

## D Großtechnische Energiewandler

Die Primärenergieträger sind im Allgemeinen wenig geeignet, um beim Endverbraucher in Nutzenergie umgewandelt zu werden. Deshalb werden sie zunächst in Sekundärenergie umgewandelt, um die

Wandlungsfähigkeit,  
Transportfähigkeit und  
Speicherfähigkeit

der Energie im Vergleich zur Primärenergie zu verbessern.

Zwei dieser Kriterien werden in vorbildlichster Weise von der elektrischen Energie erfüllt. Daher steht sie weltweit in allen entwickelten Ländern großflächig zur Verfügung.

### 1 Bedeutung der elektrischen Energie

#### 1.1 Vorteile der elektrischen Energie

Stellen wir Vor- und Nachteile der elektrischen Energie gegenüber:

##### Vorteile

Die elektrische Energie

- läßt sich nahezu unbegrenzt mit besten Wirkungsgraden in andere Energieformen umwandeln.
- ist, beim Transport und bei der Umwandlung in Nutzenergie, sehr umweltfreundlich (es entstehen keine Schadstoffe; es ist keine Entsorgung von irgendwelchen Reststoffen erforderlich).
- läßt sich aus jeder Primärenergie erzeugen.
- ist masselos und nicht stoffgebunden.
- läßt sich rasch, zuverlässig, sauber und mit geringen Verlusten bis zum Endabnehmer verteilen.
- läßt sich sehr gut messen, steuern, regeln und elektronisch verarbeiten.
- ist in der modernen Informationsübertragung und in der Datenverarbeitung unersetzlich.

##### Nachteile

Die elektrische Energie

- läßt sich nicht unmittelbar in größeren Mengen speichern, d. h. sie muss in dem Moment erzeugt werden, in dem sie verbraucht wird.
- wird zum überwiegenden Teil in Wärmekraftprozessen erzeugt, deren Wirkungsgrade naturgesetzlich niedrig sind.
- ist für die energietechnische Übertragung leitungsgebunden.
- ist sowohl bei den Kraftwerken als auch den Leitungen außerordentlich kapitalintensiv.

Diese unverkennbaren Vorteile haben zu einem flächendeckenden Elektrizitätsversorgungssystem in ganz Europa und auch in anderen Ländern der Welt geführt. Die Industrie hat eine unglaubliche Vielfalt von elektrischen Geräten entwickelt, die dem Anwender alle möglichen Energiedienstleistungen zur Verfügung stellt.

Die elektrische Energie hat sich aus diesen Gründen sowohl für den Einzelnen als auch für die gesamte Wirtschaft zu einer Schlüsselenergie entwickelt, ohne die die modernen Industriestaaten nicht mehr überlebensfähig wären. Das zeigt sich immer dann, wenn die Stromversorgung - was sehr selten vorkommt - für eine gewisse Zeit ausfällt.

#### 1.2 Energiebedarf und Produktion

Wegen der großen Bedeutung der elektrischen Energie für die Volkswirtschaft wird etwa 1/3 der in Deutschland verbrauchten Primärenergieträger in elektrische Energie umgewandelt.

Die Nachfrage nach elektrischer Energie ist starken tages- und auch jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen. Abb.1 zeigt ein typisches Belastungsdiagramm für einen Winter- und für einen Sommertag.

Diese Schwankungen treten aufgrund der Verbrauchsgewohnheiten der Abnehmer der elektrischen Energie auf. Die typische Mittagsspitze kommt zustande, weil zu dieser Zeit in vielen Haushalten elektrisch gekocht wird. Das Nachttal rührt daher, weil nachts die meisten Industriebetriebe stillstehen und die Haushalte ruhen. Die Elektrizitätsversorgungsunternehmen müssen auf diese Nachfrageschwankungen unmittelbar reagieren, da sich elektrische Energie nicht speichern lässt. Zwar wird z. T. mit entsprechender Tarifgestaltung (billiger Nachttarif, teurer Tagtarif) versucht, die Unterschiede in der Stromnachfrage zu glätten, jedoch gelingt das nur begrenzt.

Technisch wird den Schwankungen Rechnung getragen, indem man Kraftwerke für unterschiedliche **Lastbereiche** einsetzt.

