gewaltig aufblähen und sich in einen roten

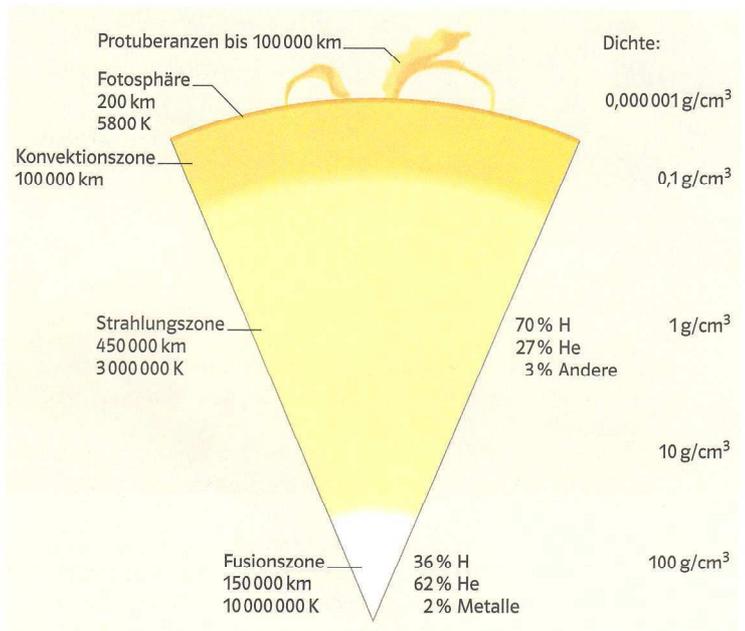
Riesenstern verwandeln (\rightarrow B2). Mit 275 Millionen km Radius, das 400-fache ihres jetzigen, wird sie die inneren Planeten Merkur, Venus, Erde und Mars „verschluckt“ haben!

Schließlich wird die rote Riesen Sonne explodieren. Verbleibende Reste werden zum weißen Zwergstern mit einem Radius von 10 000 km und extrem großer Dichte zusammenfallen und langsam erkalten (\rightarrow B3).

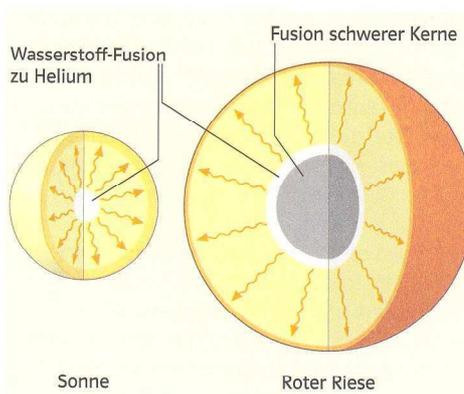
■ A1 Weshalb sind Sternexplosionen die Voraussetzung für das Entstehen neuer Sterne und Planeten?



B3 Der astronomische Nebel NGC 6543 ist die explodierte Gashölle eines roten Riesen mit weißem Zwerg im Zentrum.



B1 Aufbau der Sonne



B2 Fusionszonen in der Sonne und im roten Riesenstern

Schlusspunkt

Radioaktivität und Kernenergie

Die Entdeckung der Radioaktivität

HENRI BECQUEREL entdeckte im Jahr 1896 eine Strahlung, die vom Uransalz ausging.

Nachweisverfahren

Man kann Strahlung aus radioaktiven Quellen z. B. mit dem Geiger-Müller-Zählrohr, in einer Nebelkammer oder durch Schwärzung von Fotopapier nachweisen.

Radioaktivität ist überall

Selbst wenn kein radioaktives Präparat in der Nähe ist, ermittelt man mit einem Zählrohr z. B. 20 Impulse pro Minute. Das ist der Nulleffekt.

Ursache für diese so genannte Umgebungsstrahlung sind kosmische und terrestrische Strahlenquellen.

α -, β -, γ -Strahlung

Man unterscheidet drei Arten von Strahlung, die bei der Umwandlung von Atomkernen entstehen:

α -Strahlung besteht aus Heliumkernen (\triangleright B 1), die den Kern eines radioaktiven Elementes mit großer Geschwindigkeit verlassen.

