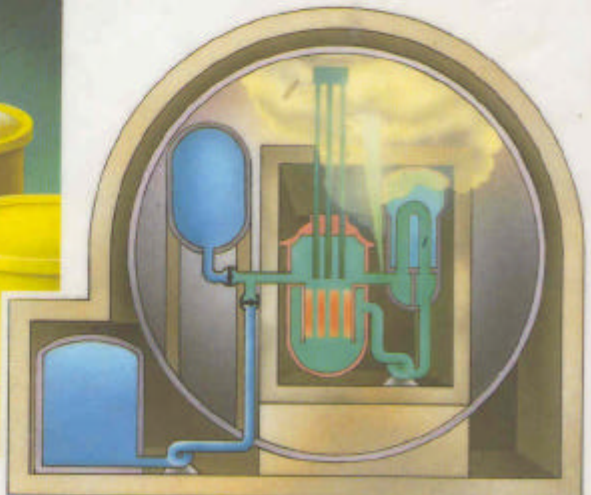
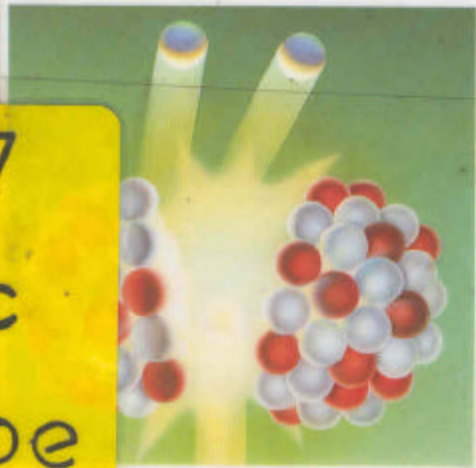


**WAS
IST
WAS**



Atom Energie

BAND 3



5.7
Jc
Jbe

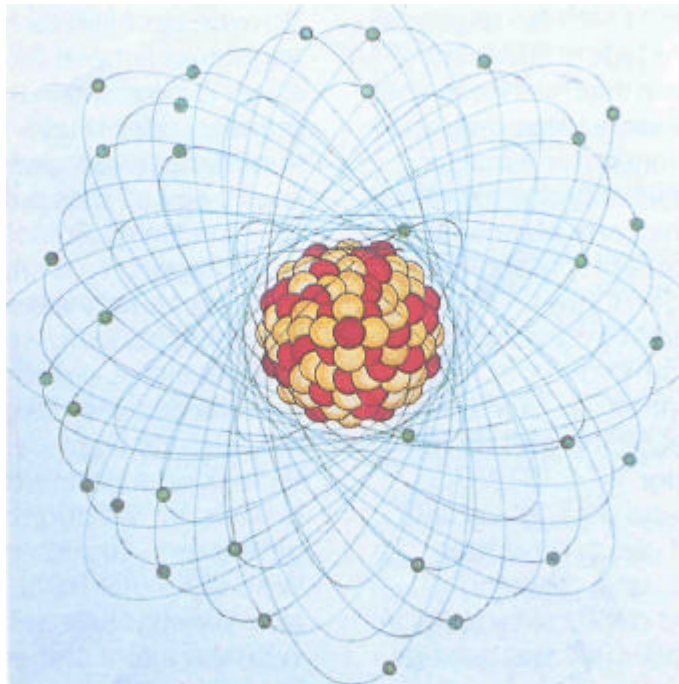


Ein Buch aus der Reihe

Atom- Energie

Von Dr Erich Übelacker

Illustriert von Manfred Kostka und Frank Kliemt



Zeichnung eines Atoms mit Elektronenhülle und Kern

Tessloff Verlag

Vorwort

Die vielleicht wichtigste Formel der Physik, ja der ganzen jüngeren Menschheitsgeschichte, ist sehr einfach. Sie heißt $E = mc^2$ und besagt, daß man winzige Materiemengen in gewaltige Energien umwandeln kann. Die Formel wurde 1905 von Albert Einstein veröffentlicht und bildet die Grundlage für das Verständnis von Atomenergie, Kernspaltung und Kernfusion, Reaktor und Atombombe, Sonnenstrahlung und Teilchenphysik.

Die Umwandlung von nur einem einzigen Gramm Materie brachte 1945 in Hiroshima 200.000 Menschen den Tod, andererseits kann man aus einem Kilogramm der Uransorte U-235 eine Energiemenge gewinnen, zu deren Erzeugung 67 Kesselwagen mit je 30 t Heizöl nötig wären. Daß man sich die ungeheuren Energien, die in jedem Stückchen Materie stecken, nicht schon viel früher nutzbar machen konnte, liegt daran, daß nur bei Reaktionen der winzigen, erst in unserem Jahrhundert entdeckten Atomkerne nennenswerte Massenverluste auftreten, die zu entsprechenden Energiefreisetzungen führen. Dieses Buch soll eine kleine Einführung in die Welt dieser Atomkerne und der Kerntechnik sein. Wie groß der Stellenwert der Kernenergie ist, sieht man an der Tatsache, daß in der WAS IST WAS-Reihe, die heute rund 80 Titel umfaßt, die „Atomenergie“ gleich an dritter Stelle hinter „Erde“ und „Mensch“ kommt. Spätestens der Reaktorunfall in Tschernobyl im April 1986 hat gezeigt,

was für einschneidende Folgen die Nutzbarmachung der Kernenergie für uns alle haben kann. Die Ablösung der ersten Fassung dieses Buches durch einen völlig neuen Text hat mehrere Gründe. Zunächst einmal sind viele neue Begriffe und Entdeckungen wie „Schneller Brüter“, „Wiederaufarbeitungsanlage“ und „Endlagerung“ dazugekommen. Fast alle früher verwendeten Energie- und Dosisseinheiten, wie Kalorie, Rem oder Curie, haben heute keine Gültigkeit mehr. Außerdem ist auch die Bundesrepublik seit Mitte der Siebziger Jahre weit mehr in die Kernenergie eingestiegen. Bei einem Thema wie der Kernenergie mit ihren fast unbegrenzten Möglichkeiten für Krieg und Frieden ist es sehr schwer, sachlich zu bleiben. Leicht kann man je nach Stimmung und politischer Gesinnung in technische Schwärmereien oder totale, lähmende Zukunftsangst verfallen. Dieser Band versucht, soweit dies auf 48 Seiten möglich ist, eine kleine Entscheidungshilfe für „Kernfragen“ zu sein, ohne einseitig Stellung zu nehmen. Die gewaltigen Zukunftschancen, welche uns die Kernenergie bietet, sollen genauso beschrieben werden wie die ungeheuren Gefahren, die uns beim Versagen der Kerntechnik oder gar durch einen Atomkrieg drohen. Im Vordergrund soll jedoch, getreu dem Grundsatz der WAS IST WAS-Reihe, die Erklärung aller wichtigen Begriffe aus diesem Wissensgebiet stehen.

WAS IST WAS, Band 3

Illustrationen und grafische Darstellungen: Manfred Kostka und Frank Kliemt

Copyright 1983 Tessloff Verlag | Nürnberg | Hamburg

Die Verbreitung dieses Buches oder von Teilen daraus durch Film, Funk oder Fernsehen, der Nachdruck und die fotomechanische Wiedergabe sind nur mit Genehmigung des Tessloff Verlages gestattet.

ISBN 3-7886-0243-0

Persönliches Vorwort:

Dieses eBook ist nicht zum Verkauf bestimmt.

Das Layout entspricht NICHT dem der Originalen Büchern, da ich finde, das man es so um einiges besser lesen und durchblättern kann.

Wie viele vielleicht wissen ist das Original, fast immer, im zweispalten Text gehalten.

Mit den besten Wünschen

Und
Viel Spaß

Inhalt:

| | |
|--|-----------|
| Persönliches Vorwort..... | 4 |
| Energie und Gesellschaft | 6 |
| Was ist Energie? | 6 |
| Wie mißt man Energie? | 6 |
| Welche Energiequellen gibt es?..... | 7 |
| Was versteht man unter Primär- und Sekundärenergie? | 8 |
| Wer verbraucht die meiste Energie? | 9 |
| Gehen die Energiequellen der Erde zu Ende? | 9 |
| Gehen die Energiequellen der Erde zu Ende? | 10 |
| Was ist Materie? | 10 |
| Kann man Materie in Energie verwandeln?..... | 10 |
| Die Welt der Atomkerne..... | 12 |
| Was ist ein Atom? | 12 |
| Wie ist ein Atom aufgebaut?..... | 13 |
| Woraus bestehen Atomkerne?..... | 14 |
| Wie unterscheidet man die Elemente?..... | 15 |
| Was ist ein Isotop?..... | 15 |
| Warum zerplatzen die Atomkerne nicht?..... | 16 |
| Was ist Radioaktivität?..... | 16 |
| Wie zerfallen die Atomkerne?..... | 17 |
| Was versteht man unter der Halbwertszeit?..... | 17 |
| Was versteht man unter Aktivität oder Dosis?..... | 18 |
| Kann man Atomkerne spalten?..... | 19 |
| Warum sind Neutronen so gute Atomgeschosse?..... | 19 |
| Was geschieht, wenn ein Uranatom gespalten wird? | 19 |
| Was ist eine Kettenreaktion?..... | 21 |
| Was ist eine Anreicherung?..... | 22 |
| Was ist ein Moderator?..... | 22 |
| Was versteht man unter Kernfusion?..... | 23 |
| Wie gewinnt die Sonne ihre Energie?..... | 23 |
| Kernkraftwerke heute und morgen..... | 24 |
| Was ist ein Kraftwerk? | 24 |
| Was ist ein Kernkraftwerk? | 25 |
| Wie funktioniert ein Siedewasserreaktor?..... | 25 |
| Wie funktioniert ein Siedewasserreaktor?..... | 26 |
| Was ist ein Druckwasserreaktor?..... | 26 |
| Was ist ein Brutreaktor? | 28 |
| Wie funktioniert ein Hochtemperaturreaktor?..... | 29 |
| Ist die Kernfusion die Hauptenergiequelle des 21. Jahrhunderts?..... | 29 |
| Der Brennstoffkreislauf | 31 |
| Uranbergbau — Entsorgung und Wiederaufarbeitung | 31 |
| Was versteht man unter nuklearem Brennstoffkreislauf? | 31 |
| Wie gewinnt man Uran?..... | 32 |
| Wie erzeugt man angereichertes Uran? | 32 |
| Wie werden die Brennelemente hergestellt?..... | 34 |
| Wie werden die ausgebrannten Brennstäbe transportiert? | 34 |
| Was geschieht mit den ausgebrannten Brennelementen?..... | 35 |
| Was ist eine Wiederaufarbeitungsanlage?..... | 36 |
| Wohin mit dem Atommüll? | 36 |
| Kann man Atommüll sicher lagern?..... | 38 |
| Ist die Kernenergie rentabel?..... | 39 |
| Kernenergie und Umwelt..... | 40 |
| Sind Kernkraftwerke gefährlich?..... | 40 |
| Belasten Kernkraftwerke die Umwelt?..... | 42 |
| Sind Wiederaufarbeitungsanlagen gefährlich?..... | 42 |
| Sind Wiederaufarbeitungsanlagen gefährlich?..... | 43 |
| Wie sicher ist die Endlagerung?..... | 43 |
| Beeinflussen Kühltürme das Wetter?..... | 44 |
| Können uns die Atomanlagen anderer Länder gefährden? | 44 |
| Kann ein Kernkraftwerk zu einer Atombombe werden?..... | 45 |
| Was ist eine Atombombe?..... | 45 |
| Wie würde die Welt nach einem Atom krieg aussehen? | 46 |
| Soll ich die Kernenergie nun ablehnen oder befürworten? | 46 |



Energie kann in verschiedenen Formen gespeichert werden.

Energie und Gesellschaft

Was ist Energie?

Alle sprechen von Energie. Eine bestimmte Schokoladensorte soll verbrauchte Energie zurückbringen, ein vitaler Mensch ist ein Energiebündel, Lehrer und Erzieher nehmen sich immer wieder vor, energisch einzuschreiten. Wissenschaftler beschäftigen sich mit Hochenergiephysik, Politiker und Wirtschaftsfachleute diskutieren über Sonnen-, Wind- oder Kernenergie. Aber selbst Experten fällt es schwer zu sagen, was Energie eigentlich ist! Man kommt der Wahrheit sehr nahe, wenn man Energie als gespeicherte Arbeit oder die Fähigkeit, Arbeit zu leisten, bezeichnet. Energie ist also nötig, um etwas in Bewegung zu setzen, zu beschleunigen, zu heben, zu erwärmen oder zu beleuchten. Ohne energiereiche Nahrung ist kein Leben möglich, ohne Energiezufuhr fährt kein Auto, die Heizung bleibt kalt. Energie kann weder aus dem Nichts erzeugt werden, noch verlorengehen. Sie kann jedoch natürlichen Energiequellen, wie Kohle, Erdgas oder Uran, entnommen und in für uns geeignete Energieformen, z. B. Wärme und Licht, umgewandelt werden. In unserer Umwelt finden wir verschiedene Speicherformen der Energie: Wasser in einem Stausee hat Höhenenergie, ein fahrendes Auto Bewegungsenergie, in einem Flitzbogen steckt Spannungsenergie, Gewitterwolken tragen elektrische Energie, Sonnenstrahlen transportieren Lichtenergie, aus Heizöl gewinnt man chemische Energie, und im Uran steckt die viel diskutierte Kernenergie, der dieses Buch gewidmet ist.

Wie mißt man Energie?

Längen mißt man in Metern oder Zentimetern, Zeitabläufe in Sekunden, Minuten oder Stunden. Auch für Energiemengen gibt es solche Maßeinheiten. Die bekannteste von ihnen ist die Kilowattstunde (kWh). Zum Beispiel wird der „Stromverbrauch“ jedes Haushalts in Kilowattstunden angegeben. Weitere wichtige Energieeinheiten sind das Joule (J), die Wattsekunde (Ws) und die Steinkohleneinheit (SKE). 1 t SKE ist diejenige Energie, die man einer Tonne durchschnittlicher Steinkohle entnehmen kann.

Energieeinheiten

1 Joule (J)

1 Wattsekunde (Ws) - 1 J

1 Kilowattstunde (kWh) = 3.600.000 Ws

1 Tonne Steinkohleneinheit (t SKE) = 8.141 kWh

Die jedem um seine schlanke Linie besorgten Menschen bekannte Energieeinheit Kilokalorie (kcal) ist zwar offiziell nicht mehr zugelassen, wird jedoch nicht so schnell aus unserem Sprachschatz verschwinden. Einen weiteren sehr wichtigen Begriff müssen wir noch kennenlernen: die Leistung. Unter der Leistung eines Kraftwerks versteht man seine Energieproduktion pro Zeiteinheit, z. B. pro Stunde. Die Leistungsangaben auf elektrischen Geräten sagen uns, wieviel Energie diese pro Stunde verbrauchen.

Leistungseinheiten

1 Watt (W)

1 Kilowatt (kW) = 1.000 W

1 Megawatt (MW) = 1.000.000 W = 1.000 kW

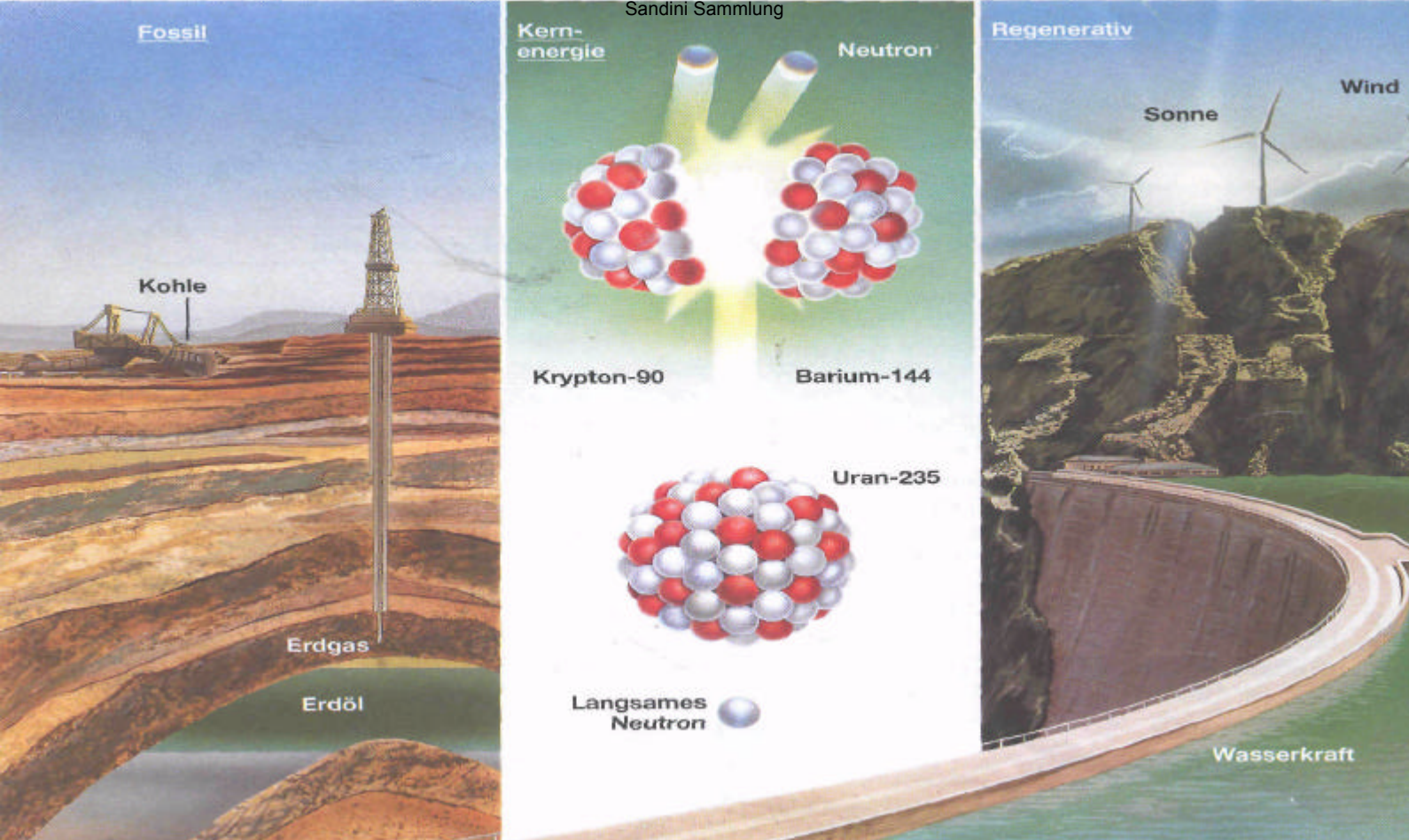
Ein 2-kW-Heizofen verbraucht pro Stunde 2 kWh elektrische Energie, ein Kernkraftwerk mit einer Leistung von 1000 Megawatt oder 1.000.000 kW liefert pro Stunde 1.000.000 kWh. Häufig wird der elektrische Strom mit der elektrischen Energie verwechselt. Man spricht fälschlicherweise vom „Stromverbrauch“, statt vom Verbrauch elektrischer Energie. Wenn in diesem Buch Strom manchmal als Energieform bezeichnet wird, so ist dies eine Anpassung an den allgemeinen Sprachgebrauch.

Welche Energiequellen gibt es?

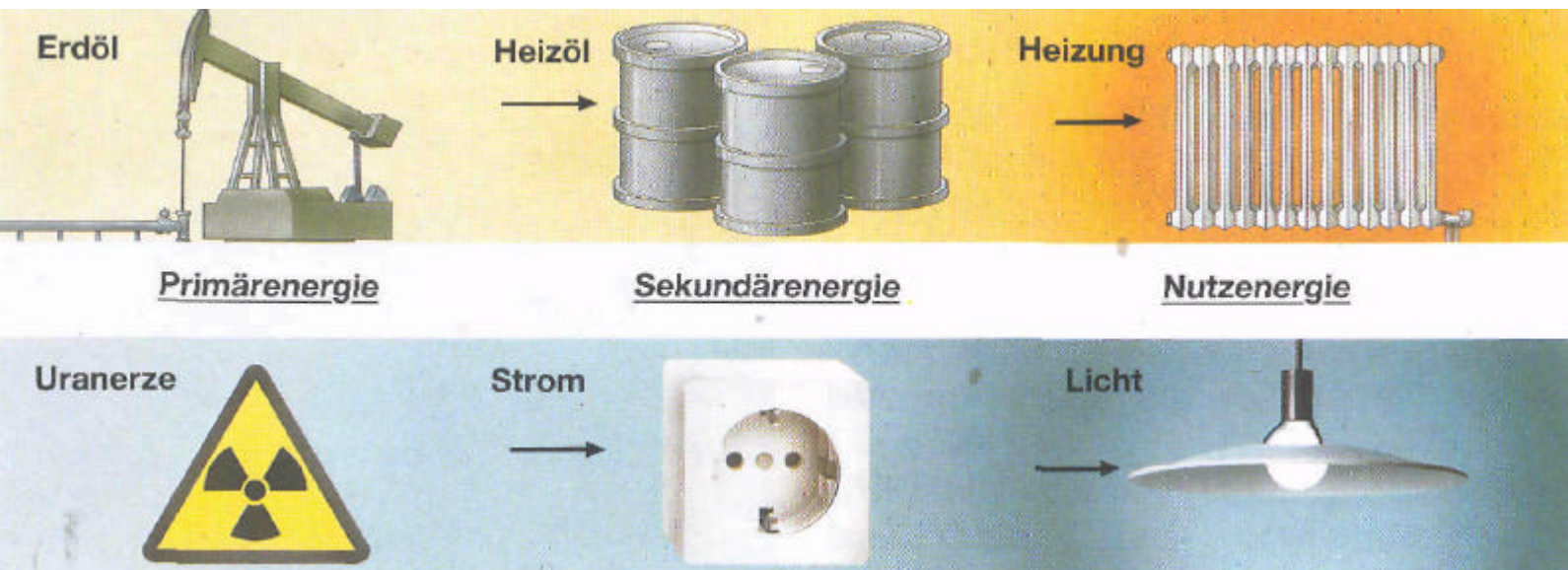
Zur Deckung unseres Energiebedarfs stehen uns drei große Gruppen von Energieträgern zur Verfügung. Die fossilen Brennstoffe, wie Kohle, Erdöl und Erdgas, sind im wesentlichen Reste von Pflanzen und Tieren, die vor Jahrtausenden die Erde bevölkert haben. Wandelt man sie in Energie um, so sind sie unwiederbringlich verloren. Da man aus ihnen viele wichtige Dinge, wie Medikamente, Dünger, Kunststoffe und Farben, herstellen kann, ist es an sich viel zu schade, sie einfach zu verbrennen, zumal ihre Verbrennungsprodukte unsere Lufthülle vergiften.

Die regenerativen Energiequellen, wie Sonne, Wind, Gezeiten, Wasserkraft und Umgebungswärme, erneuern sich ohne menschliches Zutun von selbst und belasten die Umwelt nicht. Leider reichen sie beim heutigen Stand der Technik bei weitem nicht aus, den immer noch wachsenden Energiehunger der Menschen zu stillen. Die Kernbrennstoffe wie Uran und Plutonium öffnen uns das Tor zu den ungeheuren Energien, welche in den Atomkernen stecken.

Aus einem kg Kohle lassen sich rund 8 kWh, aus einem kg der Uransorte U-235 23.000.000 kWh Wärme gewinnen! Da die Kernbrennstoffe für die chemische Industrie praktisch wertlos sind, kann man sie mit gutem Gewissen zur Energieerzeugung benutzen. Bei unsachgemäßer Behandlung bergen sie jedoch Gefahren in sich, die jede Vorstellungskraft überschreiten. Auch kann man bekanntlich aus ihnen Bomben herstellen, die alles menschliche Leben auf der Erde auslöschen können. Auf der anderen Seite belasten, wie wir noch sehen werden, Kernkraftwerke bei Einhaltung aller Vorschriften die Umwelt nur sehr wenig, da kaum gefährliche Stoffe austreten.



Zur Deckung unseres Energiebedarfs stehen drei große Gruppen von Energieträgern zur Verfügung: Man unterscheidet fossile, regenerative und nukleare Energiequellen.



Einige Beispiele für Primär-, Sekundär- und Nutzenergie.