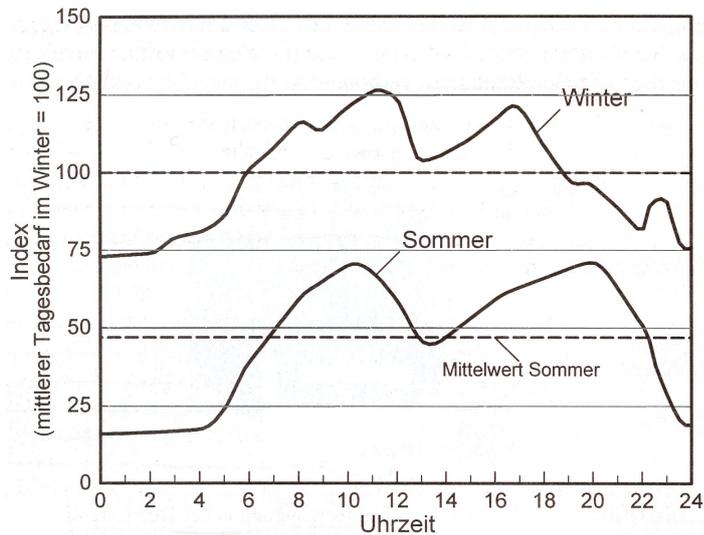


Abb.1: Elektrischer Energieverbrauch

### a) Grundlastbereich

Kraftwerke des Grundlastbereichs sind durchgehend im stationären Betrieb am Netz, da es technisch und/oder wirtschaftlich nicht sinnvoll ist, diese Kraftwerkstypen kurzfristig den Verbrauchsschwankungen anzupassen. **Flusskraftwerke, Kernkraftwerke** und Kohlekraftwerke, hier insbesondere **Braunkohlekraftwerke**, werden im Grundlastbereich betrieben. Das sind die Kraftwerke mit den preisgünstigsten Primärenergieträgern.

### b) Mittellastbereich

Der Teil der elektrischen Energie, der tagsüber zusätzlich benötigt wird, wird z. T. von Kraftwerken des Mittellastbereichs abgedeckt. In diesem Bereich kommen vor allem **Steinkohlekraftwerke** in Betracht, deren Leistungsabgabe gut steuerbar ist. Des Weiteren sind es **Erdgas-** und **Erdölkraftwerke**, die relativ schnell zu- und abgeschaltet werden können und deswegen den Mittellastbereich mit abdecken.

Die Baukosten dieser Kraftwerke sind niedriger, ihre Energiekosten sind jedoch gegenüber von den Kraftwerken des Grundlastbereiches höher.

### c) Spitzenlastbereich

In diesem Bereich benötigt man Kraftwerke, mit denen man sehr schnell, d.h. innerhalb von Minuten, auf kurzfristige Lastschwankungen reagieren kann. Diese Kraftwerkstypen müssen in kurzer Zeit auf volle Leistung hochgefahren und ebenso wieder heruntergefahren werden können. **Speicher** und **Pumpspeicherkraftwerke** werden in diesem Bereich ebenso eingesetzt wie **Gasturbinenkraftwerke**.

Da diese Kraftwerke nur in kurzen Zeiten des Spitzenbedarfs arbeiten, spielen die Betriebskosten eine untergeordnete Rolle.

Bei den Pumpspeicherkraftwerken wird in der nachfragearmen Nachtzeit Wasser in das Hochbecken gepumpt. Bei Spitzenbelastung läßt man es ins Talbecken strömen und treibt damit Turbinen an, um die Lastspitze abzudecken.

## 1.3 Herkunft der elektrischen Energie

Weltweit wurden im Jahr 2016 90 EJ elektrische Energie erzeugt.

Aus Abb.2 geht hervor, dass ca. 65% des Stroms aus fossilen Energien gewonnen wurden. Kohle ist weltweit die wichtigste Primärenergie bei der Stromproduktion, gefolgt von Gas und den erneuerbaren Energien, davon insbesondere Wasser.