β -Strahlung besteht aus schnellen Elektronen (\triangleright B 2). Sie verlassen den Kern mit annähernd Lichtgeschwindigkeit. Ihre Reichweite in Luft ist größer als die von α -Strahlung.

Gibt ein Kern α - oder β -Strahlung ab, so kommt es zu einer Kernumwandlung.

γ -Strahlung besteht nicht aus Teilchen. Es handelt sich um elektromagnetische Strahlung, etwa wie Licht.

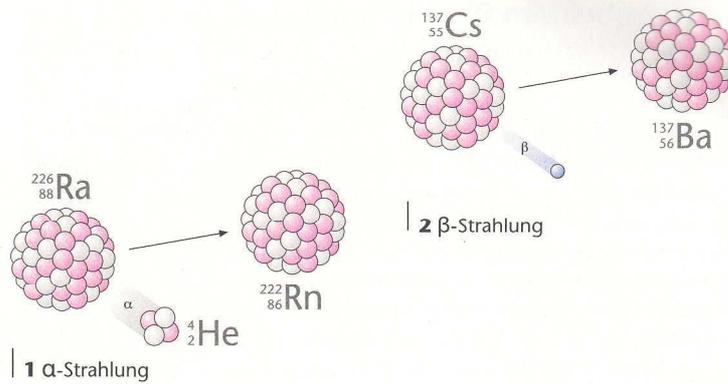
Halbwertszeit

Die Halbwertszeit ist die Zeit, in der die Hälfte der Atome eines radioaktiven Stoffes zerfallen ist.

Aktivität

$$\text{Aktivität} = \frac{\text{Kernumwandlungen}}{\text{Zeit}}$$

Die Einheit der Aktivität ist das Becquerel (1 Bq).



Strahlenschäden

α -, β - und γ -Strahlung können lebende Zellen schädigen. Mögliche Folgen sind Fröhschäden (z. B. Übelkeit, Hautrötung, Geschwüre), Spätschäden (wie z. B. Krebs) und genetische Schäden durch Veränderung der Erbinformationen. Genetische Schäden können an spätere Generationen weitergegeben werden.

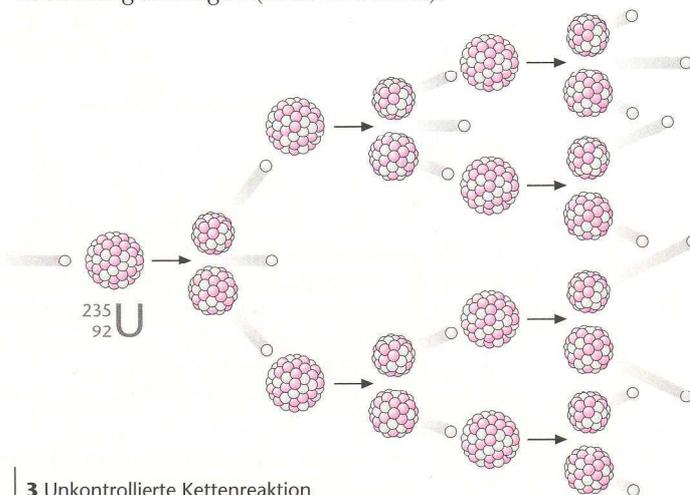
Schutz vor Strahlenschäden:

- Abstand von der Strahlungsquelle
- kurze Bestrahlungszeiten
- Abschirmung gegen die Strahlungen

Kernspaltung und Kettenreaktion

Durch Beschuss mit einem Neutron wird z. B. ein Uran-235-Kern in zwei leichtere Spaltprodukte sowie zwei oder drei Neutronen zerlegt (\triangleright B 3). Gleichzeitig wird viel Energie frei.

Die Neutronen können weitere Spaltungen auslösen. Dadurch kann die Zahl der Kernspaltungen innerhalb kurzer Zeit lawinenartig ansteigen (Kettenreaktion).



3 Unkontrollierte Kettenreaktion