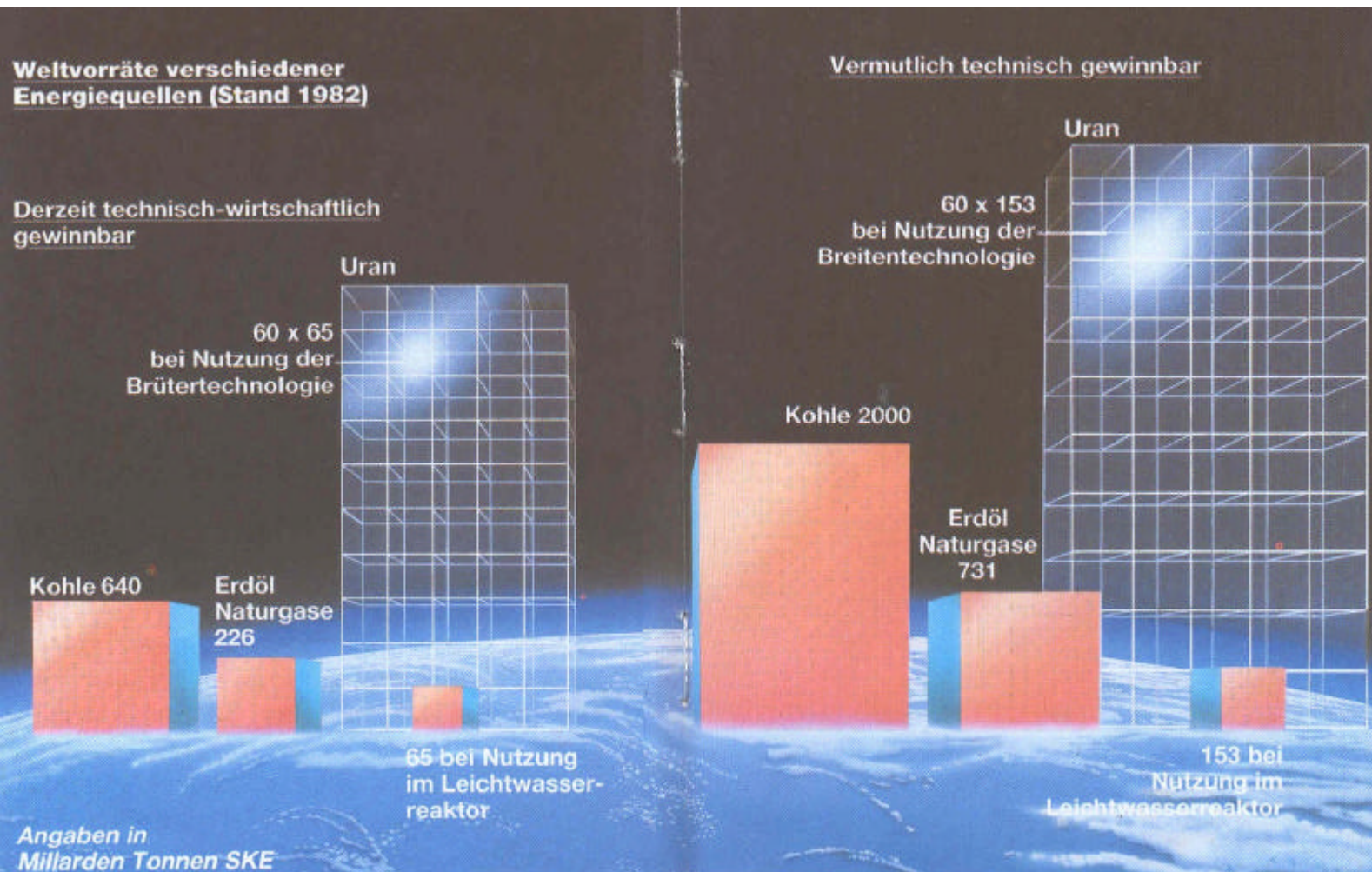
Was versteht man unter Primär- und Sekundärenergie?

Primärenergieträger sind Energierohstoffe in ihrer natürlichen Form vor jeder technischen Umwandlung, z. B. Steinkohle, Erdöl, Erdgas und Uranerze. Im allgemeinen Sprachgebrauch nennt man diese Stoffe einfach „Primärenergie“. Auch die Sonnenstrahlung, der Wind und die Wasserkraft werden als Primärenergie bezeichnet. Sekundärenergie ist durch Umwandlung aus Primärenergieträgern entstandene „veredelte Energie“, wie elektrischer Strom, Benzin und Heizöl. Diejenige Energie,

welche beim Verbraucher ankommt, bezeichnet man als Endenergie. Meist ist es Sekundärenergie wie Strom und Heizöl, manchmal auch Primärenergie, wie Brennholz, Sonnentrahlung oder Erdgas. Leider kommt immer nur ein Teil der Endenergie dem Verbraucher zugute. Man nennt ihn Nutzenergie, Beispiele hierfür sind das Licht, die Antriebsenergie für Maschinen oder die Heizwärme, welche man aus dem elektrischen Strom gewinnt.

Wer verbraucht die meiste Energie?

Den größten Teil der Endenergie verbrauchen die privaten Haushalte, also wir alle in unserem persönlichen Bereich. Viele Gegenstände, die uns zu Hause umgeben, der Küchenherd, die Lampen, der Fernseher, der Staubsauger, die Heizung, aber auch unsere Autos, haben einen unstillbaren Hunger auf Energie. Erst an zweiter Stelle folgt die Industrie. Noch weniger Energie verbrauchen Kleinverbraucher wie Landwirte, Handwerksbetriebe und Arztpraxen. An letzter Stelle folgt der öffentliche Verkehr mit seinen Bussen, Bahnen, Flugzeugen und Schiffen. Woher kommt die für all diese Verbraucher nötige Primärenergie? Nun, in der Bundesrepublik deckt nach wie vor das Erdöl den Löwenanteil mit rund 40 %, gefolgt von Steinkohle und Erdgas. Die Kernenergie hatte 1984 noch einen bescheidenen Anteil von knapp unter 10 %. Bei der Stromerzeugung war sie bei uns jedoch 1984 mit 25 %, 1985 mit 33 % (in Frankreich sogar mit 60 %) beteiligt. Auch in den meisten anderen Ländern steigt ihr Anteil von Jahr zu Jahr.



Die Weltvorräte verschiedener Energiequellen. Bei Nutzung der sogenannten Brütertechnologie hätten wir noch Kernenergie für ein Jahrtausend.

Gehen die Energiequellen der Erde zu Ende?

Der Weltprimärenergiebedarf liegt zur Zeit bei etwa 12 Milliarden t SKE pro Jahr. Er wird mit Sicherheit ansteigen, da immer mehr Menschen immer mehr Energie verbrauchen. Beim heutigen Stand der Technik kann man ohne zu großen Aufwand noch Kohle im Gegenwert von etwa 640 Mrd. t SKE und rund 226 Mrd. t SKE Erdöl und Erdgas finden. Dies würde bedeuten, daß diese Rohstoffe auch bei großer Sparsamkeit nach rund 100 Jahren verbraucht wären. Vermutlich gibt es noch riesige weitere Reserven fossiler Brennstoffe. Man spricht von 8000 Mrd. t SKE. Selbst bei Verbesserung der Fördermethoden sind uns jedoch nur etwa insgesamt 2000 Mrd. t SKE Kohle und 731 Mrd. t SKE Erdöl und Erdgas zugänglich. Diese Vorräte würden zwar noch für 2 bis 3 Jahrhunderte reichen, wären aber dann für alle späteren Generationen unwiederbringlich verloren und würden mit ihren Verbrennungsprodukten große Umweltschäden anrichten. Die vermutlich technisch gewinnbaren Uranvorräte der Erde erscheinen mit 153 Mrd. t SKE zunächst lächerlich gering, mit modernen Technologien, wie den sogenannten Brutreaktoren, kann man jedoch aus ihnen Kernbrennstoffe im Gegenwert von 9180 Mrd. t SKE gewinnen, so daß wir noch Kernenergie für ein Jahrtausend haben. Auch das ist, gemessen an der fernen Zukunft der Erde und des Menschen wenig. Für spätere Jahrhunderte eröffnen sich jedoch andere Möglichkeiten der Energiegewinnung. Neben der Sonnenwärme wird wahrscheinlich eine andere Form der Kernenergie, die Fusion, eine große Rolle spielen. Die Sonne, alle Sterne, aber auch die furchtbare Wasserstoffbombe gewinnen ihre gigantischen Energien durch diesen Prozeß. Hierfür wäre der Rohstoff praktisch in unbegrenzter Menge vorhanden, handelt es sich doch um die Wassermassen der Weltmeere! Neben der Sonne bietet also die Kernenergie sowohl kurz- als auch langfristig die größten Chancen für Wirtschaft und Wohlstand, allerdings nur, wenn wir die mit ihr verbundenen Umweltgefahren in den Griff bekommen.

Was ist Materie?

Ein Stein, ein Personenwagen, eine Armbanduhr und ein Mensch haben eins gemeinsam: sie haben eine Masse. Diese äußert sich durch ihr Gewicht, aber auch durch ihre Trägheit, also dem Widerstand, welchen man zu spüren bekommt, wenn man die Masse bewegen oder abbremsen will. Alles, was Masse hat, ist Materie. Früher glaubte man, Masse könne weder erzeugt noch vernichtet werden. Verbrennt man z. B. ein Stück Kohle, so wiegen im Rahmen der Meßgenauigkeit die Verbrennungsprodukte genauso viel wie das Ausgangsmaterial, also die Kohle und der zur Verbrennung nötige Sauerstoff: die Gesamtmasse bleibt erhalten.

Kohle ist ein Energieträger, der eine Masse hat. Aber es gibt auch masselose Energieträger, z. B. Lichtwellen. Bis zum Anfang unseres Jahrhunderts nahm man an, Masse und Energie seien grundverschiedene Dinge, die man niemals ineinander umwandeln kann. Doch dann kam Albert Einstein, einer der größten Denker aller Zeiten, und zeigte, daß die Materie nur eine von vielen denkbaren Energieformen ist.

Kann man Materie in Energie verwandeln?

Eine der wichtigsten Formeln aus Einsteins Relativitätstheorie lautet: $E = mc^2$ (E = Energie, m = Masse, c = Lichtgeschwindigkeit). Sie sagt uns, daß man unter bestimmten Bedingungen eine Masse m in einen gigantischen Energiebetrag E verwandeln kann. Man darf die Materie auch als Energieform ansehen, aus der andere Energiearten wie Wärme und Licht gewonnen werden können. Wie wir noch sehen werden, gelingt es in Kernreaktoren, einen kleinen Teil der Masse des Brennstoffs in Wärmeenergie

umzuwandeln. Aus einem kg der Uransorte U-235 kann man nach dieser Formel einen Energiebetrag gewinnen, zu dessen Erzeugung 93 Waggon mit je 30 t Kohle oder



Der große Physiker Albert Einstein.

67 Kesselwagen mit je 30 t Heizöl nötig wären, nämlich 23 000 000 kWh. Mit dieser Energiemenge könnten alle Bewohner der Bundesrepublik von Flensburg bis Oberstdorf leicht eine Stunde lang ihre Wohnungen beleuchten. Die Energie von einigen kg Uran-235 in einer Atombombe reichte aus, die Stadt Hiroshima in Schutt und Asche zu legen. Fassen wir also zusammen: Materie ist nur eine Energieform, die man unter bestimmten Bedingungen in andere Energiearten umwandeln kann. Auch beim Verbrennen eines Stückes Kohle geht, streng genommen, ein wenig Masse verloren. Bedeutend wird die Umwandlung von Masse in Energie jedoch erst im Reich der Atomkerne, bei deren Spaltung oder Aufbau gigantische Energiebeträge freigesetzt werden können. Mit der Gewinnung dieser Kernenergie soll sich das nächste Kapitel beschäftigen.



In einem Kilogramm Uran-235 steckt soviel Energie wie in 93 Waggon Kohle. Mit dieser Energiemenge (23 000 000 kWh) könnten alle Bewohner der Bundesrepublik Deutschland ihre Wohnungen eine Stunde lang beleuchten.



Schon vor über 2000 Jahren interessierten sich die Menschen im alten Griechenland für den Aufbau, der Materie.

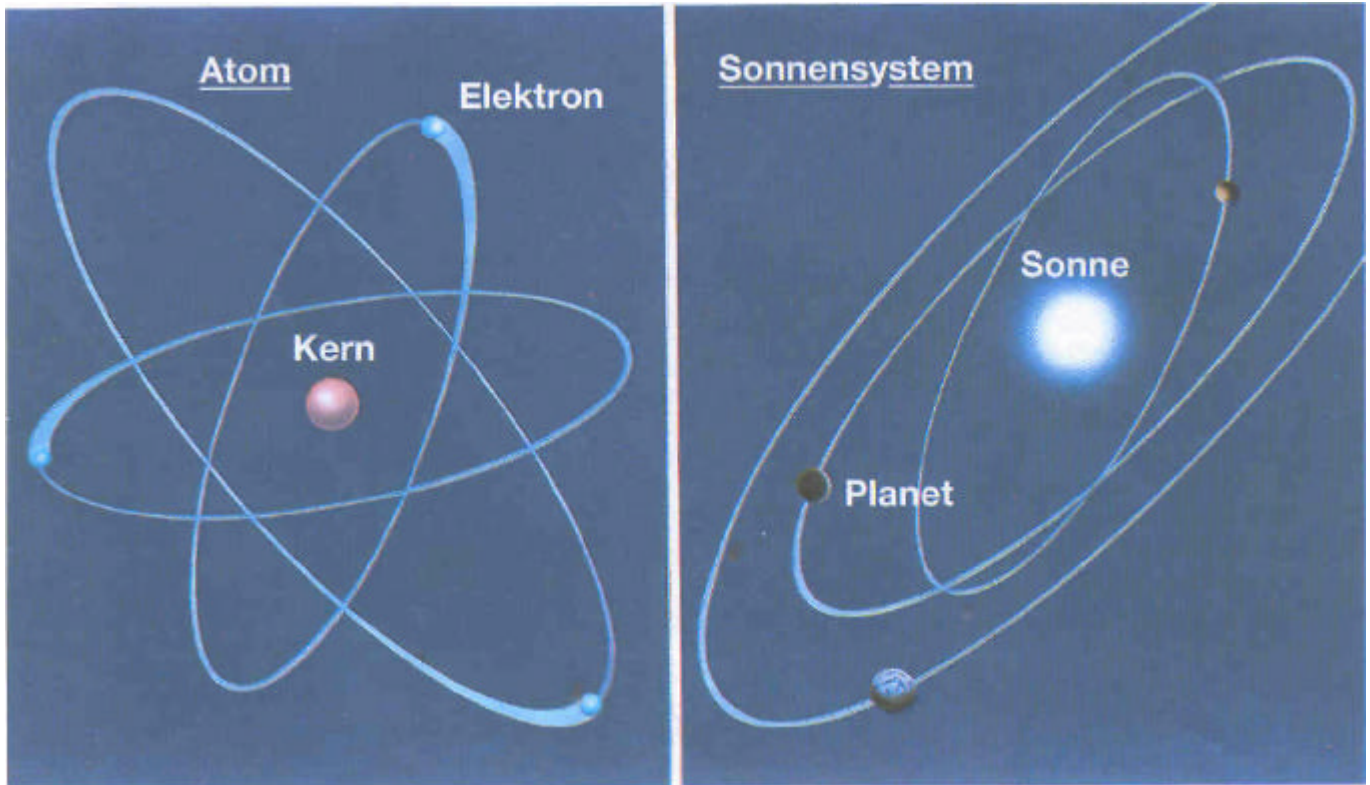
Die Welt der Atomkerne

Was ist ein Atom?

Schon vor mehr als 2000 Jahren sprach man von Atomen. Demokrit, einer der größten Gelehrten im Alten Griechenland, nahm an, alle Materie bestehe aus kleinsten, nicht mehr teilbaren Teilchen, die er „Atome“ nannte. Er kam damit der Wahrheit erstaunlich nahe. Auch viele andere griechische Philosophen und Wissenschaftler beschäftigten sich damals mit Materie und Weltall. Man bestimmte den Erdumfang mit großer Genauigkeit, kannte die Entfernung von der Erde zum Mond und wußte, daß sich unser Planet um die Sonne dreht. Fast alle diese Erkenntnisse gingen jedoch merkwürdigerweise wieder verloren. Die Menschen interessierten sich in der Folgezeit mehr für Weltreiche, Kriege, Kathedralen und Hexenprozesse.

Erst um das Jahr 1800 wurde die uralte Atomidee wieder aufgenommen. Man erkannte, daß es verschiedene Atomsorten geben muß, um alle in der Natur vorhandenen Stoffe und Erscheinungen zu erklären. 1803 entdeckte der englische Lehrer John Dalton, daß es Stoffe gibt, die nur aus einer Atomsorte bestehen. Man nennt sie chemische Elemente. Zu ihnen gehören Gold, Eisen und Sauerstoff. Reines Eisen besteht also nur aus Eisenatomen, reines Gold nur aus Goldatomen. Ein Eisenatom ist das kleinstmögliche Eisenteilchen. Man kann es zwar zertrümmern, aber dann sind seine Bestandteile kein Eisen mehr. Ähnliches gilt für das Gold und alle

anderen chemischen Elemente. In vielen Chemiebüchern findet man daher folgende Erklärung des Atombegriffs: „Ein Atom ist der kleinste Baustein eines chemischen Grundstoffs oder Elements, der ohne Verlust der typischen Eigenschaften dieses Elements nicht mehr geteilt werden kann.“ Die Atome haben sehr verschiedene Massen, am leichtesten ist das Wasserstoffatom, Eisenatome sind viel schwerer, die für unser Thema besonders wichtigen Uranatome noch massereicher. Atome sind, gemessen an den Dingen unseres täglichen Lebens, winzig. Wenn wir Menschen so groß wie Atome wären, so fänden 100 Millionen von uns bequem in einem Stecknadelkopf Platz. Alle fünf Milliarden Menschen, die zur Zeit auf der Erde leben, würden in diesem Fall eine etwa 50 cm lange Kette bilden.



Im Sonnensystem (rechts) kreisen die Planeten um die Sonne. Beim Atom (links) kreisen die Elektronen um den Atomkern, der elektrisch positiv geladen ist und die negativen Elektronen anzieht.

Wie ist ein Atom aufgebaut?

1913 veröffentlichte der große dänische Physiker Nils Bohr sein berühmtes Atommodell, das auch heute noch der Wirklichkeit sehr nahe kommt.

Danach ist ein Atom ähnlich aufgebaut wie ein kleines Sonnensystem. Bei diesem kreisen um die massereiche Sonne in großem Abstand die Planeten, wie z. B. Merkur, Venus, Erde und Mars. Ähnlich ist es beim Atom. In seinem Zentrum befindet sich der kleine, aber sehr massereiche Atomkern. Um diesen kreisen in „riesigem“ Abstand winzige leichte Teilchen, die Elektronen. Der Kern ist elektrisch positiv geladen, die Elektronen negativ. Sie werden durch die elektrische Anziehungskraft des Kerns auf ihrer Bahn gehalten, ähnlich wie die Sonne mit ihrer Schwerkraft die Planeten an sich bindet. Wie klein Atomkerne sind, kann man sich folgendermaßen klarmachen: ein Wassertropfen besteht aus rund $6 \cdot 10^{21}$ oder 6 000 000 000 000 000 000 000 Atomen. So winzig ein einzelnes Atom ist, der Kern ist noch viel kleiner. Er füllt nur 1/1000 000 000 000 des Raumes aus, der dem Atom zusteht! Wäre ein Atomkern so

groß wie eine Kirsche und würde in einem Fußballstadion liegen, so wären die Elektronenbahnen etwa in den oberen Zuschauerrängen zu suchen. Obwohl der Kern nur ein Billionstel des Raumes im Atom einnimmt, besitzt er fast die ganze Masse des Atoms. Die Materie im Atomkern ist außerordentlich stark konzentriert. Könnte man den eben erwähnten Kern in der Größe einer Kirsche wirklich herstellen, so würde er rund 30 Millionen Tonnen wiegen und gar nicht im Stadion liegenbleiben, sondern zum



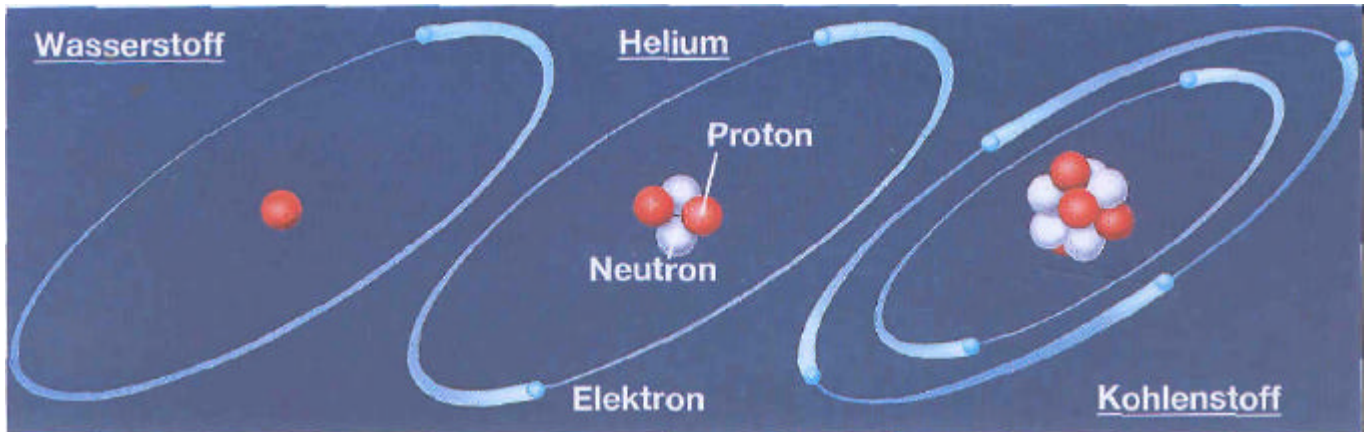
Mittelpunkt der Erde sinken!

Woraus bestehen Atomkerne?

Atomkerne bestehen aus zwei Arten von Teilchen, den Protonen und den Neutronen, Beide haben eine etwa gleich große Masse und sind rund 2000 mal schwerer als das Elektron. Während jedoch das Proton eine positive elektrische Ladung hat, die den gleichen Zahlenwert wie die negative des Elektrons besitzt, ist das Neutron, wie sein Name sagt, neutral, also nicht elektrisch geladen. Den Wert der elektrischen Ladung des Protons oder Elektrons nennt man Elementarladung. Protonen und Neutronen werden oft zusammenfassend als Nukleonen oder Kernbausteine bezeichnet und bestehen ihrerseits aus noch kleineren Teilchen, den Quarks.

Wie unterscheidet man die Elemente?

Die Zahl der Protonen im Atomkern entscheidet, zu welchem Element dieser Kern gehört. Wasserstoffatome z. B. haben ein Proton, Heliumatome 2, Kohlenstoffatome 6 und Uranatome 92 Protonen in ihren Kernen. Besitzt ein Atomkern 6 positive Protonen, so wird er von 6 negativen Elektronen umkreist, so daß das ganze Atom elektrisch neutral ist. Geht diesem Atom ein Elektron verloren, so stehen den 6 Protonen nur noch 5 Elektronen gegenüber. Das Atom hat dann die Ladung + 1. Solche geladenen Atome nennt man Ionen.



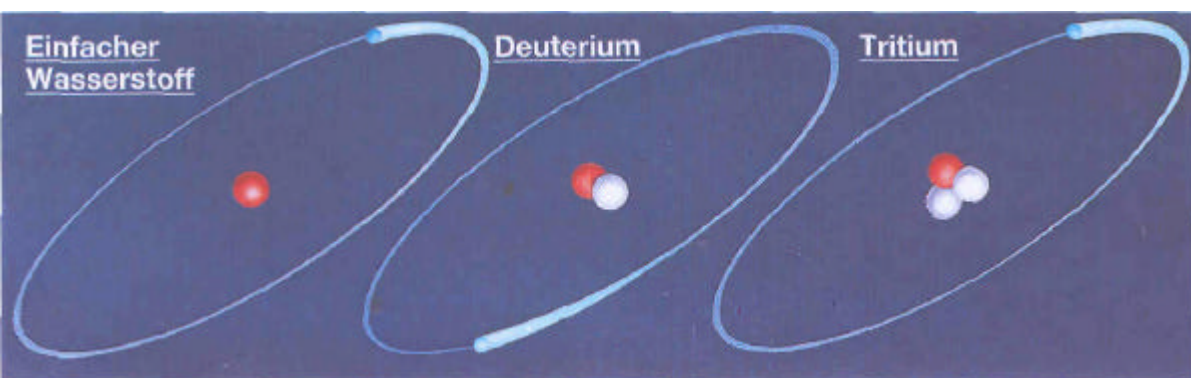
Wasserstoff hat 1 Proton, Helium besitzt 2 und Kohlenstoff 6 Protonen im Kern. Die Protonen sind hier rot, die Neutronen weiß gezeichnet.