Der Gesamtanteil der erneuerbaren Energien liegt bei ca. 25%

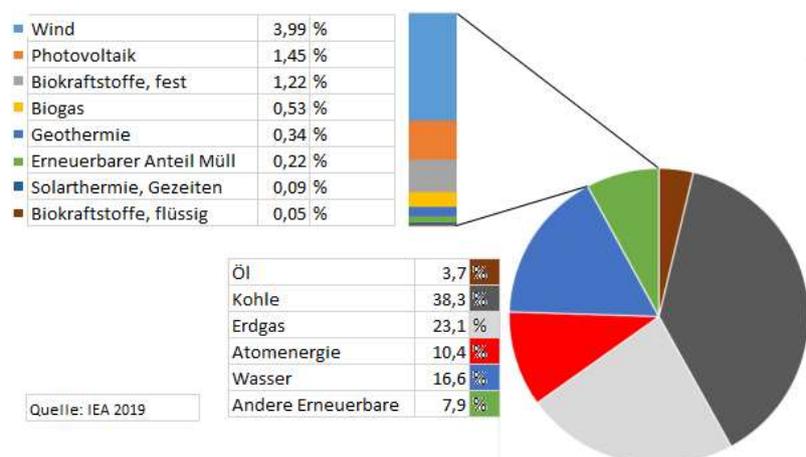


Abb.2: Weltweite Stromerzeugung

## 2 Kohlekraftwerke

### 2.1 Einleitung

Kohlekraftwerke (KKW) sind **Wärme**kraftwerke. Die dort produzierte elektrische Energie wird durch Umwandlung von der in der Kohle gebundenen **chemischen Energie** erzeugt, wobei zunächst durch Verbrennung **Wärmeenergie** erzeugt wird.

Aus thermodynamischen <sup>1)</sup> Gründen kann nur ein Teil der Wärmeenergie in **Arbeit** bzw. **elektrische Energie** umgewandelt werden. Ein großer Teil muss abgeführt werden. Er wird über **Kühltürme** (Abb.1) an die Umgebung abgegeben.



Abb.1: Kohlekraftwerk

In Deutschland wird zurzeit die meiste elektrische Energie in Kohlekraftwerken produziert. Man unterscheidet zwischen **Braunkohle** und **Steinkohle**, von denen es jeweils noch verschiedenen Sorten (Weichbraunkohle, Glanzbraunkohle u.a. oder Fettkohle, Anthrazit u.a.) gibt.

Braunkohle ist die geologisch gesehen die jüngere der beiden Kohlearten. Ihr Wassergehalt ist höher und ihr Heizwert ist dreimal geringer als der von Steinkohle. Braunkohle kann in Tagebau gefördert werden, im Gegensatz zur Steinkohle die in tieferen Erdschichten liegt und daher unter Tage gefördert werden muss.

Wegen des geringeren Heizwertes lohnt der Transport von Braunkohle nicht. Braunkohlekraftwerke befinden sich daher nahe der Kohleabbaustätte, wogegen Steinkohlekraftwerke ihren Brennstoff teilweise von sehr weitem angeliefert bekommen.

Die betriebenen Kohlekraftwerke haben eine Leistung von etwa 200 MW bis 1000 MW. Diese Angaben beziehen sich auf die abgegebene elektrische Leistung.

### 2.2 Funktionsweise

Die Kohle ist im Anlieferungszustand ein Feststoff, der sich hauptsächlich aus Kohlenstoff mit einer gewissen Feuchtigkeit zusammensetzt. Zusätzlich besteht Kohle aus Wasserstoff, Sauerstoff, Schwefel, Stickstoff und mineralischen Stoffen.

In Abb.5 ist ein Kraftwerk schematisch dargestellt.

Die angelieferte Kohle wird zunächst gemahlen und getrocknet. Dann wird sie mit vorgewärmter Luft in der **Brennkammer (Kessel)** bei ca. 1200°C verfeuert. Häufig wird dazu ein Wirbelschichtverfahren (schwebend Verbrennung) verwendet.

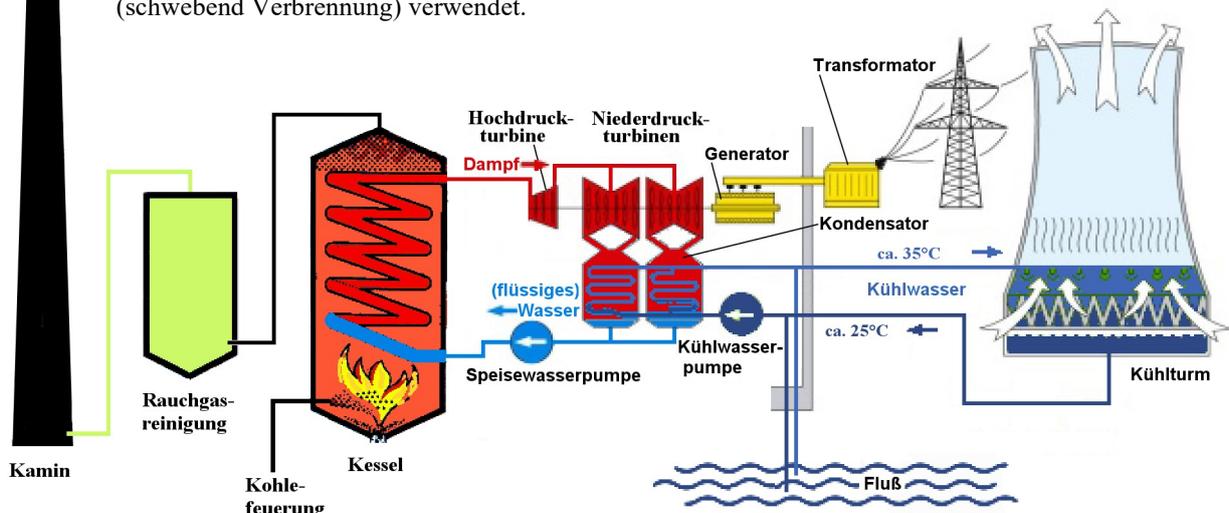


Abb.5: Schematische Darstellung eines Kohlekraftwerkes

<sup>1)</sup> Thermodynamik = Wärmelehre

Der Kohlenstoffanteil oxidiert dabei zu Kohlenstoff. Der Schwefel oxidiert ebenfalls, die mineralischen Einschlüsse verbrennen zu Asche. Bei den hohen Verbrennungstemperaturen reagiert der Stickstoff aus der Kohle ebenso wie ein Teil des Luftstickstoffes mit dem Sauerstoff.

Der Kessel dient als **Dampferzeuger**. Die **Wärme** der heißen Verbrennungsgase geht auf das Wasser des Dampfkreislaufes über. Hierzu verlaufen im Kessel viele Kilometer Rohrleitungen, damit das durch die Speisepumpe geförderte Wasser im Kessel verdampfen kann.

Der Dampf, der den Kessel verlässt, strömt durch einen Zwischenüberhitzer und einen **Dampftrockner**. Er erreicht die Dampfturbine mit einer Temperatur von mehr als 500°C und steht unter ca. 250 bar Druck.

In der Dampfturbine werden die im Dampf enthaltene Wärme- und Druckenergie in Bewegungsenergie des **Läufers** umgewandelt ist.

Die Dampfturbine (Abb. 6 und 7) besteht aus mehreren **Leiträdern** und **Laufträgern**, die abwechselnd angeordnet sind. Die **Leitschaufeln** der Leiträder sind am Gehäuse fixiert und leiten den Dampf auf die **Laufschaukeln**.

Diese sind an der rotierbaren Welle, dem **Läufer** (Abb.8), fixiert. Ein Teil der im Dampf enthaltenen Energie wird am Lauftrieb in **mechanische Energie** umgewandelt, der Läufer dreht.