Was ist ein Isotop?

Obwohl die Atome eines Elements alle die gleiche Anzahl von Protonen und Elektronen haben, können sie sich doch voneinander unterscheiden. Sie haben dann im Kern unterschiedliche Neutronenzahlen. Das leichteste und einfachste Element, der Wasserstoff, kommt z. B. in drei verschiedenen Formen vor: Es gibt Kerne mit 0, 1 und 2

Neutronen. Der normale Wasserstoff hat ein Proton und kein einziges Neutron. Eine zweite Wasserstoffart, das Deuterium, hat im Kern ein Proton und ein Neutron, das Tritium besitzt neben dem für Wasserstoff typischen einzigen Proton sogar zwei Neutronen. Diese drei verschiedenen Wasserstoffarten nennt man die Isotope des Elements Wasserstoff.

Ganz allgemein bezeichnet man Atome mit gleicher Protonenzahl, aber unterschiedlicher Neutronenzahl als die Isotope eines bestimmten Elements. Uran kommt in der Natur z. B. mit 234, 235 und 238 Kernbausteine oder Nukleonen vor. Wie wir gesehen haben, besitzen alle Urankerne 92 Protonen. Die drei Uranisotope haben daher 142 (234-92), 143 und 146 Neutronen in ihren Atomkernen. Man bezeichnet sie als U-234, U-235 und U-238. Die Gesamtzahl der Nukleonen eines Isotops wird oft als Massenzahl, die Zahl der Protonen als Ordnungszahl oder Kernladungszahl bezeichnet. U-235 hat also die Massenzahl 235 und die Ordnungszahl 92, das Wasserstoffisotop Deuterium hat die Massenzahl 2 und die Ordnungszahl 1.



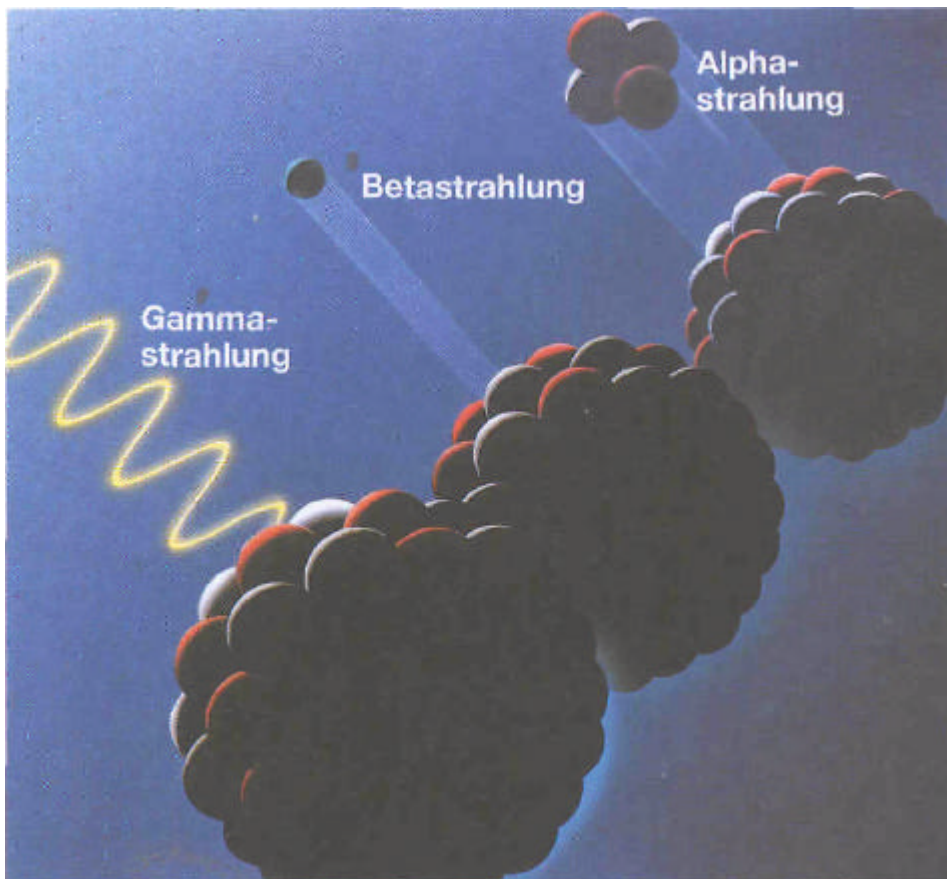
Die drei Isotope des Wasserstoffs: gewöhnlicher Wasserstoff hat 1 Proton, Deuterium 1 Proton und 1 Neutron, Tritium 1 Proton und 2 Neutronen.

Warum zerplatzen die Atomkerne nicht?

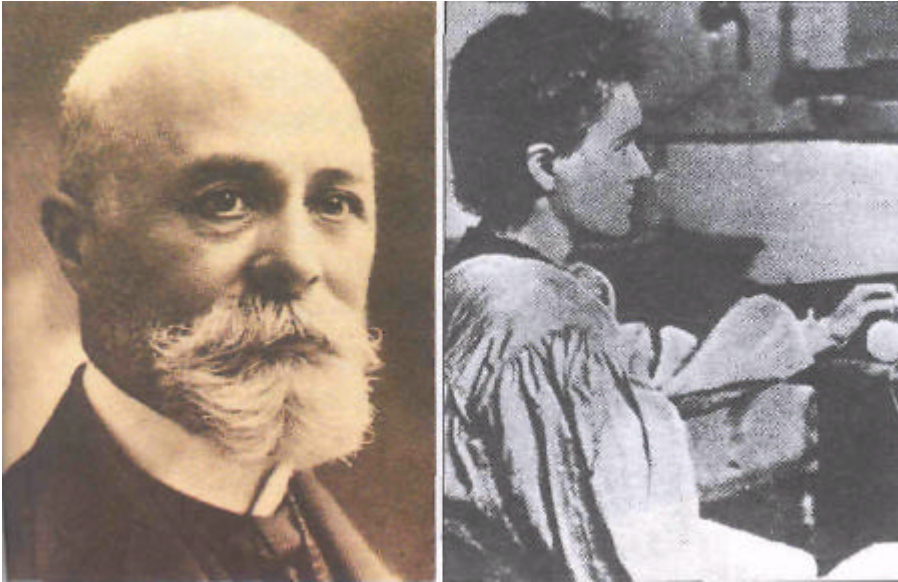
Bekanntlich stoßen sich zwei positive elektrische Ladungen gegenseitig ab. Ähnlich ist es bei zwei negativen Ladungen, während eine positive Ladung eine negative anzieht. So halten die positiven Atomkerne die negativen Elektronen fest und zwingen sie auf ihre Kreisbahnen. Nun haben wir gesehen, daß diese Kerne aus Neutronen und positiven Protonen bestehen. Sie müßten also eigentlich sofort zerplatzen, da sich positive Ladungen ja gegenseitig abstoßen. Wie ist es beispielsweise möglich, daß beim Kohlenstoff kern 6 positive Protonen auf engstem Raum zusammenbleiben? Das liegt daran, daß zwischen den Kernbausteinen eine andere, viel größere Kraft, die sogenannte Kernkraft, wirkt, allerdings nur, wenn die Nukleonen einen sehr kleinen Abstand voneinander haben.

Was ist Radioaktivität?

Nicht alle Atomkerne sind so stabil wie der Kohlenstoffkern. Viele Kerne zerfallen plötzlich, indem sie mit großer Wucht kleinere Teilchen ausschleudern und sich dadurch verformen und umwandeln. Diese Erscheinung nennt man Radioaktivität. Sie wurde vom französischen Physiker Henri Becquerel entdeckt und von dem Ehepaar Pierre und Marie Curie genauer untersucht. Lange Zeit wußte niemand so genau, was Radioaktivität eigentlich ist. Man fand zwar viele Elemente, die geheimnisvolle Strahlen abgaben, welche z. B. Fotoplatten schwärzten, aber lange Jahre mußten noch vergehen, bis die wahre Natur dieser Strahlung wissenschaftlich erforscht war. Heute wissen wir, daß es drei Arten von radioaktiver Strahlung gibt: die Alphastrahlung (auch α -Strahlung geschrieben) besteht aus Heliumatomkernen, die Betastrahlung (auch β -Strahlung) aus Elektronen, die Gammastrahlung (auch γ -Strahlung) aus masselosen Strahlungsteilchen oder Quanten, wie wir sie auch beim Licht und in den Röntgenstrahlen finden. Allerdings sind die Gamma-Quanten sehr viel energiereicher als die Röntgen- oder Lichtstrahlungsteilchen.



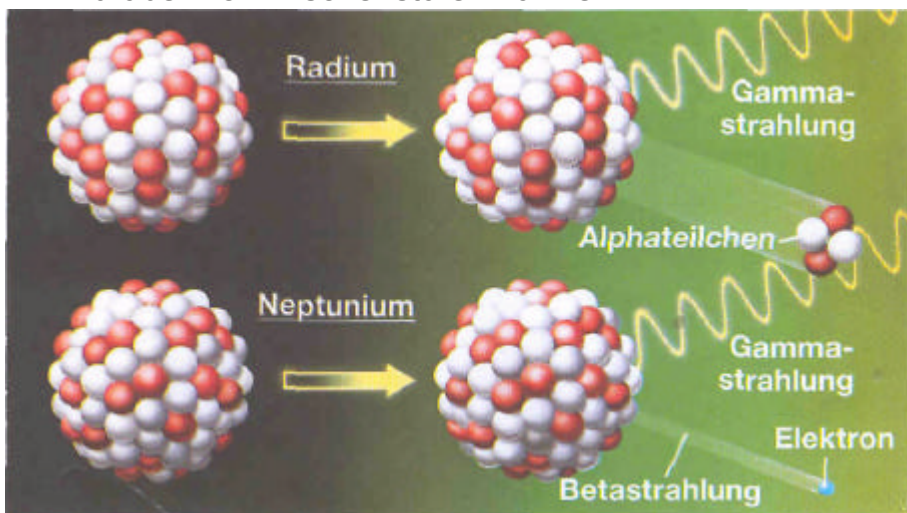
Alphastrahlung besteht aus Heliumkernen, Betastrahlung aus Elektronen, Gammastrahlung aus Strahlungsteilchen oder Quanten, Sie ist den Licht- und Röntgenstrahlen verwandt.



Antoine-Henri Becquerel und Marie Curie. Becquerel entdeckte 1896 die Radioaktivität, das Ehepaar Curie untersuchte sie näher.

Wie zerfallen die Atomkerne?

Viele Atomkerne, besonders die ganz schweren und großen, sind, wie wir gesehen haben, nicht stabil und zerfallen ähnlich, wie ein zu großes Gebäude einstürzen würde, wenn die Wände nicht dick genug sind. Ein Kern des Elements Radium kann z. B. ein Paket, das aus zwei Protonen und zwei Neutronen besteht, also ein Alphateilchen (auch α -Teilchen geschrieben), abstoßen. Da nun im übriggebliebenen Kern 2 Protonen fehlen, ist er kein Radiumkern mehr. Er hat sich in den eines anderen Elements, nämlich den des Radons, umgewandelt. Andere Kerne zerfallen dadurch, daß sie ein Elektron oder Betateilchen (auch β -Teilchen) aussenden. Dieses entsteht dadurch, daß sich ein Neutron in ein Proton und ein Elektron verwandelt, welches dann abgestoßen wird. Der Kern hat nun ein Proton mehr als vorher, auch hier liegt also eine Elementumwandlung vor. Meist ist auch die neu entstehende Atomart nicht stabil und zerfällt wiederum. So entstehen ganze Zerfallsreihen, die schließlich in einem stabilen Element enden. Uran z. B. wird über 13 Zwischenstufen zu Blei.

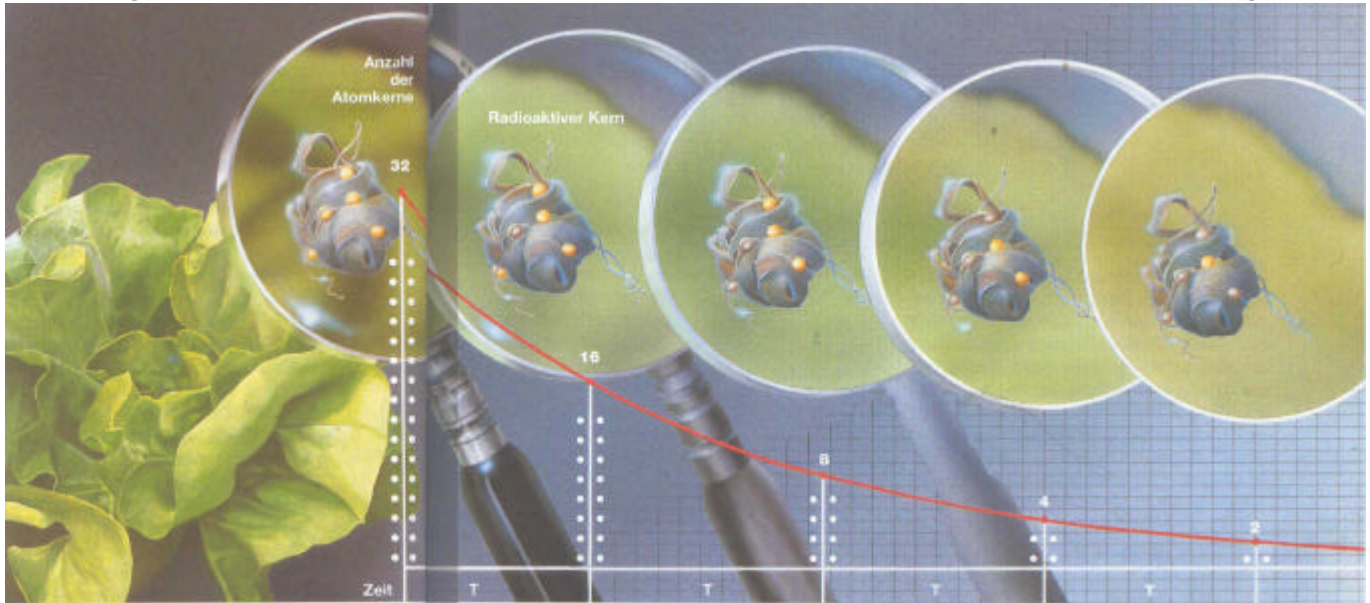


Radium sendet beim Zerfall Alpha- und Gammastrahlung aus, Neptunium Gamma- und Betastrahlung. Die Kerne wandeln sich dabei in die anderen Elemente um.

Was versteht man unter der Halbwertszeit?

Kein Mensch kann vorhersagen, wann ein bestimmter Atomkern zerfällt. Der Zerfall eines bestimmten Radiumkerns kann z.B. in einer Sekunde, morgen oder in 10 000 Jahren stattfinden. Eines allerdings läßt sich mit Sicherheit voraussagen: von 100 000 Radiumkernen sind nach genau 1620 Jahren 50 000, also 50%, zerfallen. Bei einem

Stück Uran-238 dauert es sogar $4\frac{1}{2}$ Milliarden Jahre, bis die Hälfte seiner Kerne zerfallen ist. Man nennt nun ganz allgemein die Zeit, in der die Hälfte aller Atomkerne eines radioaktiven Isotops zerfallen ist, die Halbwertszeit dieses Isotops. Wie wir gesehen haben, beträgt sie beim Uran-238 $4\frac{1}{2}$ Milliarden Jahre. Polonium hat eine viel kürzere Halbwertszeit. Sie liegt bei 138 Tagen, beim Francium nur bei 21 Minuten. Nach zwei Halbwertszeiten ist nur noch $\sqrt{2} \times \sqrt{2} = 1$, nach 10 Halbwertszeiten $\sqrt{2} \times \sqrt{2} \times \sqrt{2} \times \sqrt{2} \times \sqrt{2} \times \sqrt{2} \times \sqrt{2} \times \sqrt{2} \times \sqrt{2} \times \sqrt{2} = \frac{1}{1024}$ der ursprünglichen Kerne vorhanden. Von einem kg Radium bleiben also nach 10×1620 Jahren nur rund 0,98 Gramm übrig



Die Halbwertszeit T gibt den Zeitraum an, in dem die Hälfte aller zunächst vorhandenen Kerne zerfallen ist. Von jeweils 32 Millionen Atomkernen sind nach Ablauf von T 16 Millionen, nach Ablauf von $2T$ 8 Millionen, nach $3T$ 4 Millionen übrig.

Was versteht man unter Aktivität oder Dosis?

Unter *Aktivität* eines radioaktiven Stoffs versteht man diejenige Anzahl von Atomkernen, welche pro Sekunde zerfällt. Die Einheit der Aktivität ist das Becquerel (Bq), benannt nach dem schon erwähnten Entdecker der Radioaktivität. Zerfallen bei einer bestimmten Substanz zum Beispiel 403 Kerne pro Sekunde, so hat sie eine Aktivität von 403 Bq. Früher wurde als Einheit der Radioaktivität das Curie (Ci) verwendet ($1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$).

Die bei Kernumwandlungen auftretenden Strahlen stellen einen Energiestrom dar, der von der bestrahlten Materie ganz oder teilweise verschluckt oder absorbiert wird. Die pro kg des durchstrahlten Stoffs abgegebene Energie bezeichnet man als *Energiedosis*. Sie wird in Gray (Gy) gemessen. $1 \text{ Gy} = 1 \text{ Joule/kg} = 1 \text{ J/kg}$. Früher war auch die Einheit Rad (rd) üblich ($1 \text{ rd} = 10^{-2} \text{ Gy} = \sqrt{100} \text{ Gy}$).

Die Energiedosis von 100 Gy entspricht zwar nur einer Temperaturerhöhung unseres Körpers von $0,0001 \text{ }^\circ\text{C}$, kann aber bei Lebewesen bereits erhebliche Strahlenschäden bewirken, wenn sie kurzfristig einwirkt, da durch sie lebenswichtige Moleküle in unserem Körper zerstört werden können. Die biologische Wirkung von Strahlen ist allerdings nicht nur von der pro kg Körpergewicht absorbierten Energie abhängig. 1 Gy Alpha-Strahlung ist z. B. 20mal gefährlicher als 1 Gy Beta- oder Gammastrahlung. Man hat daher noch einen weiteren Begriff, die *Äquivalentdosis*, eingeführt, welche die unterschiedliche Gefährlichkeit der verschiedenen Strahlungsarten für Lebewesen berücksichtigt. Ihre Einheit heißt Sievert (Sv). Bis 1985

war auch die Einheit Rem (rem) = 10^{-2} Sv üblich. Man findet sie oft in älteren Büchern über Kernenergie. 20 Sievert «-Strahlung entsprechen einem Gray «-Strahlung, aber 20 Gray β - oder γ -Strahlung.

| | | |
|------------------------|---|---|
| Aktivität | = | $\frac{\text{Anzahl der Kernumwandlungen}}{\text{Zeit}}$ |
| Einheit: 1 Bq | = | $\frac{1 \text{ Zerfall}}{\text{Sekunde}}$ |
| Energiedosis | = | $\frac{\text{Absorbierte Strahlungsenergie}}{\text{Masse}}$ |
| Einheit: 1 Gy | = | 1 J/kg |
| Äquivalentdosis | = | Biologisch wirksame Energiedosis |
| Einheit: 1 Sv | = | 1 J/kg |

Kann man Atomkerne spalten?

Bis jetzt haben wir nur Atomkerne kennen gelernt, die selbst zerfallen. Im Jahre 1938 machten die beiden deutschen Wissenschaftler Otto Hahn und Fritz Straßmann eine weitere aufregende Entdeckung. Sie beschossen Uranatomkerne mit Neutronen und stellten fest, daß einige dieser Urankerne in zwei etwa gleich große Stücke gespalten wurden. Die technischen Einzelheiten sollen uns hier nicht interessieren, wichtig ist nur, daß dabei nicht radioaktive Kerne von selbst zerfielen, sondern eindringende Neutronen wie kleine Geschosse größere Atomkerne zerschlugen.

Warum sind Neutronen so gute Atomgeschosse?

Da Neutronen elektrisch neutral sind, kann man sie gut als Geschosse benutzen, um Atomkerne umzuwandeln oder zu spalten. Ein positives Proton ist hierfür ungeeignet, da es von den ebenfalls positiven Protonen des beschossenen Kerns zurückgestoßen oder abgelenkt wird. Elektronen sind in der Regel zu leicht, um einem massereichen Kern etwas anhaben zu können und werden von den Elektronen der Atomhüllen abgestoßen. Das elektrisch neutrale Neutron hat keinen dieser Nachteile. Es wird nicht von seinem Weg abgelenkt und hat genug Masse, um Atomkerne zu zerschlagen. Bald merkte man, daß langsam fliegende Neutronen in der Regel viel häufiger in Atomkerne eindringen als schnelle. Wie ein Physiker einmal bemerkte, rasen die schnellen Neutronen meist am Kern vorbei, „ohne diesen richtig gesehen zu haben“. Langsame oder, wie man auch sagt, thermische Neutronen halten sich dagegen länger in Kernnähe auf und haben mehr Zeit, mit ihm zu reagieren. Für unsere Begriffe sind sie allerdings noch immer sehr schnell: Ihre Geschwindigkeit beträgt etwa 2,2 km/s. Mit Neutronen kann man übrigens nicht nur Kerne spalten, sondern auch umwandeln, indem das Geschos in den Kern eingebaut wird.

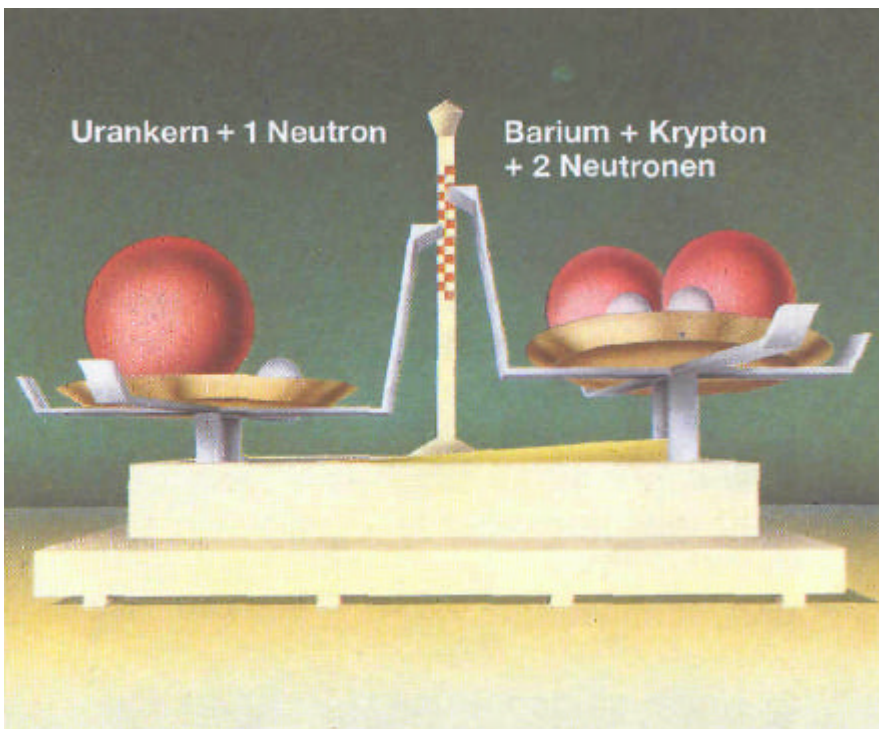
Was geschieht, wenn ein Uranatom gespalten wird?

Im natürlichen Uran sind die drei Isotope U-234, U-235 Uran-235 und U-238 enthalten. Von 1000 Uranatomen haben 993 U-238-Kerne, sieben gehören zur Sorte U-235. Der Gehalt an U-234 ist so klein, daß man ihn nicht zu berücksichtigen braucht. Langsame Neutronen spalten nur die U-235-Kerne. Dabei entsteht zunächst ein Zwischenkern U-236. Dieser ist jedoch nicht stabil und zerplatzt in mehrere Bruchstücke, z. B. in einen Barium-144-Kern, einen Krypton-90-Kern und zwei neue Neutronen. Und nun sind wir bei der Entdeckung angekommen, die mit Atombomben und

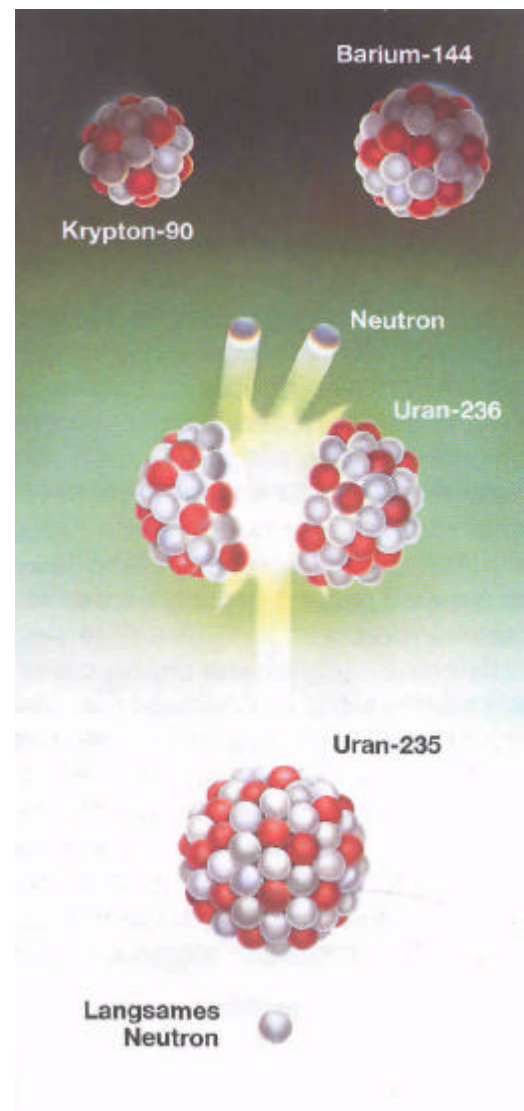
Kernreaktoren die Welt verändert hat: Die bei der Spaltung entstehenden Bruchstücke haben weniger Masse als der beschossene Kern und das Geschoß!

Es geht also Masse verloren, und diese wird nach Einsteins Formel $E = mc^2$ in einen gewaltigen Energiebetrag, die *Kernenergie*, umgewandelt. Man kann auch sagen, die Bindungsenergie, welche den großen Kern zusammengehalten hat, wird teilweise frei und ermöglicht es den Bruchstücken, mit rasender Geschwindigkeit auseinander zufliegen. Dabei stoßen sie an Nachbaratome, die in starke Schwingungen versetzt werden und sich aneinander reiben. Dadurch wird die Bewegungsenergie der Bruchstücke in Wärme umgewandelt. Fassen wir also zusammen: Bei der Kernspaltung werden große Energiebeträge freigesetzt. Aus einem Gramm U-235 kann man 23 000 kWh gewinnen! Oft' entstehen bei der Kernspaltung auch drei neue Neutronen. Der U-236-Zwischenkern kann z. B. in Barium-144, Krypton-89 und drei Neutronen zerfallen. Die neu entstehenden, mittelschweren Atomkerne sind leider in der Regel selbst radioaktiv und senden gefährliche Strahlen aus. Wir werden ihnen später beim Hauptproblem der Kernkraftwerke, der Entsorgung, wieder begegnen.

Um U-238-Kerne zu spalten, müßte man sehr schnelle Neutronen haben. Die langsamen dringen zwar auch in diesen Kern ein, werden aber dort festgehalten, so daß sich U-239 bildet. Dieses wandelt sich über eine Zwischenstufe in Plutonium-239 um, welches seinerseits gut durch langsame Neutronen gespalten werden kann.



Ausgangskern und Geschoß haben etwas mehr Masse als die Spaltprodukte. Die Massendifferenz wird in Energie umgewandelt.



Langsame Neutronen spalten den Uran-235-Kern in leichtere Atomkerne, hier in Barium-144 und Krypton-90. Dabei werden 2 Neutronen frei. Die Bruchstücke fliegen mit gewaltiger Energie auseinander.

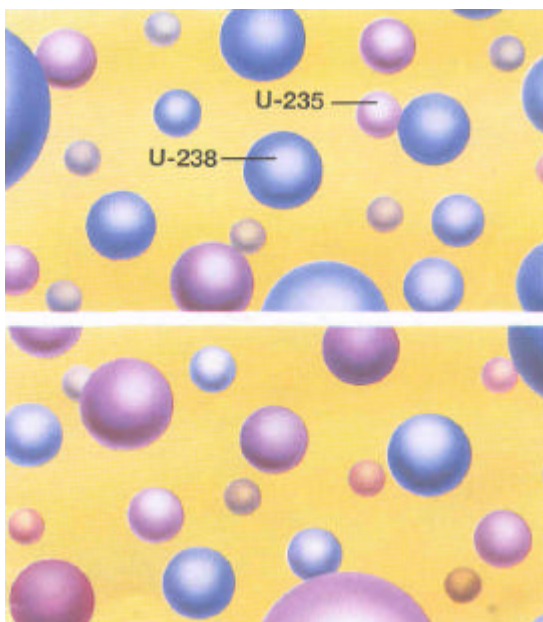
Was ist eine Kettenreaktion?

In einem großen Stück U-235 oder Plutonium würde sich, wenn wir es kurz mit Neutronen beschießen, folgender Prozeß abspielen: Irgendwo wird ein erster Kern gespalten. Er stößt 2 oder 3 Neutronen aus. Diese spalten in unserem Beispiel 2 weitere Kerne, welche zusammen im Schnitt 5 Neutronen freisetzen. Wenn 4 dieser Geschosse auf Nachbarkerne treffen und diese zertrümmern, so bilden sich 8 bis 12 neue Neutronen. Diese spalten, abgesehen von einer gewissen Verlustrate, wieder Kerne, wobei jedesmal ein gewaltiger Energiebetrag freigesetzt wird. Dabei entstehen rund 20 neue Neutronen, welche wiederum auf Kerne treffen, kurz, in Sekundenbruchteilen wächst die Zahl der gespaltenen Kerne und damit die Energiegewinnung lawinenartig an. Diesen Vorgang nennt man *Kettenreaktion*.

Auf die hier beschriebene unkontrollierte Art wird sie bei der Atombombe angewandt. Für das Zustandekommen so einer Kettenreaktion benötigt man eine gewisse Mindestmasse des Kernbrennstoffs, auch *kritische Masse* genannt. Beim Uran-235 beträgt sie rund 23 kg, was einer Kugel von 13 cm Durchmesser entspricht. Unterschreitet man diese Massengrenze, so gehen zu viele Neutronen verloren, welche dann aus dem Uranklumpen herausfliegen, ohne einen Kern getroffen zu haben. Glücklicherweise kann man Kettenreaktionen auch kontrolliert ablaufen lassen, indem man nur eine bestimmte Zahl von Spaltungen pro Sekunde zuläßt. Genau dies spielt sich in den Kernreaktoren ab, denen das nächste Kapitel gewidmet ist.



Bei einer Kettenreaktion werden in Sekundenbruchteilen unzählige Atomkerne gespalten. Dabei werden gigantische Energiebeträge freigesetzt.



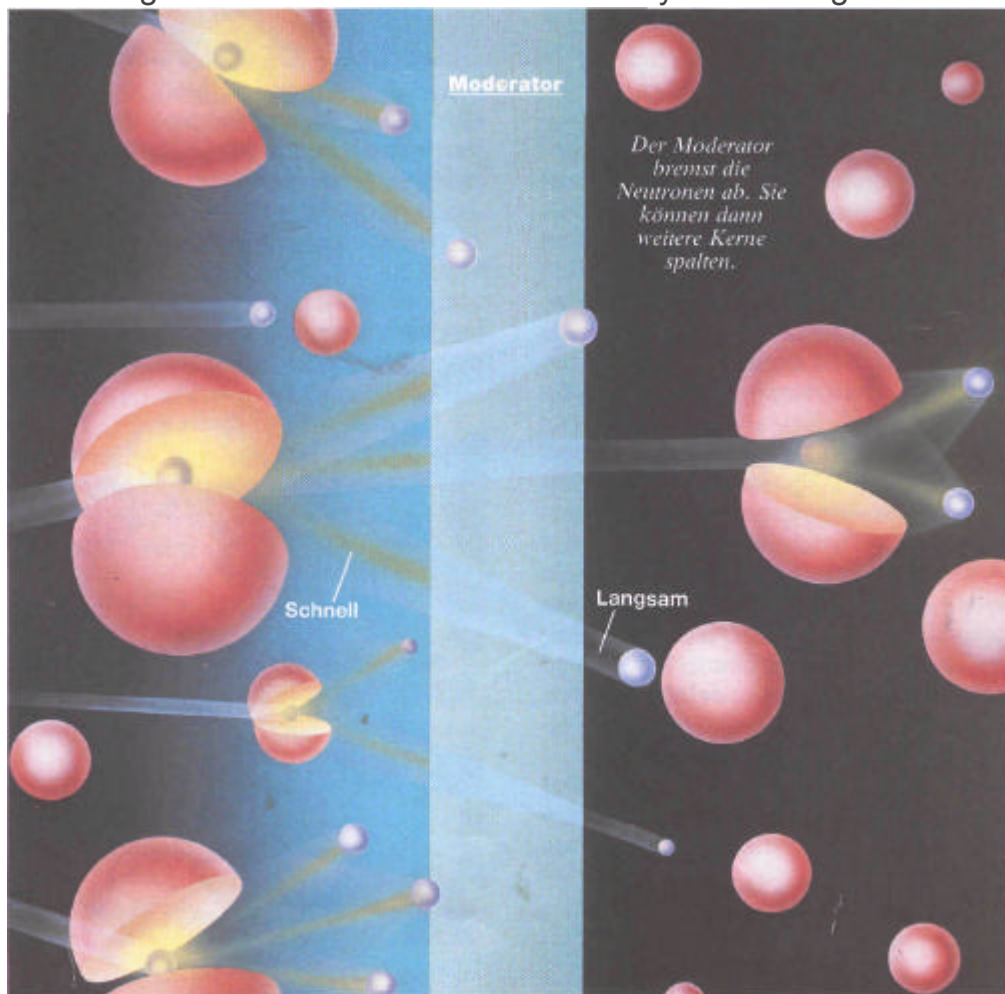
Beim angereicherten Uran ist der U-235-Gehalt erhöht. U-238-Kerne sind blau, U-235-Kerne rot dargestellt.

Was ist eine Anreicherung?

In natürlichem Uran kann sich normalerweise keine Kettenreaktion ereignen. Es besteht ja zu über 99 % aus U-238. Die 2 bis 3 Neutronen, welche bei einer Spaltung entstehen, sind meistens zu schnell, um einen der wenigen U-235-Kerne zu spalten, andererseits sind sie zu langsam, das U-238 zu zertrümmern. Sie werden nur von diesem eingefangen. Eine einmal ausgelöste Kernspaltung kann also ohne besondere Vorrichtungen keine Kettenreaktion erzeugen. Um eine solche zu erreichen, kann man zwei Wege einschlagen: 1. Der U-235-Gehalt ist zu erhöhen, um mehr spaltbares Material zu erhalten. 2. Die bei der Spaltung entstehenden Neutronen müssen langsamer gemacht werden. Um z. B. einen brauchbaren Brennstoff für die in Deutschland üblichen Kernkraftwerke zu erhalten, muß man den U-235-Gehalt von 0,7 % auf rund 3 % erhöhen. Diesen Prozeß nennt man *Anreicherung*.

Was ist ein Moderator?

Der auf 3 % angereicherte Brennstoff würde uns allein nicht viel nützen, da die beim Spaltprozeß entstehenden Neutronen zu schnell sind. Sie würden von den immer noch reichlich vorhandenen U-238-Kernen eingefangen, ohne diese zu spalten, und an den meisten U-235-Kernen „achtlos“ vorbeirasen. Für ihre Spaltung benötigen wir langsame Neutronen. Glücklicherweise gibt es Stoffe, welche Neutronen abbremsen können. Man nennt sie *Moderatoren*. Kohlenstoff ist hierfür gut geeignet. Befindet er sich in Form von Graphit zwischen den Uranstücken oder -blöcken, so bremst er die in ihn eindringenden Neutronen ab, so daß sie nun Kerne spalten können, wenn sie wieder mit Uran-235 in Berührung kommen. Auch Wasser und Beryllium sind gute Moderatoren.





Bei der Kernfusion entstehen aus Deuterium und Tritium Heliumkerne und Neutronen. Die Ausgangsprodukte haben mehr Masse als die neu entstehenden Teilchen. Es geht also Masse verloren, die in Energie umgewandelt wird.



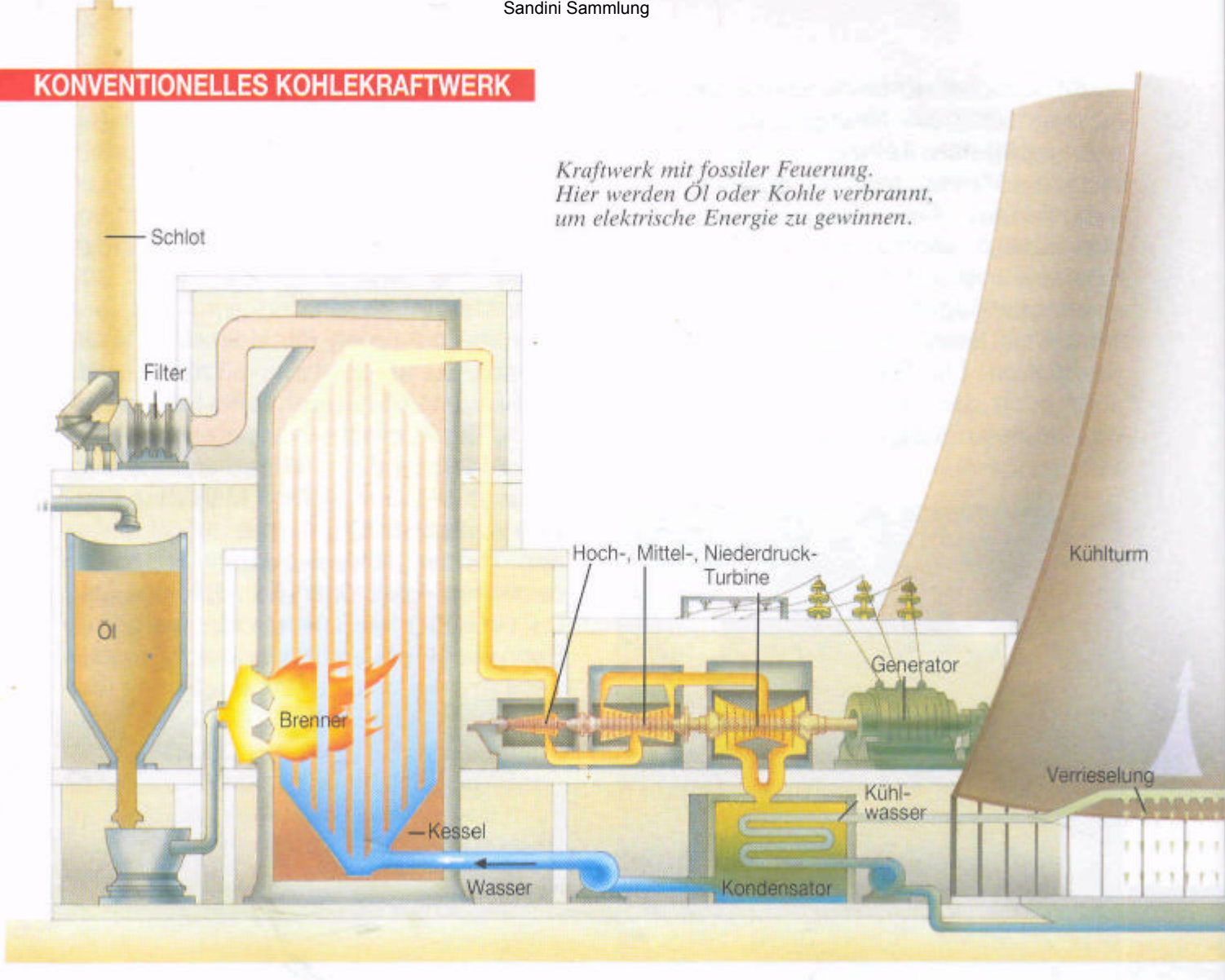
Was versteht man unter Kernfusion?

Es gibt noch eine weitere Methode, Kernenergie zu erzeugen. Lässt man z. B. Deuterium- und Tritiumkerne unter extremen Druck- und Temperaturverhältnissen miteinander verschmelzen, so entsteht jeweils ein Heliumkern und ein Neutron. Die beiden neu gebildeten Teilchen haben etwas weniger Masse als die beiden Ausgangskerne. Die verloren gegangene Masse wird, ähnlich wie wir es bei der Kernspaltung kennen gelernt haben, in einen gewaltigen Energiebetrag umgewandelt. Diesen Vorgang nennt man *Kernfusion*. Alle Sterne, unsere Sonne, aber auch die Wasserstoffbombe, gewinnen ihre Energie durch diesen Prozeß.

Wie gewinnt die Sonne ihre Energie?

Im Sonneninnern geht, sehr vereinfacht ausgedrückt, folgendes vor sich: Bei 15 Millionen Grad und dem unvorstellbar hohen Druck von 200 Milliarden Atmosphären wird aus je 4 Wasserstoffkernen ein Heliumkern aufgebaut. Dieser ist etwas leichter als seine 4 Bausteine. Es geht also Masse verloren, die in große Energiemengen umgewandelt wird. In jeder Sekunde verbraucht die Sonne 564 Millionen Tonnen Wasserstoff, um daraus 560 Millionen Tonnen Helium zu gewinnen. Die restlichen 4 Millionen Tonnen, das sind 0,7 Prozent des Brennstoffs, werden in Sonnenenergie umgewandelt. Die Gesamtstrahlungsleistung der Sonne beträgt 383 000 000 000 000 000 000 oder $3,83 \times 10^{23}$ kW, ein Quadratmeter der Sonne strahlt 62 900 kW ab. Das ist etwa soviel wie die Leistung von 62 000 Heizsonnen oder 1 Million Glühlampen.

KONVENTIONELLES KOHLEKRAFTWERK



Kernkraftwerke heute und morgen

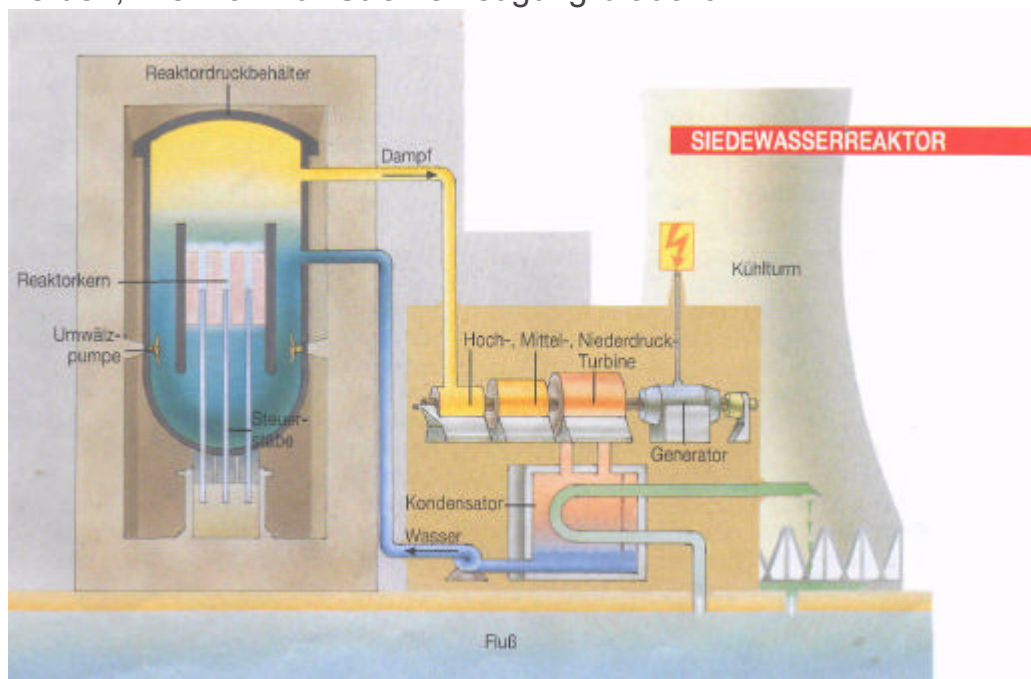
Was ist ein Kraftwerk?

Kraftwerke haben die Aufgabe, elektrischen Strom zu liefern. In den meisten Fällen wird zunächst Wärme erzeugt, die teilweise in elektrische Energie umgewandelt werden kann. Bei einem Kraftwerk mit fossiler Feuerung verbrennt nun in einem riesigen, etwa 100 Meter hohen Kessel Öl, Kohle oder Gas. Die dadurch erzeugte Wärme erhitzt und verdampft Wasser. Der so erzeugte Dampf hat einen Druck von etwa 170 bar, sowie eine Temperatur von rund 530 °C und wird zu einer *Turbine* geleitet. Das ist eine große Maschine, welche auf einer Achse Schaufeln hat, auf die der Dampf mit großer Kraft drückt. Das Schaufelrad beginnt sich ähnlich wie eine Windmühle, deren Flügel vom Wind in Bewegung gesetzt werden, zu drehen und treibt einen großen Dynamo, den *Generator*, an. Dieser erzeugt wie ein Fahrraddynamo elektrischen Strom, allerdings leistet er weit mehr - rund 1000 Megawatt, was ausreicht, eine ganze Großstadt zu versorgen. Die elektrische Energie gelangt dann über Transformatoren und Schalter ins öffentliche Netz. Wenn der Dampf seine Energie an die Turbine abgegeben hat, ist er drucklos und kühl. Um ihn erneut zu verwenden, muß man ihn wieder in Wasser zurückverwandeln. Dies geschieht im *Kondensator*. Der Dampf wird dort mit wassergekühlten Rohren in Verbindung gebracht, auf denen er zu Wasser kondensiert, welches zum Kessel zurückgepumpt wird. Dadurch erwärmt sich allerdings das Kühlwasser von etwa 25 auf 35 °C. Zur Wiederabkühlung wird es zu einem *Kühlturm* geleitet und dort fein

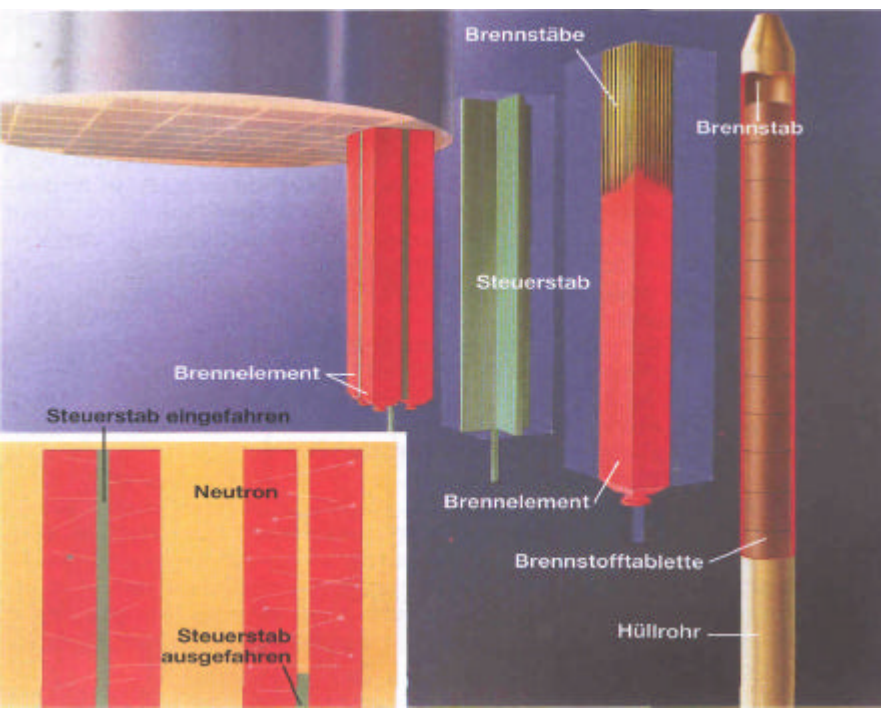
verrieselt. Die Tröpfchen fallen nach unten, kühlen sich dabei ab und erwärmen die Luft im Kühlturm, wodurch wie in einem Kamin ein starker Zug entsteht. Das abgekühlte Wasser wird gesammelt und zum Kondensator zurückgepumpt. Allerdings geht ein Teil dieses Wassers durch Verdunstung verloren, wird von der aufsteigenden Luft mitgeführt und kann über den Kühltürmen kleine Wolken bilden. Das verlorengegangene Wasser, bei einem 1300-MW-Kraftwerk rund ein Kubikmeter pro Sekunde, wird meist aus einem Fluß ersetzt. In besonders günstigen Fällen kann man auf Kühltürme ganz oder teilweise verzichten, indem man Fluß- oder Meerwasser direkt zur Kühlung verwendet.