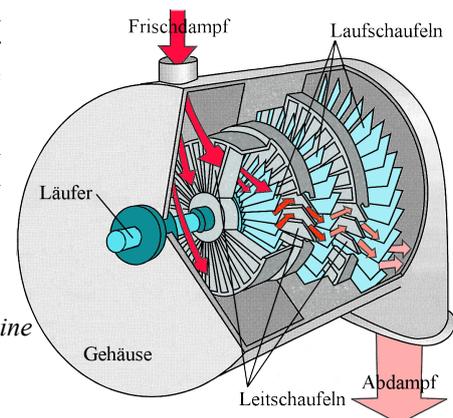


Abb.6: Aufbau einer Dampfturbine

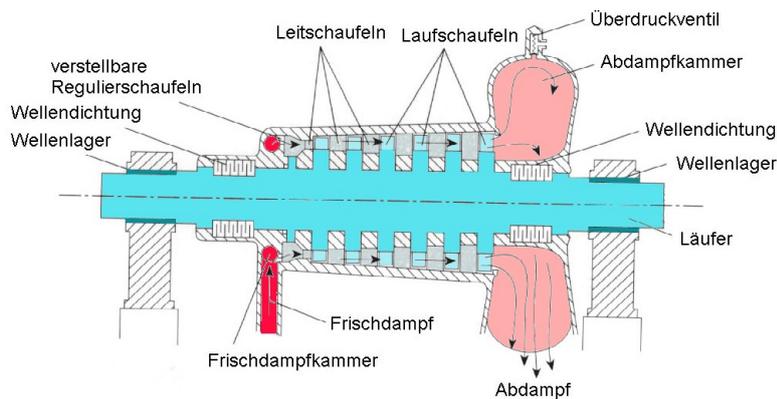


Abb.7: Schnittdarstellung einer Dampfturbine



Abb.8: Arbeiten am Läufer

Der energieärmere Dampf strömt zum nächsten Leitrad und wird dort wiederum auf das nächste Lauftrieb gelenkt. Dieser Vorgang wiederholt sich fortwährend.

Der Dampf entspannt sich auf dem Weg durch die Turbine immer mehr, sein Druck und seine Temperatur fallen. Der Durchmesser der Räder vergrößert sich daher kontinuierlich, damit bei geringerem Druck die größeren Schaufeln ein entsprechendes Drehmoment liefern können. Man unterscheidet dabei zwischen dem **Hochdruckteil**, dem **Mitteldruck-** und dem **Niederdruckteil** der Turbine. Je nach Größe des Kraftwerkes handelt es sich hierbei um separate Turbinen.

Der Läufer ist mit dem **Generator** verbunden, der die mechanische Energie des Läufers in **elektrische Energie** umwandelt.

Die elektrische Energie wird im **Transformator** auf eine hohe Spannung umgewandelt und dann über Hochspannungsleitungen landesweit oder grenzüberschreitend verteilt.

Der Wasserdampf steht beim Austritt aus der Niederdruckturbine unter einem Druck von 0,04 bar und hat eine Temperatur von 35°C. Er hat noch immer den gasförmigen Aggregatzustand.

Im nachfolgenden **Kondensator** wird er soweit abgekühlt, dass er verflüssigt. Mit der weiter vorne erwähnten **Speisewasserpumpe** wird er wieder in den Kessel gepumpt. Der **Dampf-Kreislauf** beginnt somit erneut.

Zur Wärmeabgabe des Dampfes im Kondensator gibt es einen **Kühlwasser-Kreislauf**. Das Kühlwasser nimmt im Kondensator die Wärme auf und gibt sie anschließend an die Umgebung ab.

Die abzuführende Wärmeenergie ist sehr groß. Thermodynamisch bedingt ist sie größer als die vom Kraftwerk produzierte elektrische Energie.

Deswegen werden meistens riesige Kühltürme verwendet, in denen das erwärmte Kühlwasser versprüht und durch entgegen strömende Luft gekühlt wird. Dabei verdunstet ein Teil des Wassers. Die dem Wasser entzogene **Verdunstungswärme** trägt zur Abkühlung des Wassers bei.

Die Verluste an Kühlwasser müssen durch frisches Wasser ersetzt werden. Daher sind Kohlekraftwerke immer in der Nähe eines Flusses errichtet. Ein Teil des erwärmten Kühlwassers kann auch direkt in den Fluss fließen. Allerdings darf aus ökologischen Gründen die Flusstemperatur nicht zu hoch werden.

## 2.3 Wirkungsgrad und Energieverluste

Die **Thermodynamik** lehrt uns, dass der größtmögliche Wirkungsgrad eines rechtsgängigen **Kreisprozesses**<sup>1)</sup> der **Carnot**<sup>2)</sup>-Wirkungsgrad ist.

Er berechnet sich wie folgt:

Carnot-  
Wirkungsgrad

$$\eta = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}}$$

$\eta$ : Wirkungsgrad des Carnot-Kreisprozesses<sup>3)</sup>

$T_{\min}$ : niedrigste Temperatur im Kreisprozess in K

$T_{\max}$ : höchste Temperatur im Kreisprozess in K

Berechnung des Carnot-Wirkungsgrades mit den Temperaturen eines realen Kohlekraftwerkes:

Als niedrigste Temperatur im Kreisprozess kann die Umgebungstemperatur (beispielsweise 20°C oder 30°C) angenommen werden.