Was ist ein Kernkraftwerk?

Bei einem Kernkraftwerk wird die Energie zur Dampferzeugung nicht durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe, sondern durch Kernspaltung gewonnen. Der Kessel wird dabei durch einen *Kernreaktor* ersetzt, eine Einrichtung, in der Kernenergie erzeugt wird. Man läßt dort eine kontrollierte Kettenreaktion ablaufen, bei der nur so viele Kerne gespalten werden, wie man zur Stromerzeugung braucht.



Kernkraftwerk mit Siedewasserreaktor. Hier wird der Dampf durch Kernenergie und nicht durch Kohleverbrennung erzeugt.



Bestandteile des Reaktorkerns. Ist der Steuerstab eingefahren, so schluckt er die auftreffenden Neutronen. Ausgefahrene Steuerstäbe erlauben es vielen Neutronen, neue Spaltungen vorzunehmen.

Wie funktioniert ein Siedewasserreaktor?

Beim Siedewasserreaktor wird in einem *Reaktordruckgefäß*, das den riesigen Heizkessel der Kohlekraftwerke ersetzt, mit Hilfe von Kernenergie Wasser verdampft. Der Dampf hat einen Druck von rund 70 bar und treibt eine Turbine an, die ihrerseits einem Generator die nötige Energie zur Stromerzeugung liefert.

Im schon erwähnten, in unserem Beispiel 16 cm dicken Reaktordruckgefäß, befindet sich der *Reaktorkern*, durch den das zu verdampfende Wasser strömt. Dieser setzt sich aus etwa 800 *Brennelementen* zusammen. Jedes dieser Brennelemente ist durch einen Blechbehälter begrenzt, der unten eine Öffnung für den Wassereintritt hat. Das Wasser strömt nach oben und umspült 64 *Brennstoffstäbe*, Metall röhre, die mit den Brennstofftabletten gefüllt sind. Diese bestehen im wesentlichen aus angereichertem Uran in Form von Urandioxid (UO_2). Durch Spaltung von Urankernen wird Energie erzeugt, die in Form von Wärme an das Kühlwasser abgegeben wird, welches dadurch verdampfen kann. Das Wasser dient aber auch als Moderator, bremst also die bei jeder Kernspaltung frei werdenden schnellen Neutronen so ab, daß sie wieder Kerne spalten können.

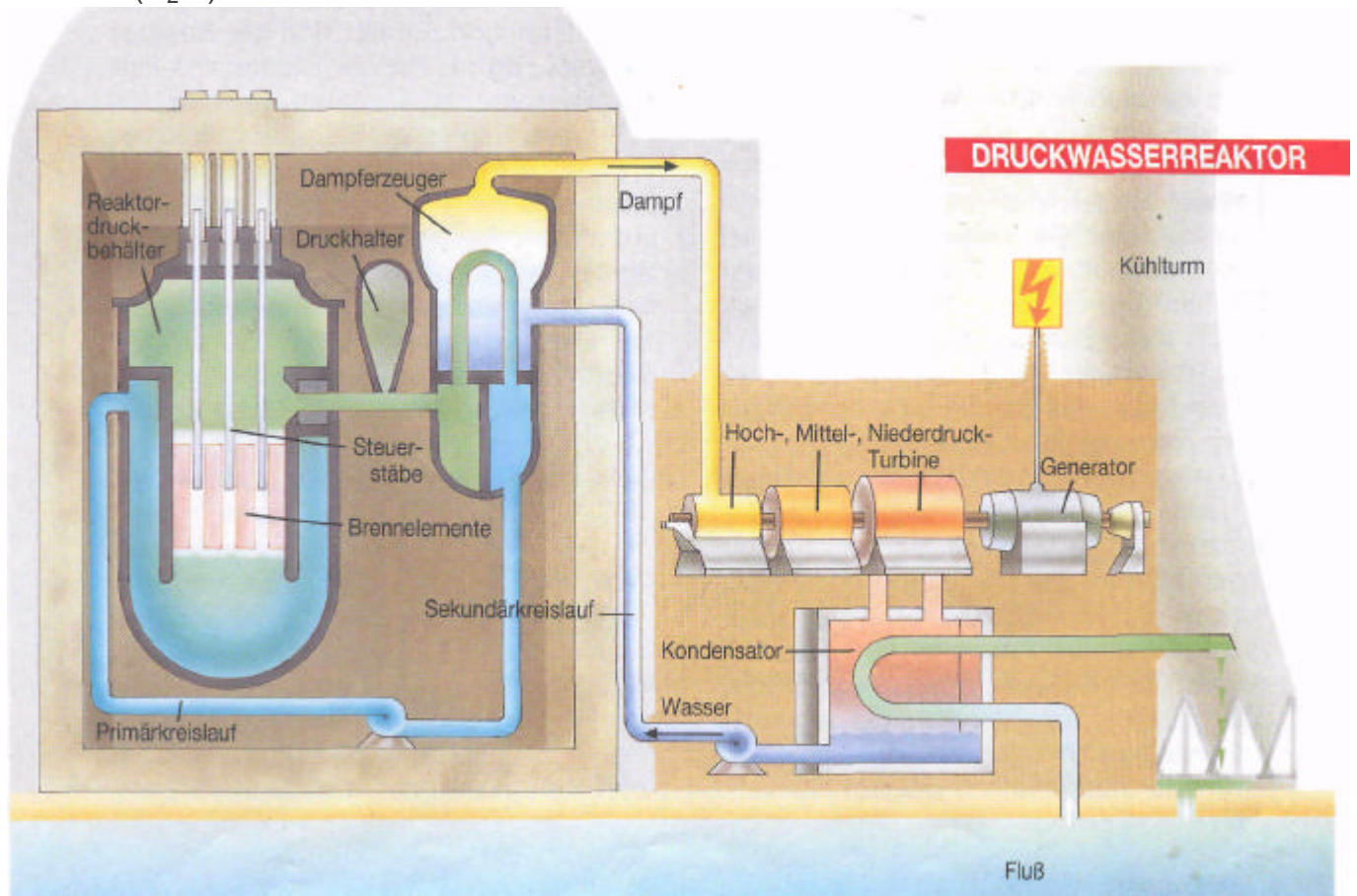
Wie wir gesehen haben, entstehen bei jeder Urankernspaltung 2 bis 3 neue Neutronen. Würden sie alle zu weiteren Spaltungen führen, so geriete der ganze Reaktor außer Kontrolle und würde viel zu viel Energie erzeugen. Um dies zu verhindern, enthält jeder Reaktor Stoffe wie Bor oder Kadmium, die Neutronen schlucken oder absorbieren, und zwar gerade so viele, daß die Energieproduktion konstant bleibt. Diese Substanzen sind in den sogenannten *Steuerstäben* enthalten, welche von unten mehr oder weniger in den Reaktorkern eingefahren werden können. Je weiter sie herausgezogen sind, um so weniger Neutronen werden von ihnen verschluckt, um so mehr Spaltungen gibt es also. Umgekehrt bedeutet Hereinfahren der Steuerstäbe mehr Neutronenabsorption und weniger Energiefreisetzung. Durch Ein- und Ausfahren der Steuerstäbe kann man also die Energieproduktion gut in den Griff bekommen, auf Wunsch aber auch ganz drosseln.

Wird ein Reaktor neu in Betrieb genommen, so muß man die ersten Neutronen mit Hilfe von besonderen Neutronenquellen erzeugen. Nach einer vorübergehenden Stilllegung ist das nicht nötig. Die Brennelemente geben dann genug Neutronen ab, um die Kettenreaktion durch Ausfahren der Steuerstäbe wieder in Gang zu setzen.

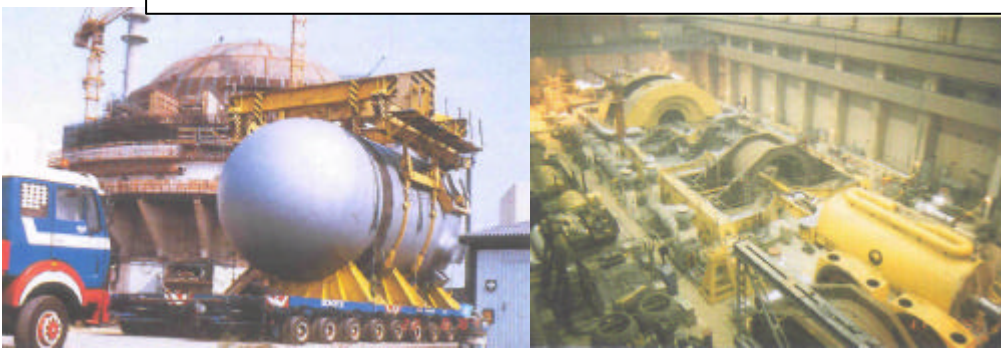
Was ist ein Druckwasserreaktor?

Beim eben besprochenen Siedewasserreaktor wird der Dampf, der die Turbinen antreibt, direkt im Reaktor erzeugt. Beim *Druckwasserreaktor* siedet das Wasser, welches mit dem Reaktorkern in Kontakt kommt, nicht. Sein Druck ist so groß (150 bar), daß es trotz hoher Temperaturen immer flüssig bleibt. Dieses *Primärwasser* erhitzt über Rohrleitungen in einem *Dampferzeuger* das sogenannte *Sekundärwasser*, mit dem es also nicht direkt in Berührung kommt, und kühlt sich dabei von 330 °C auf 290 °C ab. Während das Sekundärwasser siedet und mit seinem Dampf Turbine und Generator antreibt, wird das immer flüssige Primärwasser zum Reaktorkern zurückgepumpt, wo es durch Kernspaltungen wieder auf rund 330 °C erhitzt wird. Ein Druckhalter sorgt dafür, daß der Druck dieses Wassers immer gleich bleibt. Bei einem typischen Druckwasserreaktor mit 1300 MW Leistung besitzt der Kern rund 200 Brennelemente mit je 300 Brennstäben. Die Steuerung des Reaktors erfolgt einerseits durch mehr oder weniger starke Anreicherung des Primärwassers mit neutronenschluckender Borlösung, andererseits durch kadmiumhaltige Steuerstäbe, die von oben ein- oder ausgefahren werden können.

Wie beim Siedewasserreaktor dient auch hier das Wasser im Reaktorkern als neutronenbremsender Moderator. Daneben hat es auch noch eine regulierende Funktion. Erhitzt sich der Reaktor zu stark, so nimmt die Dichte des Primärwassers ab. Dadurch werden die schnellen Neutronen weniger gut abgebremst, die Zahl der energieliefernden Spaltungen sinkt, und das ganze System kühlt sich wieder ab. Siede- und Druckwasserreaktoren bezeichnet man zusammenfassend auch als *Leichtwasserreaktoren*, da sie als Kühlmittel leichtes Wasser (H_2O), und nicht schweres Wasser (D_2O) benutzen.



Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor. Das Primärwasser steht unter hohem Druck und bleibt immer flüssig. Es kommt mit dem verdampfenden Sekundärwasser nie in Berührung.

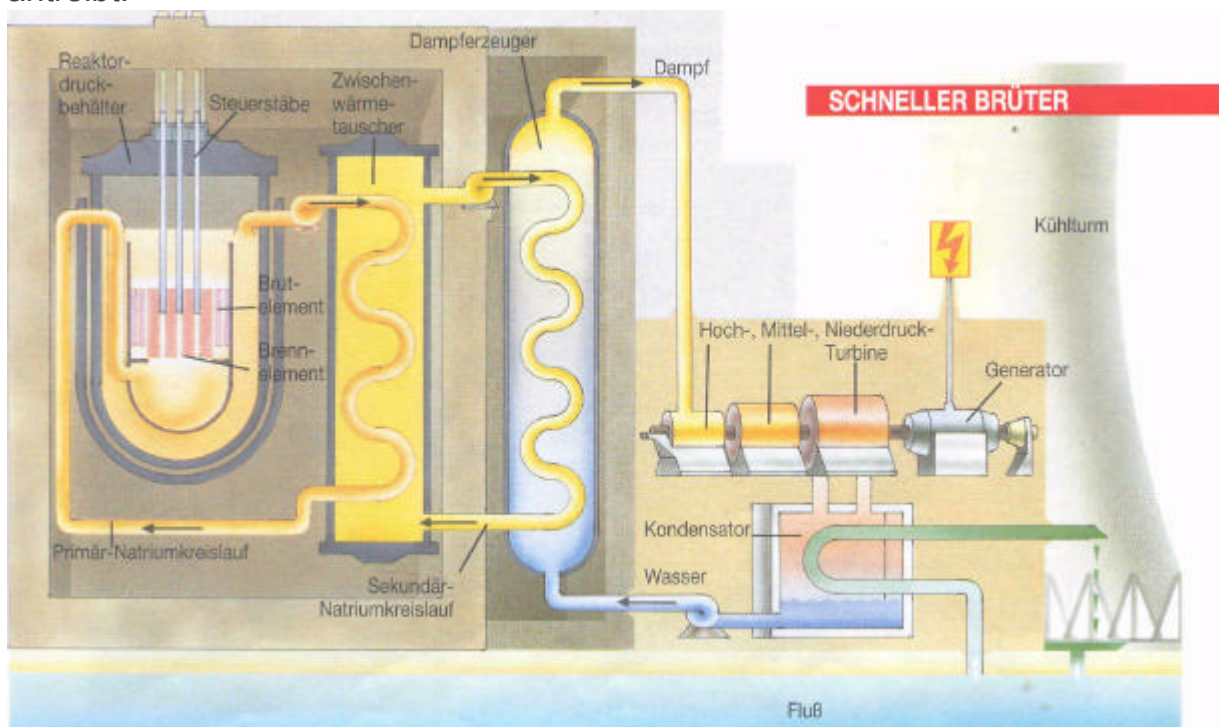


Ein Kernkraftwerk entsteht. Das Reaktordruckgefäß (oben links) wird zur Baustelle (unten links) transportiert. Das Bild oben rechts zeigt einen Blick in das Maschinenhaus mit Turbinen und Generator.

Was ist ein Brutreaktor?

Wir hatten bereits gesehen, daß U-238-Atomkerne Neutronen einfangen und sich dadurch in Plutoniumkerne umwandeln können, die man leicht spalten und zur Energieerzeugung heranziehen kann. In *Brutreaktoren* macht man sich dieses zunutze. Man verwendet als spaltbares Material Plutonium-239, das bei jeder Spaltung 2 bis 3 Neutronen erzeugt. Eines davon wird zur Aufrechterhaltung der Kettenreaktion benötigt, die andern werden zum Teil von U-238-Kernen eingefangen, welche sich in Plutonium-239, also neuen Brennstoff, umwandeln. Der Reaktor „erbrütet“ somit neuen Brennstoff, im Idealfall sogar mehr, als er verbraucht. In geringem Umfang finden wir diesen Brutprozeß übrigens auch bei anderen Reaktortypen. Da U-238 in großen Mengen vorhanden ist, werden die Brutreaktoren trotz derzeit erheblicher technischer Schwierigkeiten in den nächsten Jahrhunderten bei der Energieversorgung wahrscheinlich eine bedeutende Rolle spielen, falls es nicht gelingt, ungefährlichere Arten der Energiegewinnung zu entwickeln. Man kann mit der Brütertechnik einen Großteil der sonst wertlosen U-238-Kerne in spaltbares Material umwandeln und so das Uran 60mal besser ausnutzen als mit normalen Reaktoren. Diese Umwandlung von U-238 in Plutonium funktioniert mit schnellen Neutronen besser als mit langsamen. Im „Schnellen Brüter“ benutzt man diese schnellen Neutronen im Interesse des Brutprozesses zur Spaltung, die dadurch allerdings bei kleinem Plutoniumgehalt nur schlecht funktioniert. Daher enthalten die Brennelemente beim Schnellen Brüter 20 bis 30 % Plutonium und nur 70 bis 80 % U-238; sie haben also rund 10mal mehr spaltbares Material als die bisher besprochenen Reaktortypen, was natürlich viele Schwierigkeiten, Gefahren und Probleme mit sich bringt.

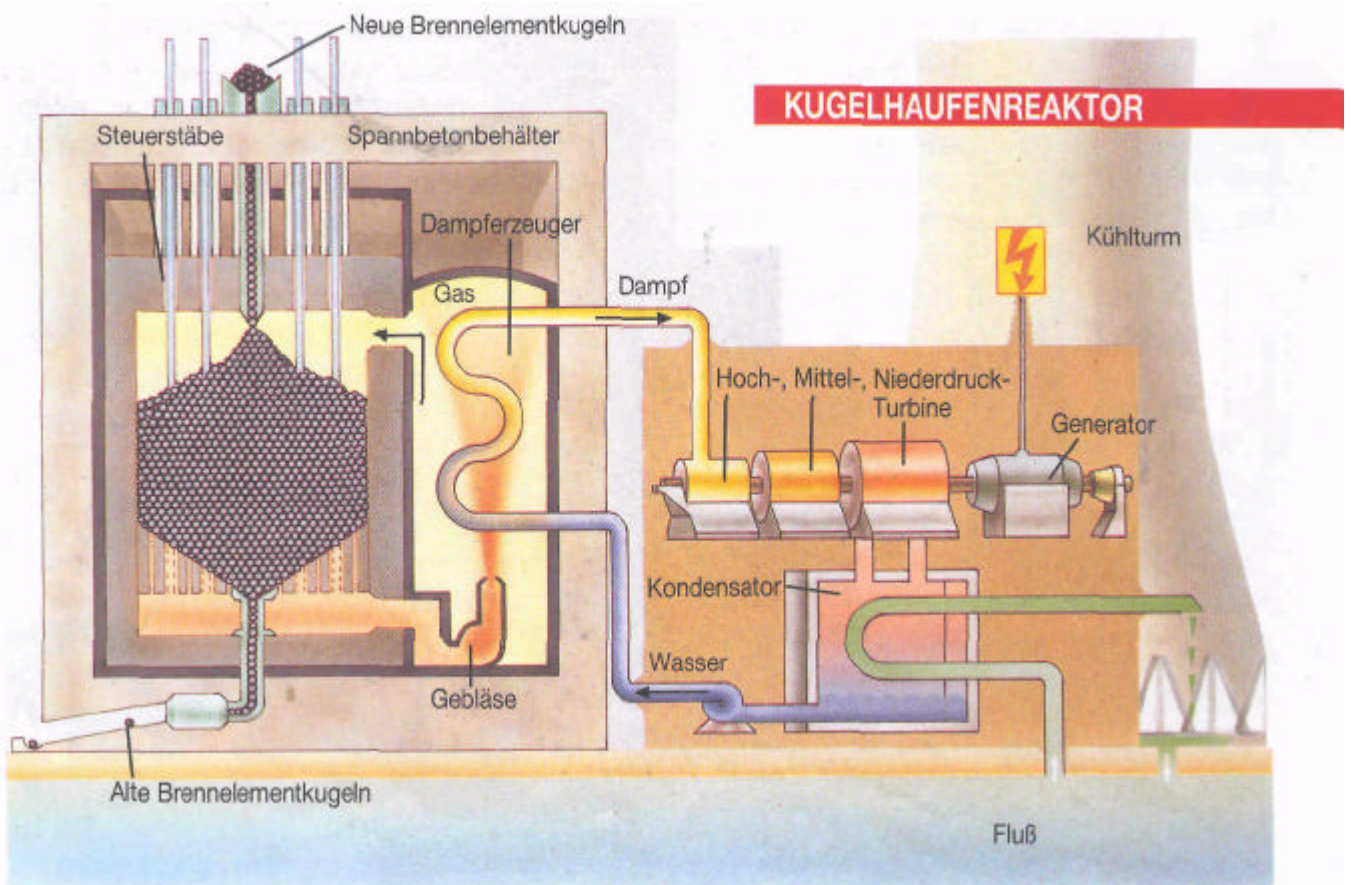
Nach diesen Vorbemerkungen ist es leicht, den Schnellen Brüter zu beschreiben: Der eigentliche Reaktor besteht aus Brennelementen, in denen die Energie erzeugt wird, und Brutelementen, in denen neuer Brennstoff erbrütet wird. Infolge des hohen Anteils an spaltbarem Material ist die Wärmeabgabe der Brennelemente sehr hoch. Man kühlt den Reaktor daher mit flüssigem Natrium, das eine hohe Wärmeleitfähigkeit hat, aber im Gegensatz zu Wasser die Neutronen kaum abbremst, so daß diese, wie gewünscht, schnell bleiben. Ein Primärnatriumkreislauf heizt das Sekundärnatrium; dieses wiederum bringt Wasser zum Verdampfen, das seinerseits die Turbinen zur Stromerzeugung antreibt.



Kernkraftwerk mit schnellem Brüter. Ähnliche Reaktoren sind in anderen Ländern wie Frankreich bereits in Betrieb. Sie erlauben eine optimale Brennstoffausnutzung.

Wie funktioniert ein Hochtemperaturreaktor?

Ein anderer Reaktortyp, der wahrscheinlich eine große Zukunft hat, ist der *Hochtemperaturreaktor*. Er verwendet neben Uran auch Thorium-232 als Energierohstoff, das sich im Betrieb durch Neutroneneinfang in spaltbares Uran-233 umwandelt. Der Brennstoff befindet sich in winzigen, beschichteten Partikeln, die in tennisballgroßen Graphitkugeln eingeschlossen sind. Der Graphit dient als neutronenbremsender Moderator. Die im Reaktor erzeugte Energie wird an ein Gas, zum Beispiel Helium, abgegeben, das auf rund 900 °C erhitzt wird. Dieses Gas verdampft Wasser, und der heiße Dampf treibt Turbinen an. Die Vorteile des Hochtemperaturreaktors sind zahlreich: er hat einen hohen Wirkungsgrad und seine sehr hohen Temperaturen können der chemischen Industrie zum Beispiel zur Kohlevergasung dienen.



*Kernkraftwerk mit Hochtemperaturreaktor.
Die Brennstoffpartikel befinden sich in tennisballgroßen Graphitkugeln.*

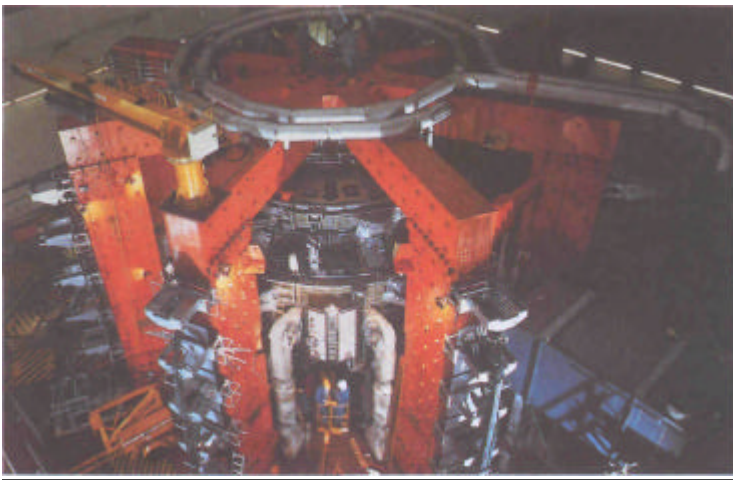
Ist die Kernfusion die Hauptenergiequelle des 21. Jahrhunderts?

Während Druck- und Siedewasserreaktoren heute schon eine technische Selbstverständlichkeit wie Autos und Flugzeuge sind, und auch Brüter und Hochtemperaturreaktoren ihre ersten Bewährungsproben bestanden haben, liegt ein *Fusionsreaktor* noch in weiter Ferne. Die technischen Probleme sind einfach zu groß, denn man muß den Brennstoff, also z. B. die Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium, auf 100 Millionen Grad (!!) bringen. Der Lohn wäre allerdings die Lösung aller Energieprobleme, da man beim Umsatz von 1 kg Deuterium etwa 24 Millionen kWh gewinnen kann. Das entspricht der Energie von 3 Millionen kg Steinkohle. Natürlich würde kein Gefäß so hohe Temperaturen aushalten. Man versucht daher, den Brennstoff mit großen Magnetfeldern zusammenzuhalten oder kleinere

Brennstoffkügelchen kurzfristig mit Laserblitzen aufzuheizen, so daß sie dann selbst durch Fusion Energie abgeben können. Auch „kalte“ Methoden mit Hilfe sogenannter Myonen, also kleiner Teilchen, werden erwogen, deren Erläuterung hier zu weit führen würde. Von der technischen Anwendung der Kernfusion sind wir, abgesehen von der Wasserstoffbombe, noch sehr weit entfernt. Da sich der technische Fortschritt jedoch immer mehr beschleunigt, ist es möglich, daß die Fusion schon im nächsten Jahrhundert bei der Energieerzeugung, aber auch für die Raumfahrt, eine übergeordnete Rolle spielen wird.



Außenansicht des Kernkraftwerks Biblis. Deutlich erkennt man mehrere Kühltürme.



Blick auf die Kernfusionsanlage JET, ein EG-Projekt (JET = Joint European Torus) im britischen Culham. Hier die Anlage im Endstadium des Baus. Bei 100 Millionen Grad sollen hier Deuterium und Tritium unter Energiegewinn zu Helium verschmolzen werden.

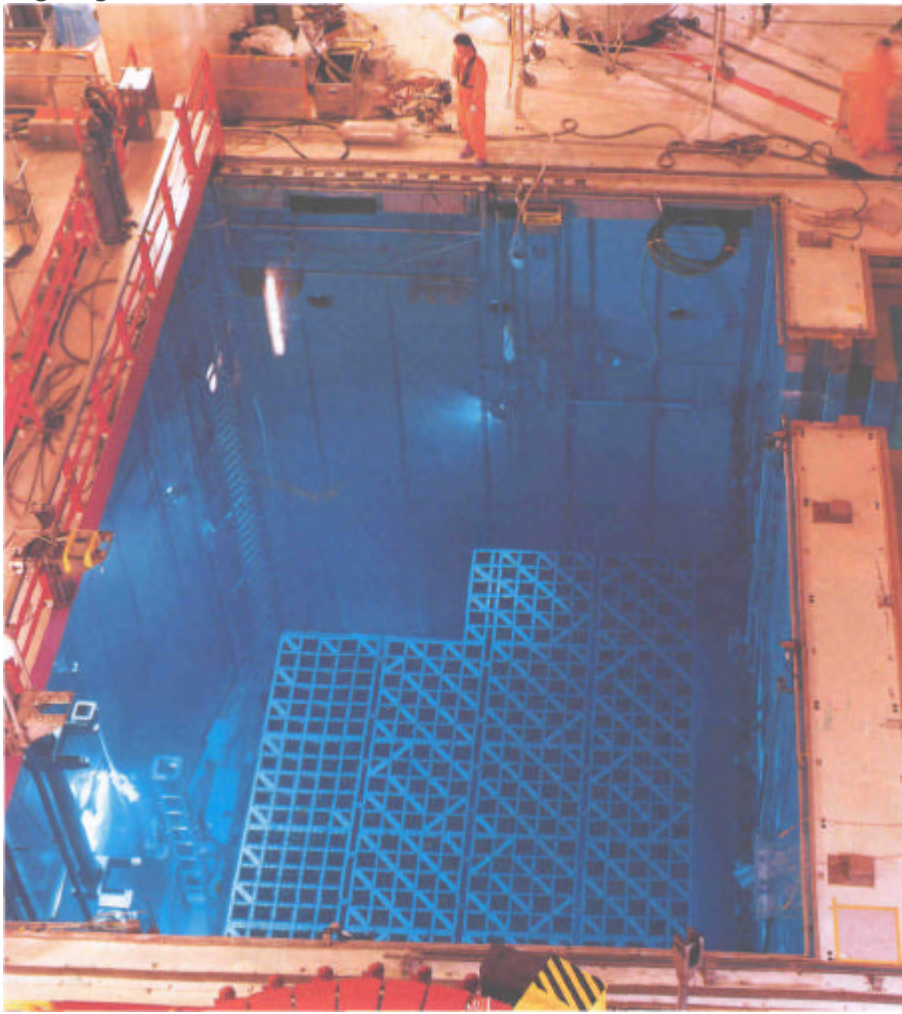
Der Brennstoffkreislauf

Uranbergbau — Entsorgung und Wiederaufarbeitung

Was versteht man unter nuklearem Brennstoffkreislauf?

Die Kernkraftwerke müssen einerseits mit Brennstoff versorgt werden, andererseits ist ein Abtransport der ausgebrannten Brennelemente nötig. Die darin noch enthaltenen spaltbaren Kerne müssen zurückgewonnen, die unbrauchbaren und gefährlichen Abfälle beseitigt werden. Alle diese Vorgänge faßt man unter dem Begriff *Brennstoffkreislauf* zusammen.

Er beginnt mit dem Abbau von Uran und Thorium in Bergwerken oder unter freiem Himmel. Erzaufbereitung, Umwandlungs- und Anreicherungsprozesse sind nötig, bevor die Brennelemente gefertigt werden können, welche dann zu den Reaktoren transportiert werden. Genau so wichtig wie diese *Versorgung* der Kernkraftwerke ist die *Entsorgung*. Sie beginnt mit der Entnahme der ausgedienten Brennelemente, die zunächst in einem wassergekühlten Abklingbecken gelagert, dann in Zwischenlager und später zu den Wiederaufarbeitungsanlagen transportiert werden. Dort trennt man wiederverwendbare Stoffe und Atommüll voneinander. Aus den zurückgewonnenen Kernbrennstoffen werden neue Brennelemente gefertigt, der radioaktive Abfall wird in einer sogenannten Konditionierungsanlage verpackt und danach in sichere unterirdische Endlager gebracht.



Versorgung und Entsorgung sind für die Kernkraftwerke lebenswichtig. Hier blicken wir in ein Abklingbecken für ausgediente Brennelemente.

Wie gewinnt man Uran?

Uran ist ein Schwermetall, das aus Uranerzen gewonnen wird. Das bekannteste dieser Erze ist wohl die Pechblende, welche zu 95 % aus Uranoxid besteht und manchmal in tonnenschweren Blöcken zu finden ist. Leider enthalten die meisten Erze viel weniger Uran. Rentabel wird der Abbau, wenn wenigstens einige kg Uran pro Tonne Erz vorhanden sind. Das im Tagebau oder auch in unterirdischen Bergwerken abgebaute Erz muß zunächst aufbereitet werden. Es wird gebrochen, gemahlen und ausgelaugt. Nach weiteren Arbeitsgängen erhält man schließlich ein über 70 %iges Urankonzentrat, den sogenannten „Yellow cake“ oder „Gelben Kuchen“. Dieses Produkt wird zur Weiterverarbeitung abtransportiert.



Uran wird aus Erzen erzeugt, die im Tagebau oder in unterirdischen Bergwerken gewonnen werden. Das Bild zeigt einige Uranerz-Stücke.

Wie erzeugt man angereichertes Uran?

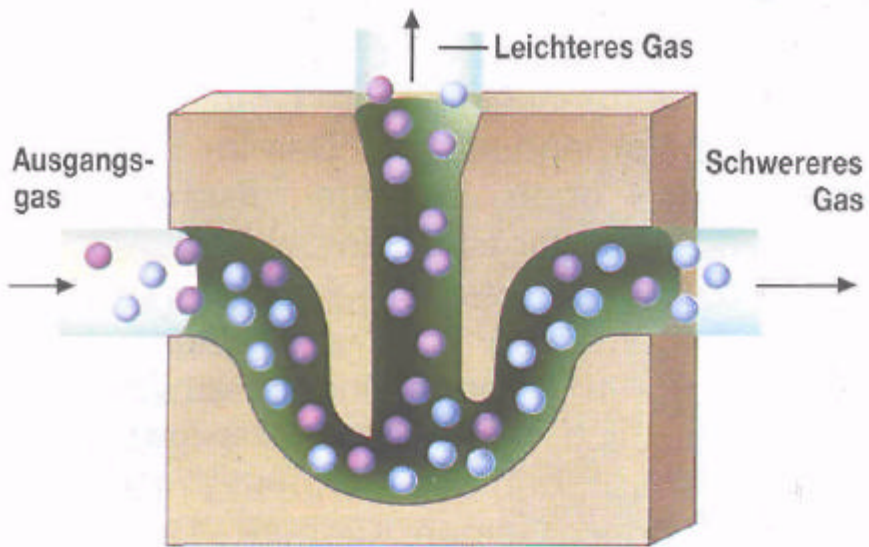
Reines Natururan ist für Kernkraftwerke ungeeignet, da es nur zu 0,7 % aus spaltbarem U-235 und zu 99,3 % aus dem etwas schwereren, nicht spaltbaren U-238 besteht. Die in Deutschland eingesetzten Kernkraftwerke benötigen einen Brennstoff, der etwa 3 % U-235 enthält, und auf diese Konzentration muß das Uran *angereichert werden*. Da sich die beiden Uranisotope chemisch nicht voneinander unterscheiden, wird zur Anreicherung ihr Gewichtsunterschied genutzt. Zunächst verwandelt man das Uran mit Hilfe von Fluor in ein Gas, das Uranhexafluorid (UF_6), also eine Verbindung von Uran und Fluor. Für die Trennung der beiden Uranisotope gibt es nun verschiedene Verfahren.

Beim *Trenndüsenverfahren* wird das UF_6 -Gas in winzigen Düsen beschleunigt und halbkreisförmig umgelenkt. Die dabei auftretenden Fliehkräfte drücken das U-238-haltige Gas stärker nach außen, so daß es vom leichteren U-235-Gas abgetrennt werden kann. Natürlich ist dadurch keine vollständige Trennung der beiden Isotope möglich. Schaltet man jedoch mehrere der hier beschriebenen Einheiten zu einer sogenannten Kaskade zusammen, so bekommt man schließlich ein Gas, in dem genügend U-235-Atome sind.

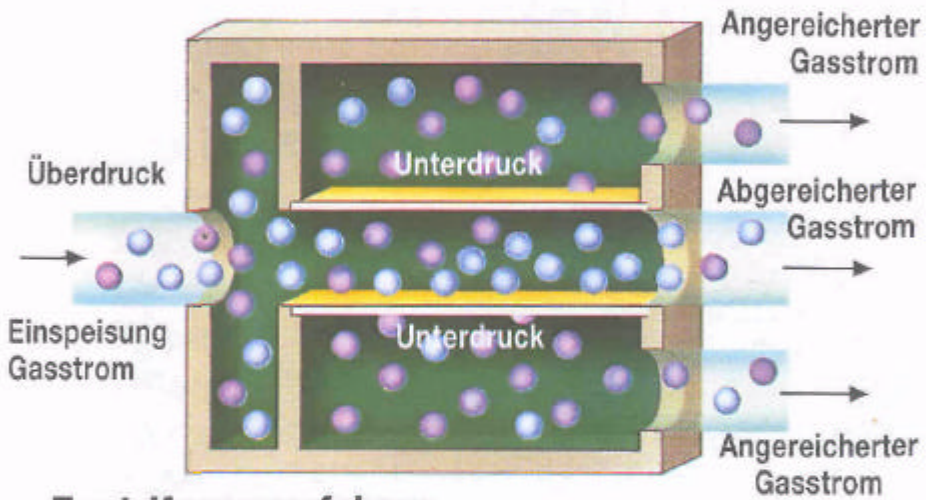
Beim *Gasdiffusionsverfahren* wird das UF_6 -Gas durch Membranen gedrückt. Das leichtere U-235 wandert (diffundiert) dabei schneller durch die Poren der Membranen als das schwerere U-238. Dies führt ebenfalls zu einer teilweisen Trennung.

Beim *Zentrifugenverfahren* wird das Gas in einer sehr schnellen Zentrifuge geschleudert. Die Fliehkräfte drücken die schwerere Uransorte bevorzugt an die Wand, so daß die U-235-Konzentration in der Mitte ansteigt. Wiederum erreicht man also eine Trennung von U-235 und U-238. Auch hier sind mehrere hintereinandergeschaltete Einheiten erforderlich, um die gewünschte Anreicherung zu erhalten. Weitere Verfahren, welche die benötigte Anreicherung in einem Schritt vollziehen sollen, sind noch im Entwicklungsstadium.

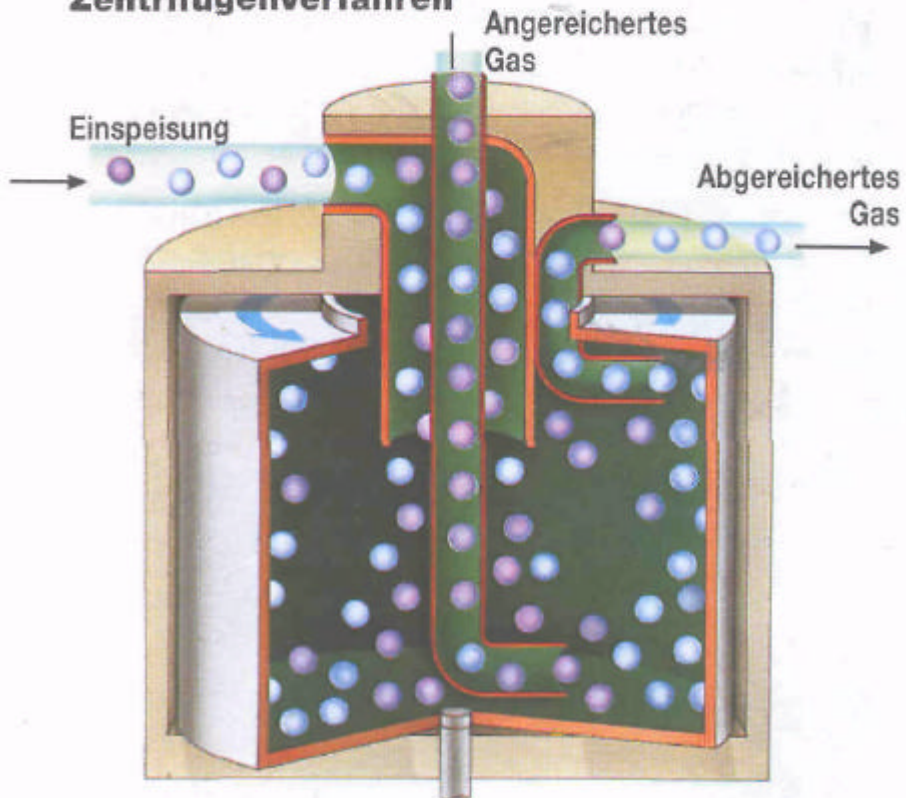
Trenndüsenverfahren



Gasdiffusionsverfahren



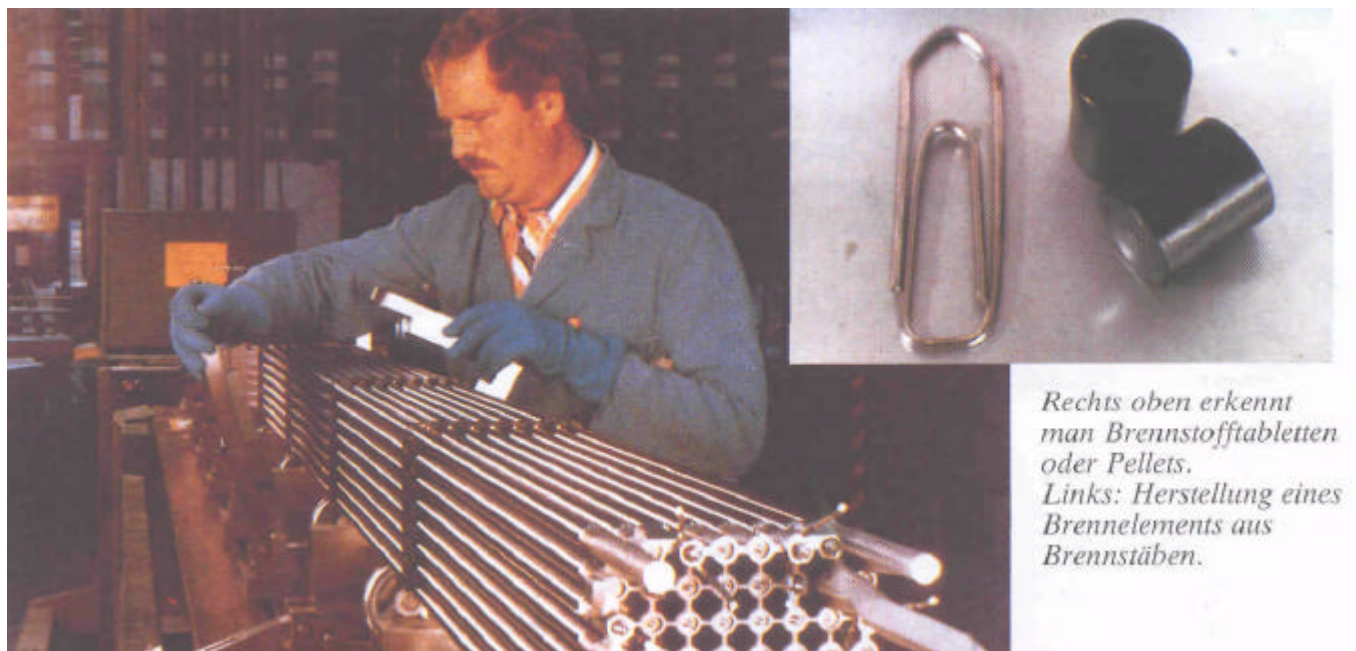
Zentrifugenverfahren



Die drei bekanntesten Anreicherungsverfahren. Ziel ist die Erhöhung des U-235-Gehaltes. U-235-Gas: rot, U-238-Gas; weiß.*

Wie werden die Brennelemente hergestellt?

Wie wir bereits gesehen haben, enthalten die Brennstäbe der Kernkraftwerke Tabletten oder *Pellets* aus Urandioxid (UO_2). Dieses muß zunächst aus dem angereicherten UF_6 -Gas gewonnen werden und wird dann zu Tabletten von rund 1,5 cm Dicke und 1 cm Durchmesser gepreßt. Diese Maße können wie fast alle Zahlenangaben in diesem Buch von Kraftwerk zu Kraftwerk und von Land zu Land verschieden sein, stellen aber typische Durchschnittswerte dar. Die rohen Preßlinge werden auf 1700 °C erhitzt und erhalten so die nötige Festigkeit und Dichte. Danach werden sie auf V10000 mm genau bearbeitet und in die Hüllrohre eingeführt. Zur besseren Wärmeübertragung wird Helium in die Hüllrohre geleitet, welche übrigens nie ganz mit Pellets aufgefüllt werden, da beim nuklearen Zerfall Gase entstehen, die einen gewissen Platz benötigen, den man als Spaltgasraum bezeichnet. Die gefüllten und gasdicht verschlossenen Hüllrohre bilden die Brennstäbe, welche zusammen mit den Regelstäben zu Brennelementen zusammengesetzt werden, die von Fall zu Fall sehr verschieden aufgebaut sein können. So findet man bei Siedewasserreaktoren oft 7x7 Brennstäbe, welche zu einem Brennelement gebündelt sind, bei Druckwasserreaktoren 15 x 15 oder auch 20 x 20 Stäbe. Auch die Lage der Regelstäbe kann von Reaktor zu Reaktor sehr verschieden sein.



*Rechts oben erkennt man Brennstofftabletten oder Pellets.
Links: Herstellung eines Brennelements aus Brennstäben.*

Wie werden die ausgebrannten Brennstäbe transportiert?

Wie wir gesehen haben, entstehen bei der Kernspaltung im Reaktor mittelgroße Atomkerne, die hoch radioaktiv sind und eine gefährliche Strahlung abgeben. Ein ausgedientes Brennelement enthält große Mengen dieser lebensgefährlichen Stoffe, aber auch U-235-Reste und Plutonium. Sieht man einmal von den Aufbau- und Stützstoffen ab, so enthalten ausgebrannte Brennstäbe rund 3 % hochaktive Spaltprodukte, 95 % U-238, 1 % U-235 und knapp 1 % Plutonium, das aus dem U-238 erbrütet wurde. Strengste Sicherheitsvorkehrungen sind notwendig, damit diese Stoffe niemals in die Umwelt gelangen können. In der Bundesrepublik geht man dabei folgendermaßen vor: Nach dem Entladen aus dem Reaktor werden die Brennelemente zunächst für einige Zeit in einem mit Wasser gefüllten Abklingbecken im Reaktorgebäude gelagert. Hier läßt ihre Radioaktivität langsam nach, auch die Wärmeentwicklung wird geringer. Danach müssen die Brennelemente abtransportiert werden. Hierfür

wurden Spezialbehälter mit fast 50 cm dicken Außenwänden entwickelt. Durch sie werden die gefährlichen Stoffe sicher vor der Außenwelt abgeschirmt, auch unter den hohen Belastungen eines Unfalls. Die Behälter müssen unter anderem einen Fall aus 9 m Höhe auf einen harten Boden ebenso aushalten wie ein 30 Minuten langes Feuer. Selbst ein Sturz auf einen Dorn aus 1,2 m Höhe und der Aufprall eines abstürzenden Düsenjets dürfen ihnen nichts ausmachen. In einem solchen bis zu 120 Tonnen schweren Behälter können bis zu neun Brennelemente entweder zwischengelagert oder zu einer Wiederaufbereitungsanlage transportiert werden. Zurzeit verlassen pro Jahr rund 250 t verbrauchte Kernbrennstoffe die deutschen Kraftwerke, eine gigantische Anforderung an alle an der Entsorgung beteiligten Firmen!



Arbeiten an einem Transportbehälter für verbrauchte Brennelemente. Diese Behälter gehören zu den stabilsten Konstruktionen der Technik.

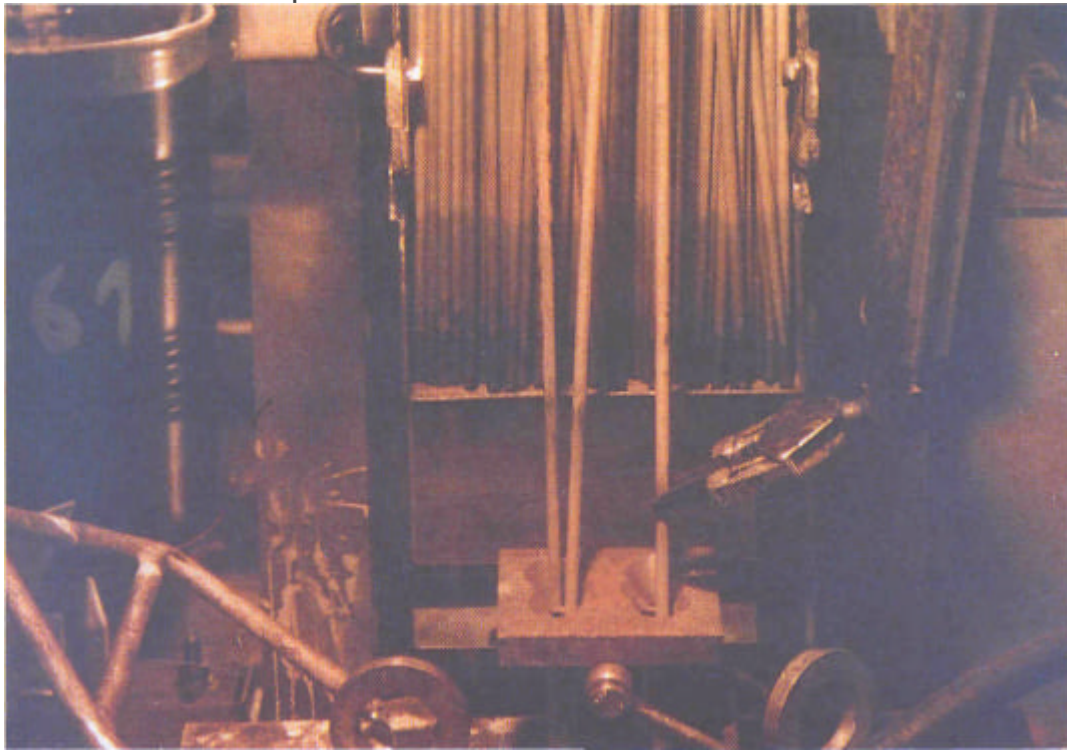
Was geschieht mit den ausgebrannten Brennelementen?

In einem Kernkraftwerk wird jährlich etwa ein Drittel der Brennelemente gegen neue ausgetauscht. Bei einem großen Kraftwerk mit 1300 MW verlassen Jahr für Jahr 30 t Uran den Reaktor, bis zum Jahr 2000 werden so in der Bundesrepublik etwa 11 000 t Uran zusammenkommen. Da dieses Material mit lebensbedrohenden Spaltprodukten verseucht ist, aber auf der anderen Seite wertvolle, wiederverwendbare spaltbare Kerne enthält, ist die Entsorgung und Bearbeitung der ausgedienten Brennelemente aus Umwelt-, aber auch aus Rentabilitätsgründen äußerst wichtig. Dabei geht man folgendermaßen vor: Nach dem ersten, etwa 1jährigen Aufenthalt der Brennelemente in den Abklingbecken der Kernkraftwerke kommen diese in *Zwischenlager*. Ein solches befindet sich zum Beispiel in Gorleben (Niedersachsen). Die Brennelemente verbleiben dabei in ihren Transportbehältern, wo sie absolut sicher gelagert sind und kaum Strahlung nach außen abgeben können. Danach werden die Brennstäbe, wie man sagt, *wiederaufgearbeitet*. Der noch brauchbare Brennstoff wird dabei zurückgewonnen und der Produktion neuer Brennelemente zugeführt. Die gefährlichen Spaltprodukte werden abgesondert und für alle Zeiten in sogenannten Endlagern deponiert. Natürlich ist es

auch möglich, die abgebrannten Brennelemente ohne Wiederaufarbeitung in Endlagern zu verstauen.

Was ist eine Wiederaufarbeitungsanlage?

Wiederaufarbeitungs- oder Wiederaufbereitungsanlagen sind Einrichtungen, in denen bei ausgebrannten Brennelementen die Trennung ihrer verschiedenen Bestandteile durchgeführt wird. Insbesondere müssen die radioaktiven Abfälle abgesondert und die Brennstoffe Uran und Plutonium wiedergewonnen werden. Neben nicht gespaltenen U-235-Kernen enthalten die Brennstäbe ja auch Plutonium-239, das aus U-238 erbrütet wurde und als Kernbrennstoff verwendbar ist. Die ausgedienten Brennelemente werden nach ihrem Aufenthalt im Abklingbecken des Kraftwerks und im Zwischenlager in ihren Transportbehältern zur Wiederaufbereitungsanlage gebracht. Sie sind dann immer noch hoch radioaktiv und müssen durch dicke Betonwände oder Bleiglasfenster vom Bedienungspersonal getrennt und vollautomatisch bearbeitet werden. Die Brennstäbe werden zunächst zerkleinert und in Salpetersäure gelöst. Uran, Plutonium und die Spaltprodukte lösen sich dabei fast völlig auf, die zerkleinerten Hüllen der Brennstäbe bleiben zurück, werden einzementiert und sicher gelagert. In einer Folge von chemischen Prozessen werden nun Uran, Plutonium und die Spaltprodukte in drei Produktionsströme aufgeteilt und so voneinander getrennt. Uran und Plutonium werden nach weiteren Trennungs- und Reinigungsvorgängen in eine Fabrik zur Herstellung neuer Brennelemente transportiert, die radioaktiven Abfälle für die Endlagerung vorbereitet und verpackt.



*„Fernbediente“
Arbeiten mit
radioaktiven Stoffen
hinter
Bleiglasfenstern in
der
Wiederaufbereitung
sanlage Karlsruhe.
Die Brennstäbe
werden mit
Stabscheren
zerkleinert.*

Wohin mit dem Atommüll?

Die Abfälle der Atomanlagen, also der Forschungsinstitute, Kernkraft- und werke und Wiederaufarbeitungsanlagen, haben verschiedene Gefährlichkeitsgrade.

Schwachaktive Abfälle in fester und flüssiger Form werden zunächst durch Eindampfen, Pressen oder Verbrennen auf ein möglichst kleines Volumen konzentriert. Danach werden sie in Fässer einzementiert. *Mittelaktive* Abfälle, zum Beispiel die

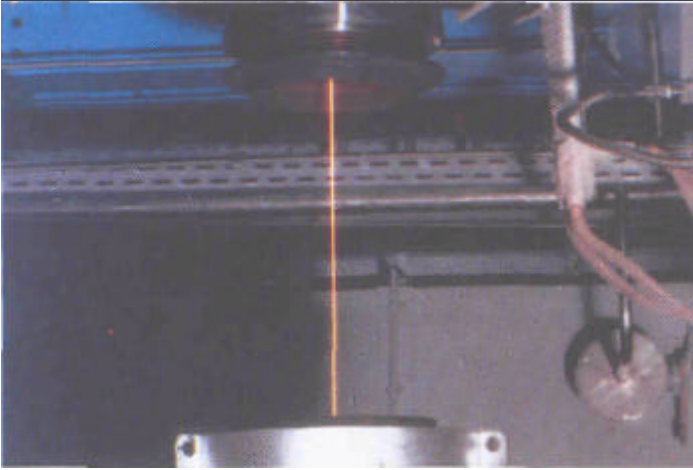
zerkleinerten Metallhülsen der Brennstäbe, zementiert man ebenfalls in Fässer ein. Besondere Sorgfalt ist bei den *hochaktiven* Abfällen nötig. Das sind besonders die in Salpetersäure gelösten Spaltprodukte. Sie geben 99 % der Strahlung des gesamten Atommülls ab! Für diese lebensgefährlichen Substanzen wurde ein Verglasungsverfahren entwickelt. Die hochradioaktiven Lösungen werden zunächst konzentriert und chemisch umgewandelt. Danach werden die Abfälle bei 1150 °C mit Glaspulver verschmolzen und damit untrennbar zum Bestandteil des Glases, das in dickwandige Edelstahlbehälter abgefüllt wird. Bei einer Wiederaufarbeitungsanlage fallen pro Tonne Uran etwa 130 l hoch radioaktiven Abfalls in Form eines Glasblocks, 5 Fässer zu je 400 l mit mittelaktivem Abfall und 15 Fässer mit schwach aktivem Müll an. Diese Stoffe müssen „für alle Ewigkeit“ - das heißt zeitlich unbefristet - sicher verstaut werden, da sie auch nach Generationen eine große Gefahr darstellen.



*Schwachradioaktive Abfälle:
Hierbei geht es um
Laborrückstände, Lösungen,
Reinigungsabfälle, aber auch
verseuchte Filter und
Kleidungsstücke.*



*Wiederaufarbeitungsanlage La Hague
(Frankreich).*



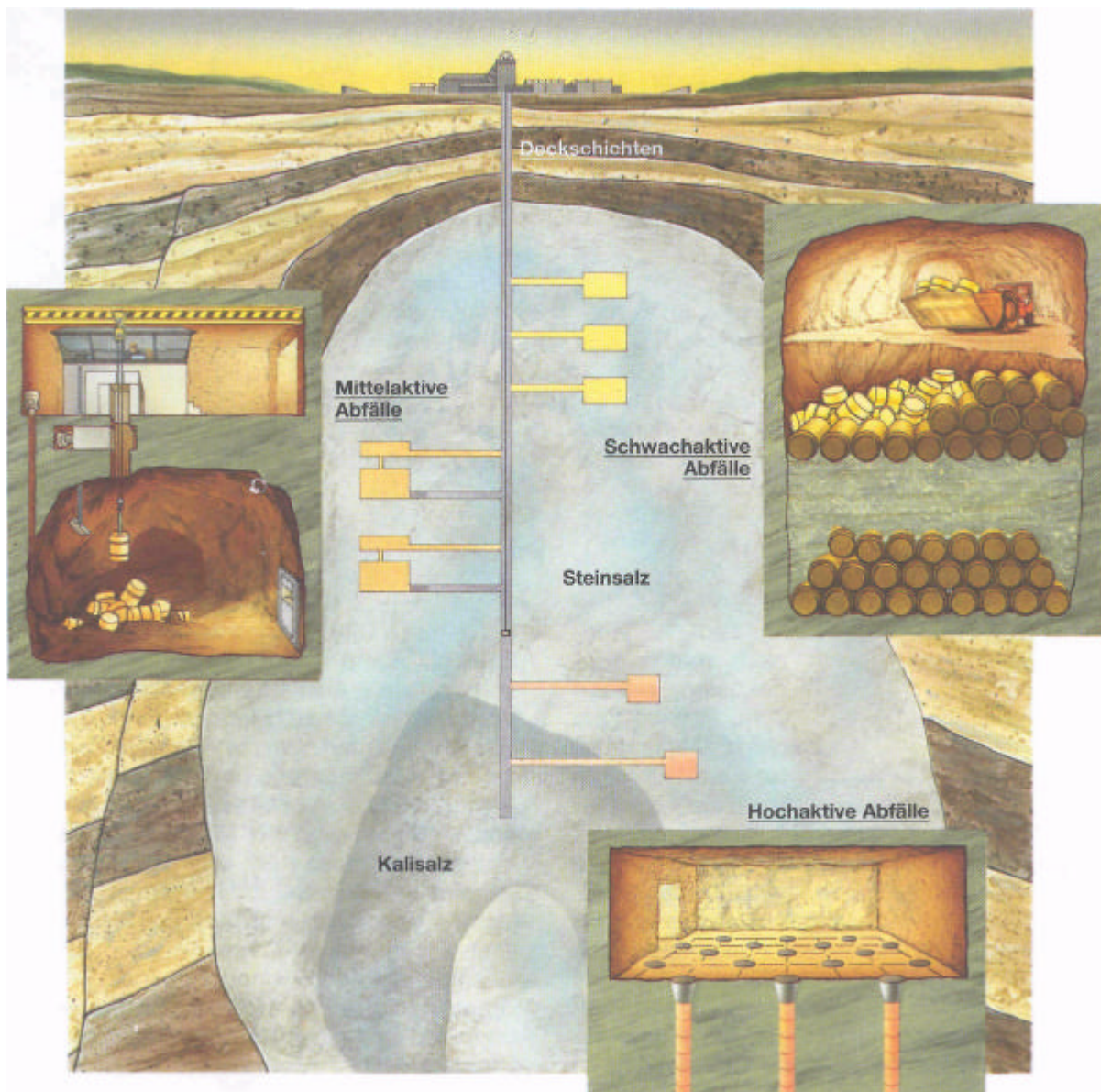
*Verglasungsverfahren für
hochaktive Abfälle: die
Glasschmelze mit den
gefährlichen Stoffen läuft in
einen Edelstahlbehälter.*

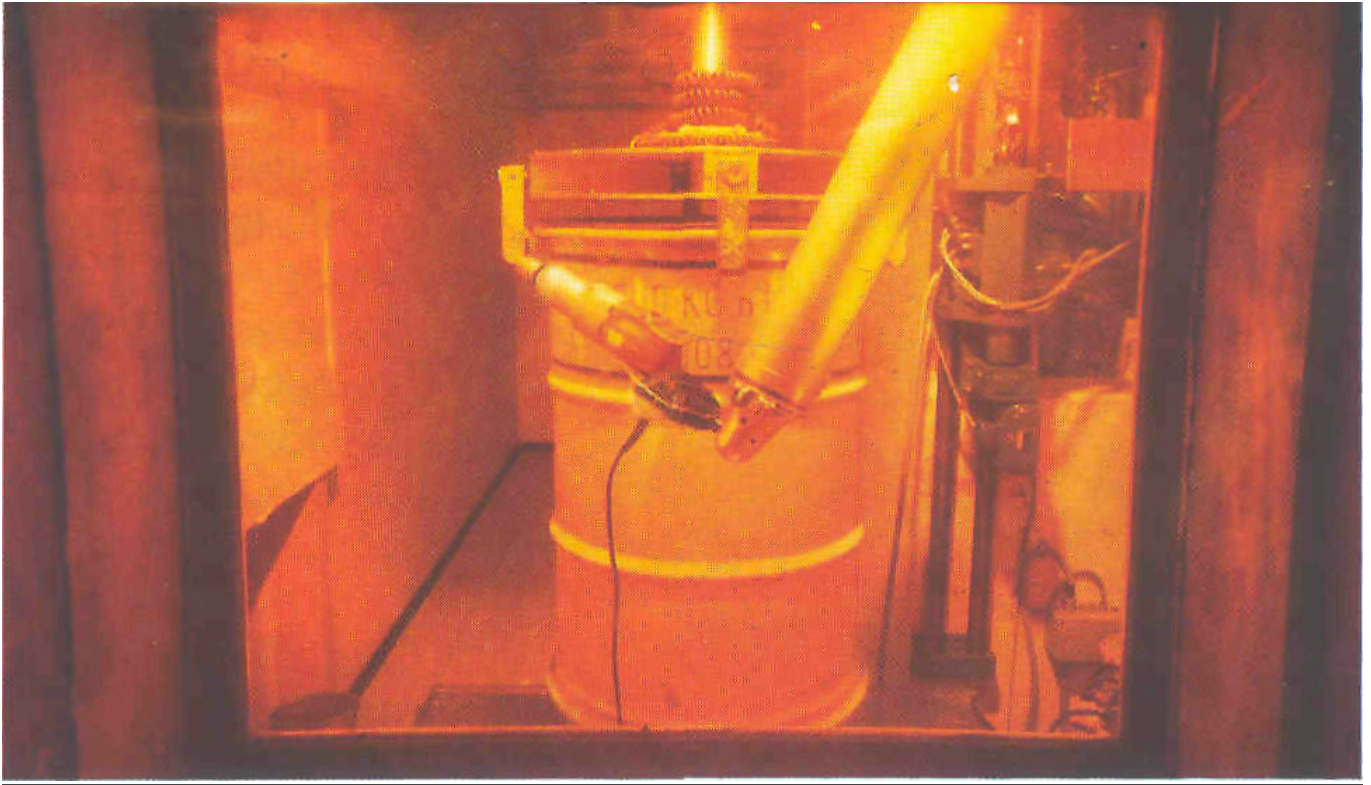
Kann man Atommüll sicher lagern?

Die beste Möglichkeit, radioaktive Abfälle für Jahrtausende sicher zu lagern, ist die Unterbringung dieser hochgefährlichen Stoffe in unterirdischen *Salzstöcken*. Die Fässer mit

schwach aktiven Abfällen werden in Steinsalzammern gebracht und lagenweise mit Salz abgedeckt. Ist so ein Raum voll aufgefüllt, wird er versiegelt. Bei den mittelaktiven Rückständen, die sich ebenfalls in Fässern befinden, ist schon mehr Vorsicht nötig. Für sie ist eine spezielle Kammer im Salzstock vorgesehen, die nicht betreten werden kann und mit Fernsehkameras überwacht wird. Die Abfälle werden in Betonabschirmbehältern in diesen Raum versenkt.

Die Endlagerung der hochaktiven Abfälle im Salzstock soll folgendermaßen vorgenommen werden: Die verglasten und in Edelstahlhüllen eingeschlossenen Abfälle werden in 1000 m Tiefe in Bohrlöchern untergebracht, welche danach wieder verschlossen werden. Steinsalzformationen sind für die Endlagerung besonders geeignet, da das Salz nach heutiger Erkenntnis absolut dicht ist, so daß keine Radioaktivität in die Umwelt, zum Beispiel ins Grundwasser, gelangen kann. Der bei uns in Aussicht genommene Salzstock bei Gorleben ist 15 km lang, 4 km breit und liegt zwischen 3000 und 300 m unter der Erdoberfläche. Seit 100 Millionen Jahren hat er sich kaum verändert, so daß zu erwarten ist, daß er auch in Zukunft stabil bleibt.





Rollreifenfaß für radioaktive Abfälle. Das Faß wird vollautomatisch bearbeitet und transportiert. Kein Mensch kommt mit ihm in Berührung.

Ist die Kernenergie rentabel?

Wenn man den gesamten Brennstoffkreislauf, aber auch spätere Folgekosten, wie sie zum Beispiel bei der Stilllegung alter Kernkraftwerke anfallen, betrachtet, kann leicht der Eindruck entstehen, die Kernenergie sei unbezahlbar. Eine Studie der Universität Essen kommt jedoch zu dem Ergebnis, daß eine kWh „Atomstrom“ etwa so teuer ist, wie eine aus Braunkohle gewonnene Kilowattstunde, jedoch billiger als Strom aus Steinkohle. Die Verhältnisse ändern sich geringfügig, wenn man unterschiedliche jährliche Betriebsdauern der Kraftwerke annimmt, jedoch sagt die Studie eindeutig aus, daß die Kernenergie mit anderen Kraftwerktypen konkurrieren kann. Ähnlich ist es in England, wo ein Stromkostenverhältnis Kernkraft zu Kohle von 16,5 :18,5 angegeben wird, und in Japan, wo dieses Verhältnis 11:15 beträgt. In Frankreich, wo sich besonders viele Kernkraftwerke befinden, beträgt das Stromkostenverhältnis Kernkraft zu Kohle 19 : 31. (Angaben der Elektrizitätswerke und staatlicher Stellen.)

Diesen Aussagen stehen pessimistische Aussagen der Öko-Institute gegenüber, die von sehr hohen Stilllegungs- und Wiederaufbereitungskosten ausgehen. Nach diesen Studien ist der „Atomstrom“ zwei Drittel teurer als der aus Kohlekraftwerken gewonnene. Dieses Ergebnis steht allerdings im Gegensatz zu den Aussagen unabhängiger Universitätsinstitute. Jedoch sind die Erfahrungen mit der Wiederaufarbeitung, der Endlagerung und der Demontage von Kernkraftwerken noch so gering, daß wohl erst die Historiker nach einigen Jahrhunderten den wirklichen Preis einer Kilowattstunde „Atomstrom“ kennen werden, zumal man die Folgekosten eventueller Katastrophen nicht einschätzen kann. Nach heutiger Erkenntnis und menschlichem Ermessen dürfte dieser Preis jedoch etwa dem des „Kohlestroms“ entsprechen.



Strahlenbelastung der Umw.

Kernenergie und Umwelt

Sind Kernkraftwerke gefährlich?

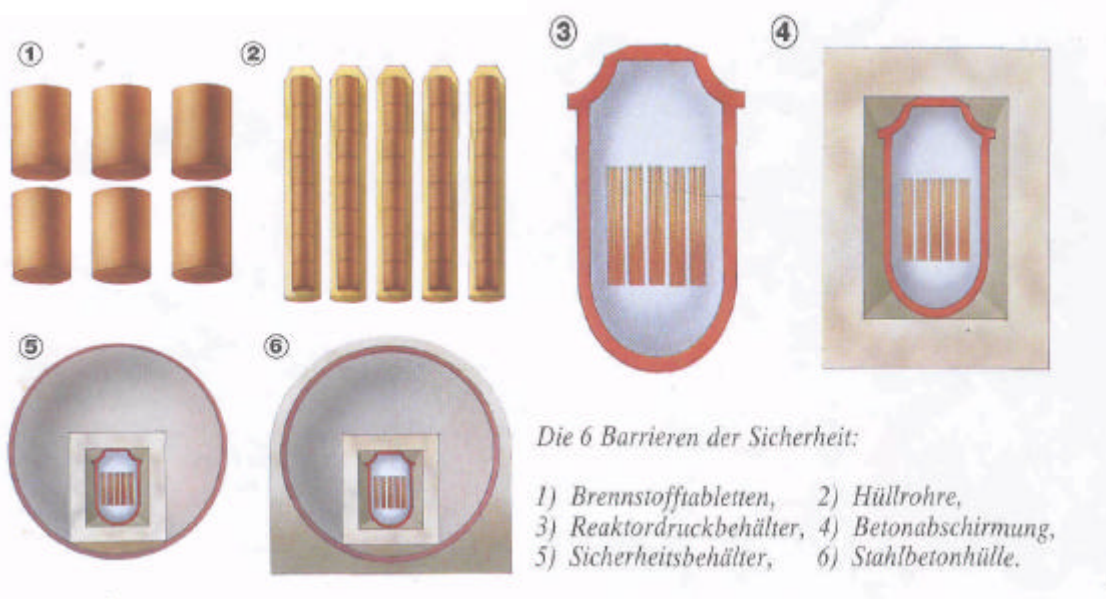
Während des Betriebs eines Kernkraftwerks entstehen in den Brennstäben mehr und mehr radioaktive Spaltprodukte und Plutoniumkerne, die auf keinen Fall in die Außenwelt gelangen dürfen. Hierfür sorgen in westdeutschen Kernkraftwerken sechs *Barrieren*, die im Normalfall für diese todbringenden Atomkerne unüberwindlich sind.

1. Die Spaltprodukte bleiben in den Brennstofftabletten eingeschlossen.
2. Die gasdicht verschlossenen Hülsen der Brennstäbe lassen keine gefährlichen Stoffe durch.
3. Der Reaktordruckbehälter bildet eine weitere Barriere.
4. Sämtliche Einbauten, von denen eine Strahlengefährdung ausgehen kann, sind von dicken Betonwänden umgeben.
5. Ein stählerner Sicherheitsbehälter, auch Containment genannt, umgibt alle bisher erwähnten Einrichtungen.

6. Die letzte Barriere ist eine mehr als 1 m dicke Betonumhüllung, die auch durch abstürzende Flugzeuge nicht zerstört werden kann.

Radioaktive Stoffe können in großem Umfang nur in die Umwelt gelangen, wenn sie alle sechs Barrieren überwinden. Dies wäre nur dann möglich, wenn alle Kühlsysteme ausfallen würden. Zwar würde dann normalerweise die Kettenreaktion sofort abbrechen, jedoch könnte die Nachwärme nicht mehr abgeführt werden und den Reaktordruckbehälter zum Schmelzen bringen. Um dies zu verhindern, gibt es in deutschen Kernkraftwerken vier voneinander unabhängige Notkühlsysteme. Der größte anzunehmende Unfall in einem Kernkraftwerk, kurz „GAU“ genannt, wäre eine plötzlich auftretende Bruchstelle im Primärkühlkreislauf. Sofort wäre der Sicherheitsbehälter mit heißem Dampf gefüllt, aber im selben Augenblick würden auch automatisch verschiedene Gegenmaßnahmen eingeleitet. Die Steuerstäbe würden schlagartig in den Reaktorkern fallen und die Kettenreaktion abschalten. Ein Druckspeicher würde Wasser für den Reaktordruckbehälter nachliefern, später kämen aus den sogenannten Flutbehältern weitere Wassermassen hinzu. Selbst wenn der Reaktordruckbehälter schmelzen würde, käme die gefährliche Schmelze zunächst mit einem meterdicken Fundament in Berührung, das aus vielen tausend Tonnen Beton und Metall besteht. Die oberen Betonschichten würden dann zu Glas schmelzen, das wie eine Isolierschicht zwischen der Kernschmelze und den unteren Betonschichten wirken würde. Die Reaktorbauwerke müssen neben den schon erwähnten Flugzeugabstürzen auch Erdbeben, Flutwellen und bestimmte Explosionsdrucke aushalten. Gegen Kriegseinwirkungen, besonders den direkten Raketenbeschuß oder eine Bombardierung, kann man die Kraftwerke allerdings nicht wirkungsvoll schützen. Auch bewaffnete Terroristen könnten in ein Kraftwerk eindringen und furchtbares Unheil anrichten, was natürlich in normalen Friedenszeiten durch viele Sicherheitsmaßnahmen verhindert wird.

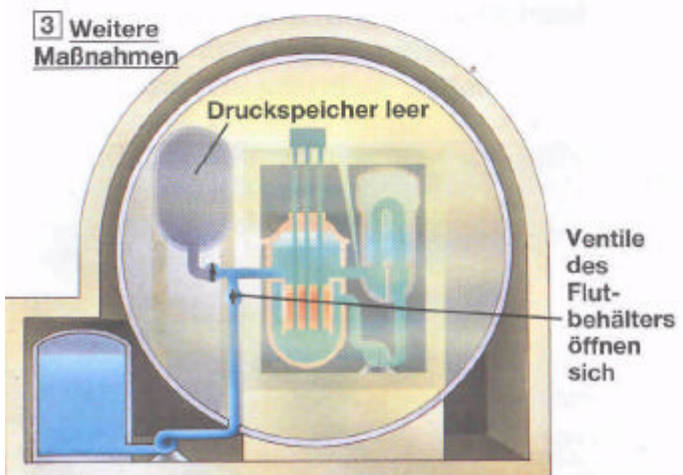
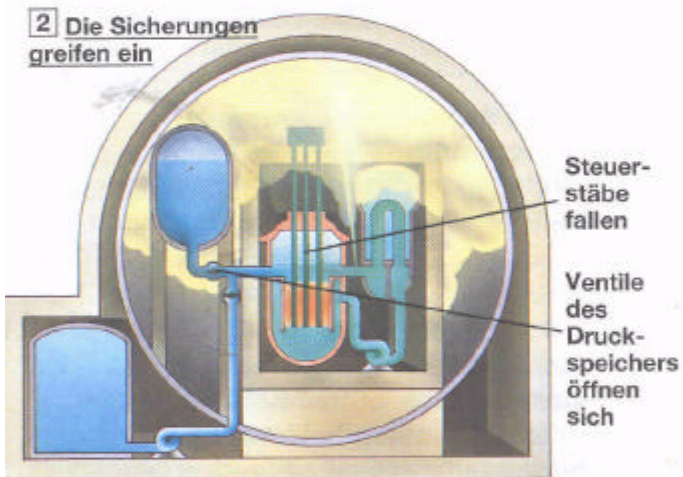
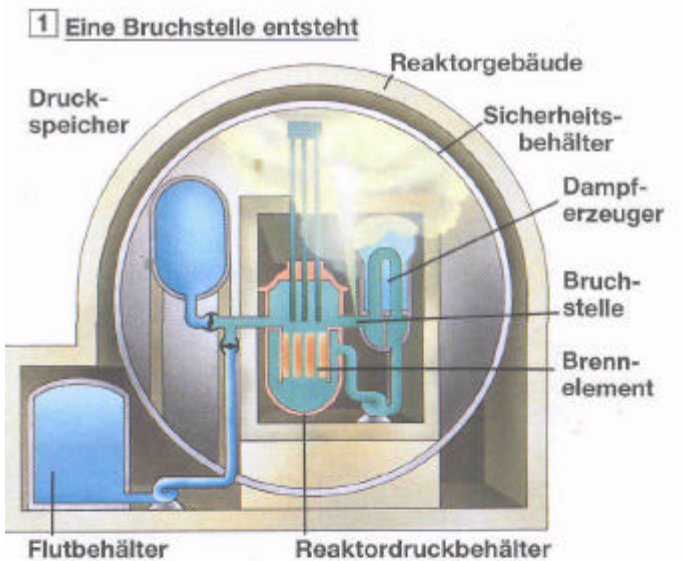
Man kann also zusammenfassend sagen, daß unsere westdeutschen Kernkraftwerke, stabile Zeiten vorausgesetzt, keine große Gefahr darstellen. Im Falle einer Bombardierung oder Sprengung allerdings könnten bei einem 1300-MW-Kraftwerk, das schon einige Zeit in Betrieb ist, so viele radioaktive Stoffe freigesetzt werden, wie bei der Explosion von 1000 Hiroshima-Bomben entstehen. Riesige Gebiete wären dann für Jahrhunderte unbewohnbar. Eine viel größere Gefahr jedoch geht von Ländern aus, bei denen der Sicherheitsstandard noch nicht so hoch wie in der Bundesrepublik Deutschland ist. Tschernobyl ist hierfür ein Beispiel!



Belasten Kernkraftwerke die Umwelt?

Trotz aller Vorsichtsmaßnahmen geben Kernkraftwerke geringe Mengen von radioaktiven Stoffen an Luft und Wasser ab. Ein winziger Teil ihrer Strahlung wird vom Menschen aufgenommen, allerdings erhält die Bevölkerung im Mittel dadurch nur eine Strahlendosis von 0,0005 Millisievert (mSv) pro Jahr. Das ist wenig, gemessen an der Dosis von 2 mSv, die der Mensch jährlich durch natürliche Strahlungsquellen, wie z. B. die kosmische Strahlung, aufnimmt. Auch die Dosis, welche man gewöhnlich bei Röntgenuntersuchungen abbekommt, ist mit 0,5 - 1 mSv pro Jahr vergleichsweise groß. Etwas ungünstiger sieht die Sache für Mitarbeiter der Kernkraftwerke aus. Sie erhalten am Arbeitsplatz eine mittlere jährliche Strahlendosis von 4,4 mSv. Auch in der unmittelbaren Umgebung von Atomanlagen kann die zusätzliche Jahresbelastung auf 0,02 mSv ansteigen, was immerhin rund einem Prozent der sowieso aufgenommenen Strahlendosis entspricht. Diese Zahlenangaben variieren von Messung zu Messung,

liegen jedoch immer weit unter den Werten für eine gesundheitsschädliche Strahlendosis. Auf der anderen Seite entlasten Kernkraftwerke auch die Umwelt. Inzwischen kommt jede dritte Kilowattstunde Strom in der Bundesrepublik Deutschland aus einem Kernkraftwerk. Dadurch wurden der Umwelt nach vorsichtigen Schätzungen bisher rund 2,7 Millionen Tonnen Schwefeldioxid, 1,4 Millionen t Stickoxide und 300 000 t Staub erspart, die von Kraftwerken mit fossiler Feuerung abgegeben worden wären und wesentlich zum Waldsterben beigetragen hätten.



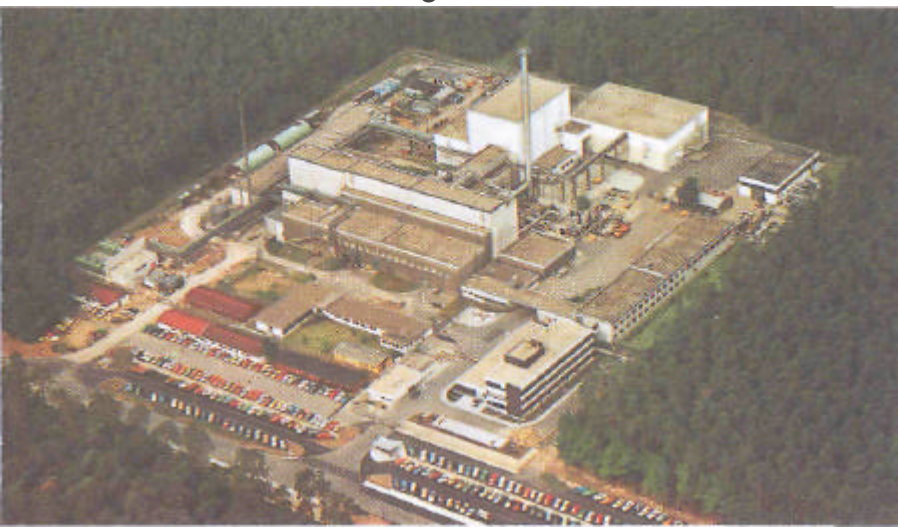
Was passiert bei einem „GAU“?
Aus der Bruchstelle schießt Wasser heraus und wird zu Dampf. Sofort fallen die Steuerstäbe herunter und beenden die Kettenreaktion. Druckspeicher und Flutbehälter sorgen hintereinander für Wassernachschub.

Sind Wiederaufarbeitungsanlagen gefährlich?

Wiederaufarbeitungsanlagen unterliegen, ähnlich wie Kraftwerke, bei uns der Strahlenschutzverordnung, nach der die Strahlendosis der Bevölkerung über Abwasser und Abluft je 0,3 mSv pro Jahr nicht überschreiten darf. Zur Zeit gibt es bei uns nur eine kleine solche Einrichtung in Karlsruhe, deren radioaktive Umweltbelastungen bis jetzt immer weit unter den gesetzlich festgelegten Grenzen blieben. Dennoch darf man die Gefährlichkeit von Großanlagen nicht unterschätzen. Die Brennstäbe werden ja in Salpetersäure aufgelöst, wobei gasförmige und flüchtige Spaltprodukte freigesetzt werden. Man fängt diese Stoffe zwar durch umfangreiche Filter wieder ein, was allerdings nicht hundertprozentig möglich ist. Immer gelangen radioaktive Abgase in die Umwelt, z. B. das gefährliche Jod-129, das bei Menschen insbesondere die Schilddrüse schädigt, sowie Krypton-85. Schon im Normalbetrieb setzen Wiederaufarbeitungsanlagen viel mehr radioaktive Stoffe als Kernkraftwerke frei. Viel schlimmer wären jedoch Stör- oder Sabotagefälle. Fällt z. B. die Kühlung eines Zwischenlagerbeckens für Atommüll aus, so können große Mengen lebensbedrohender Stoffe in die Umwelt gelangen und ganze Landstriche unbewohnbar machen. Es versteht sich von selbst, daß in einem so sicherheits- und gesundheitsbewußten Land wie der Bundesrepublik Deutschland alles Menschenmögliche getan wird, um solche Unfälle zu verhindern. Die Wahrscheinlichkeit einer Katastrophe ist also sehr gering. Auch darf man bei all diesen Überlegungen nie vergessen, daß Atomanlagen, wenn sie richtig funktionieren, große Umweltschäden vermeiden, die durch das Abbrennen fossiler Brennstoffe entstehen würden.

Wie sicher ist die Endlagerung?

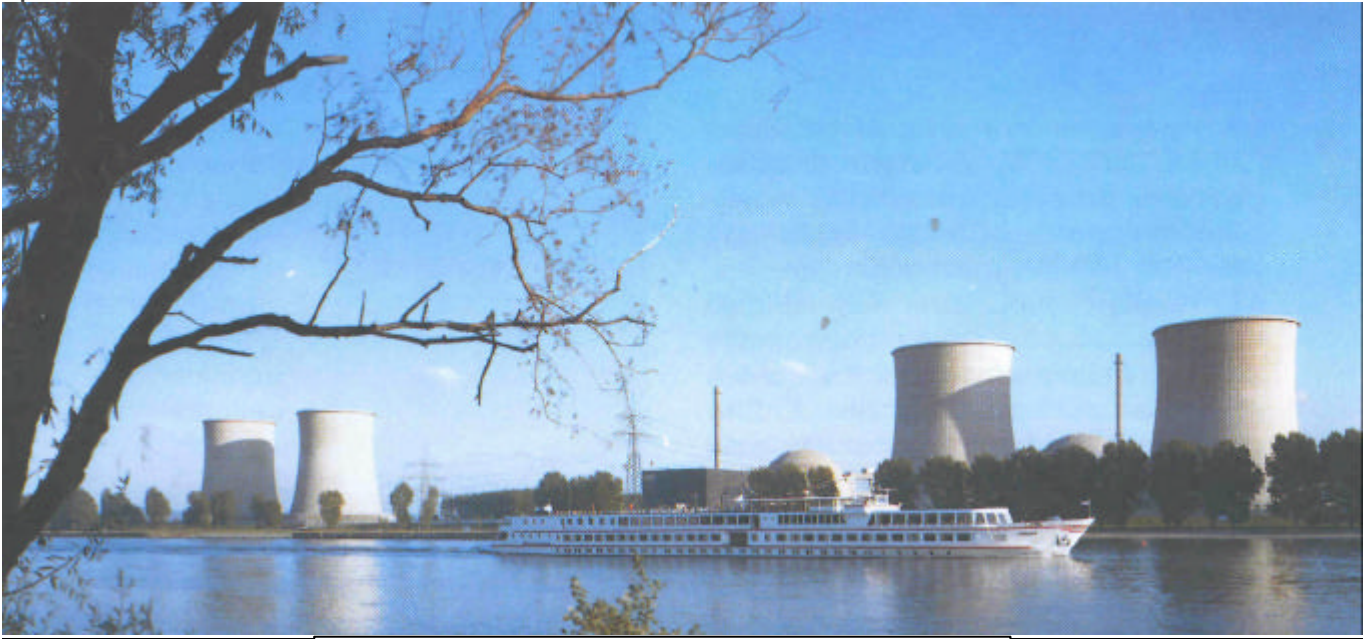
Die für die Endlagerung radioaktiver Abfälle vorgesehenen Salzstöcke bieten nach unserem heutigen Wissensstand eine hohe Sicherheit. Durch seine Verformbarkeit ist Steinsalz frei von Rissen, durch die Wasser strömen könnte. Neu entstehende Hohlräume und Risse schließen sich bald wieder. Auch sind Salzstöcke sehr beständig und stabil. Die in Deutschland für die Endlagerung ausgesuchten Salzstöcke hatten seit 100 Millionen Jahren keine Verbindung mehr zu wasserführenden Schichten und ließen sich von dramatischen Änderungen in ihrer Umgebung, wie der Entstehung verschiedener Gebirge, in keiner Weise beeindrucken. Darüber hinaus hat Steinsalz eine hohe Wärmeleitfähigkeit, was in den ersten Jahrhunderten nach der Endlagerung sehr wichtig ist. Wie bereits beschrieben, werden besonders die hochradioaktiven Stoffe mit Glas verschmolzen, so daß sie zum Bestandteil dieses Glases werden und nicht ausgelaugt werden können. Zusätzlich werden sie von korrosionsbeständigen Stoffen umgeben. Daher kann Radioaktivität auch nicht austreten, wenn wider Erwarten doch Wasser in den Salzstock eindringen sollte. Die Umwelt wäre nur gefährdet, wenn radioaktiv verseuchtes Wasser durch das über dem Salzstock liegende Gebirge hindurch Hunderte von Metern aufsteigen und sich mit dem Grundwasser vermischen würde. Das ist zumindest nach dem heutigen Stand der Forschung undenkbar. Dazu kommt, daß Radioaktivität und Wärmeproduktion des Atommülls bereits nach 1000 Jahren stark zurückgegangen sein werden.



In Karlsruhe befindet sich die einzige deutsche Wiederaufarbeitungsanlage. Ihre Umweltbelastung blieb bisher immer unter den gesetzlich festgelegten Werten.

Beeinflussen Kühltürme das Wetter?

Der Naßkühlturm eines Kernkraftwerks mit 1500 MW Leistung gibt pro Sekunde etwa eine Tonne Dampf an die Luft ab. Das sind im Jahr rund 30 Millionen Tonnen Wasser. Diese Menge entspricht immerhin 16 % der Verdunstung des Bodensees. Während dieser jedoch eine große Oberfläche hat, ist der Wasserausstoß des Kühlturms auf einen sehr kleinen Raum begrenzt, was bei bestimmten Großwetterlagen zu starken Beeinträchtigungen des lokalen Klimas führen kann. Hierzu gehören Nebel- und Wolkenbildung, verminderte Sonneneinstrahlung und häufigere Niederschläge. Besonders problematisch ist die Lage im Herbst, wenn die Luftfeuchtigkeit sowieso hoch ist, während bei trockener Luft keine Wetterbeeinträchtigung stattfinden kann. Die Großwetterlage wird durch Kühltürme nicht beeinflusst. Die hier geschilderten Vorgänge gelten übrigens für alle Kraftwerksarten, die Naßkühltürme besitzen, sind also kein spezielles Problem der Kernkraftwerke.



Kühltürme beim Kernkraftwerk Biblis. Ein Turm gibt pro Jahr 30 Millionen Tonnen Wasser ab.

Können uns die Atomanlagen anderer Länder gefährden?

Bis vor einigen Jahren wurden in vielen Ländern mit Radioaktivität äußerst leichtfertig umgegangen. Zum Teil ist dies auch noch heute der Fall. Atombomben aller Art wurden nach Lust und Laune über dem Erdboden gezündet, Atom Müll unsachgemäß vergraben oder im Meer versenkt. So mußten in der Sowjetunion, wie der Zukunftsforscher R. Jungk berichtet, auch schon vor dem Tschernobyl-Unfall ganze Siedlungen wegen radioaktiver Verseuchung aufgegeben werden, bei der französischen Wiederaufbereitungsanlage La Hague ereignete sich eine ganze Kette kleinerer Unfälle, die eine mehr oder weniger große Strahlenbelastung der Umwelt zur Folge hatten. Nach Einstellung der oberirdischen Atomwaffentests geht die weltweite Umweltbelastung mit radioaktiven Stoffen erfreulicherweise stark zurück. Dennoch ist es äußerst beunruhigend, daß wir von Ländern umgeben sind, die heute noch nicht das hohe Sicherheits- und Umweltbewußtsein haben wie die bundesdeutschen Regierungsstellen und Elektrizitätswerke. Der Reaktorunfall von Tschernobyl in der Sowjetunion hat uns gezeigt, welche Gefahren von ausländischen Atomanlagen ausgehen können. Gegen Kriminalität, Terrorismus oder gar Kriegseinwirkungen gibt es allerdings auch bei uns in Deutschland keinen hundertprozentigen Schutz.

Kann ein Kernkraftwerk zu einer Atombombe werden?

Eine nukleare Explosion in einem Kernkraftwerk ist auch bei Versagen aller Sicherheitsvorkehrungen oder einer Besetzung durch Terroristen nicht möglich. Der in den Reaktoren benutzte Brennstoff besteht nur zu 3 % aus spaltbarem U-235. Zur Auslösung einer Kernexplosion wäre aber viel höher angereichertes Uran nötig. Selbst der schnelle Brüter hat einen zu geringen Anreicherungsgrad, um wie eine Atombombe zu explodieren, wie immer wieder von Gegnern dieser Einrichtung behauptet wird. Seine Brennelemente enthalten nur 20-30 % spaltbaren Materials, eine Atombombe hat dagegen fast 100 %.

Was ist eine Atombombe?

Die in den Atomkernen schlummernden Energien werden in Kernkraftwerken zwar entfesselt, aber auch gleich wieder gezähmt. Kettenreaktionen laufen dort völlig kontrolliert ab und erzeugen gleichmäßigen Energiestrom. Bei einer Atombombe werden durch unkontrollierte Kettenreaktion schlagartig so viele Kerne gespalten, daß gewaltige Energiemengen in Sekundenbruchteilen freigesetzt werden und ungeheure Zerstörungen anrichten. Um eine solche Explosion auszulösen, benötigt man praktisch reines U-235 oder Plutonium-239. Das passive U-238, welches die Katastrophe verhindern würde, wird in Isotopentrennungsanlagen herausgefiltert. Außerdem muß eine gewisse Mindestmenge des Spaltstoffs, die *kritische Masse*, vorhanden sein, damit möglichst viele Neutronen auch neue Kerne treffen, ohne den Sprengsatz zu verlassen. Diese kritische Masse beträgt bei U-235, wie schon erwähnt, 23 kg, bei Plutonium-239 dagegen nur 5,6 kg, was einer tennisballgroßen Kugel entspricht. Es gibt nun sehr verschiedene Bombentypen. Zum Beispiel kann man zwei oder mehrere „unterkritische“ kleine Uranstücke, die allein ungefährlich sind, am Zielort zusammenschießen. Zusammen genommen erreichen sie die kritische Masse. Eine Neutronenquelle sorgt für die ersten Spaltungen. Danach geht das Inferno los! Fast jedes Neutron spaltet einen neuen Kern; die dabei entstehenden 2 bis 3 neuen Neutronen nehmen wieder Spaltungen vor. Kein Regelstab bremst die anwachsende Neutronenlawine, So werden in einigen milliardstel Sekunden durch unzählige Kernspaltungen ungeheure Energien, aber auch todbringende radioaktive Spaltprodukte freigesetzt. Die hochaktiven Substanzen, welche man sonst sicher, in Glasbehälter eingeschmolzen, in Salzstöcken lagert, regnen auf Felder, Wälder und Städte nieder. Die bei der Explosion verlorengegangene Masse ist vergleichsweise gering. So brachte bei der Hiroshima-Bombe das Verschwinden von 1 g Materie, welches in Energie umgewandelt wurde, 200 000 Menschen den Tod.



Explosion einer Wasserstoffbombe.

Wie würde die Welt nach einem Atomkrieg aussehen?

Ein Weltweiter Atomkrieg wäre das fürchterlichste Schicksal, das die Erde ereilen könnte, schlimmer als alle Pestepidemien und Erdbeben, Vulkanausbrüche und chemisch verursachte Umweltkatastrophen zusammen. Zwar sind zur Zeit alle Mächte der Erde bemüht, einen solchen Konflikt zu verhindern, da durch ihn im Gegensatz zu früheren Eroberungskriegen niemand etwas gewinnen kann, sondern alle alles verlieren würden. Aber ganz unmöglich ist so ein Krieg angesichts immer weiter wachsender Waffenarsenale nicht, zumal er auch durch ein technisches Versagen oder durch wahnsinnige Diktatoren ausgelöst werden könnte. Nicht nur Millionen oder Milliarden von Todesopfern wären dann zu beklagen, der Rest der Welt wäre für Jahrhunderte radioaktiv verseucht, besonders auch das Erbgut von Pflanze, Tier und Mensch. Viele Arten würden ganz aussterben, zumal der bei Kernexplosionen aufgewirbelte Staub auch nach Jahrzehnten einen Teil des Sonnenlichts abschirmen und eine neue Eiszeit hervorrufen würde. Die gesamte menschliche Zivilisation vom Verkehrswesen bis zur medizinischen Versorgung würde, falls es überhaupt Überlebende gibt, zusammenbrechen, erst nach Jahrhunderten könnte sich die Erde erholen.



Hiroshima. Die Zerstörung dieser Stadt durch eine Atombombe leitete das Ende des 2. Weltkrieges ein. Japan mußte kapitulieren.

Soll ich die Kernenergie nun ablehnen oder befürworten?

Neben den in diesem Kapitel beschriebenen Gefahren der Kernenergie darf man auch ihre Vorteile nicht vergessen. Auf der Erde leben heute 5 Milliarden Menschen, bald werden es 8 Milliarden sein. Sie alle brauchen Energie. Die rücksichtslose Verbrennung der fossilen Brennstoffe würde die Umwelt extrem belasten, zu Klimaveränderungen führen, vor allen Dingen jedoch würden diese wertvollen Grundstoffe späteren Generationen nicht mehr zur Verfügung stehen. Die leider heute noch stark vernachlässigte Nutzbarmachung der Sonnenenergie, die sauberste aller Lösungen, steckt erst in den Anfängen. Wasser, Wind und Gezeiten reichen nicht aus, den Energiehunger von Milliarden zu stillen.

Die Kernenergieanlagen sind bei normalem Betrieb umweltfreundlich und verbrauchen Stoffe wie Uran und Plutonium, welche sonst zu nichts zu gebrauchen wären. Dazu kommt, daß aus vergleichsweise winzigen Uranmengen sehr hohe Energiebeträge gewonnen werden können. Es ist also möglich, ohne zu hohe Lagerkosten Kernbrennstoffvorräte für mehrere Jahre anzulegen. Zusammenfassend kann man

sagen, daß den großen Vorteilen der heutigen Form der Kernenergiegewinnung die Möglichkeit gewaltiger radioaktiver Verseuchungen entgegensteht. Allerdings ist die Eintrittswahrscheinlichkeit solcher Unglücksfälle sehr gering, wenn sich alle Länder dem westdeutschen Sicherheitsstandard anpassen, was nach dem Warnschuß von Tschernobyl unbedingt erreicht werden muß. Eine weitere rücksichtslose Verbrennung der fossilen Brennstoffe würde dagegen auf jeden Fall zu großen Umweltschäden führen. Sowohl Erdöl und Kohle als auch Uran und Plutonium sollten daher im nächsten Jahrhundert sicheren und umweltfreundlichen Techniken der Energiegewinnung Platz machen, deren Entwicklung wir uns mit aller Kraft widmen müssen.



28092

In dieser Reihe sind bisher erschienen:

- | | |
|---|--|
| Band 1 Unsere Erde | Band 43 Schmetterlinge |
| Band 2 Der Mensch | Band 44 Das Alte Testament |
| Band 3 Atomenergie | Band 45 Mineralien und Gesteine |
| Band 4 Chemie | Band 46 Mechanik |
| Band 5 Entdecker | Band 47 Elektronik |
| Band 6 Die Sterne | Band 48 Luft und Wasser |
| Band 7 Das Wetter | Band 49 Leichtathletik |
| Band 8 Das Mikroskop | Band 50 Unser Körper |
| Band 9 Der Urmensch | Band 51 Muscheln und Schnecken |
| Band 10 Fliegerei | Band 52 Briefmarken |
| Band 11 Hunde | Band 53 Das Auto |
| Band 12 Mathematik | Band 54 Die Eisenbahn |
| Band 13 Wilde Tiere | Band 55 Das Alte Rom |
| Band 14 Versunkene Städte | Band 56 Ausgestorbene Tiere |
| Band 15 Dinosaurier | Band 57 Vulkane |
| Band 16 Planeten und Raumfahrt | Band 58 Die Wikinger |
| Band 17 Licht und Farbe | Band 59 Katzen |
| Band 18 Der Wilde Westen | Band 60 Die Kreuzzüge |
| Band 19 Bienen und Ameisen | Band 61 Pyramiden |
| Band 20 Reptilien und Amphibien | Band 62 Die Germanen |
| Band 21 Der Mond | Band 63 Foto, Film, Fernsehen |
| Band 22 Die Zeit | Band 64 Die Alten Griechen |
| Band 23 Von der Höhle bis zum Wolkenkratzer | Band 65 Die Eiszeit |
| Band 24 Elektrizität | Band 66 Berühmte Ärzte |
| Band 25 Vom Einbaum zum Atomschiff | Band 67 Die Völkerwanderung |
| Band 26 Wilde Blumen | Band 68 Natur |
| Band 27 Pferde | Band 69 Fossilien |
| Band 28 Die Welt des Schalls | Band 70 Das Alte Ägypten |
| Band 29 Berühmte Wissenschaftler | Band 71 Seeräuber |
| Band 30 Insekten | Band 72 Heimtiere |
| Band 31 Bäume | Band 73 Spinnen |
| Band 32 Meereskunde | Band 74 Naturkatastrophen |
| Band 33 Pilze, Farne und Moose | Band 75 Fahnen und Flaggen |
| Band 34 Wüsten | Band 76 Die Sonne |
| Band 35 Erfindungen | Band 77 Tierwanderungen |
| Band 36 Polargebiete | Band 78 Münzen und Geld |
| Band 37 Computer und Roboter | Band 79 Moderne Physik |
| Band 38 Prähistorische Säugetiere | Band 80 Tiere - wie sie sehen, hören und fühlen |
| Band 39 Magnetismus | Band 81 Die Sieben Weltwunder |
| Band 40 Vögel | Band 82 Gladiatoren |
| Band 41 Fische | Band 83 Höhlen |
| Band 42 Indianer | |

TESSLOFF VERLAG