Aufgrund der Wärmefestigkeit der Stähle ist die höchste Temperatur auf Werte zwischen 500°C und 600°C begrenzt.

Daraus ergibt sich ein größtmöglicher Wirkungsgrad von 67%.

Der Carnot-Kreisprozess ist ein theoretischer Kreisprozess. **Reale Kreisprozesse** haben aufgrund von irreversiblen Vorgängen geringere Wirkungsgrade.

Ein Kohlekraftwerk arbeitet nicht nach dem Carnot-Prozeß, sein Wirkungsgrad ist somit noch geringer.

Die realen Wirkungsgrade von Kohlekraftwerken liegen weltweit durchschnittlich bei ca. 20%. Die deutschen Kraftwerke liegen bei ca. 38%.

Im Kohlekraftwerk finden mehrere Energiewandlungen statt, die jeweils mit Verlusten behaftet sind. Zudem geht Energie durch Reibung und Wärmeverluste verloren.

<sup>1)</sup> Kreisprozesse sind Vorgänge, bei denen kontinuierlich Wärme in Arbeit (z.B. Verbrennungsmotor) bzw. Arbeit in Wärme (z.B. Kühlschrank) umgewandelt wird.

<sup>2)</sup> CARNOT, Nicolas Léonard Sadi (1796 – 1832), französischer Physiker und Militäringenieur, berechnete Wärmemaschinen, legte Grundlagen zum 2. Hauptsatz der Thermodynamik, „Vater der Thermodynamik“

<sup>3)</sup> Der Carnot-Kreisprozeß ist der Kreisprozeß mit dem größtmöglichen Wirkungsgrad.



Im **Energiefluss (Sankey-) diagramm** (Abb.9) sind verschiedene Verluste dargestellt.

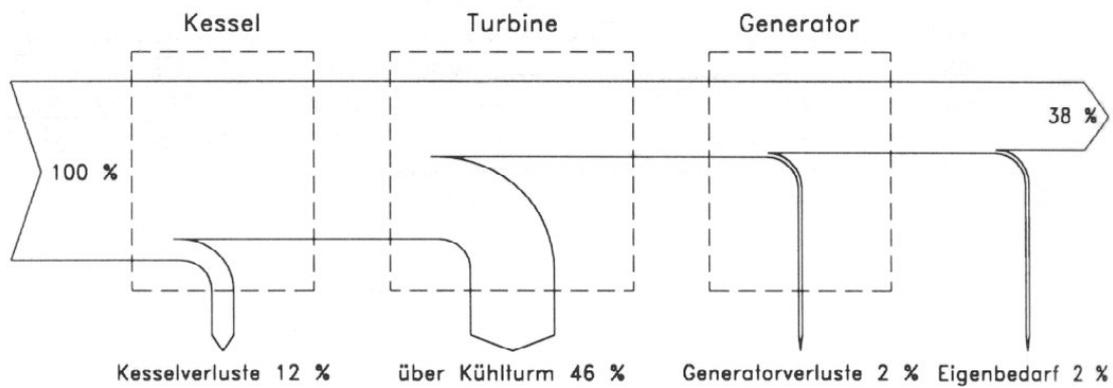


Abb.9: Energieflussdiagramm (Quelle: Schubert: Energie/ H+T)

Die Kesselverluste ergeben sich teilweise durch die hohen Temperaturen bei der Feuerung (Wärmeleitung und Strahlungswärme des Kessels), hauptsächlich jedoch durch die Wärmeenergie der heißen Abgase.

Die Verluste am Kühlturm entsprechen der **Kondensationswärme** des Speisewassers.

Darüber hinaus wird bereits beim Transport der Kohle zum Kraftwerk Energie verwendet.

Zusätzlich ist der Transport der elektrischen Energie bis zum Endverbraucher mit Verlusten von 8% bis 10% behaftet.

Entsprechend kommt letztendlich nur ein kleiner Teil der Energie, die in dem fossilen Brennstoff Kohle chemisch gebunden war, als elektrische Energie beim Verbraucher an.

## 3 Kernkraftwerke

### 3.1 Kernbrennstoffe

In Analogie zu der herkömmlichen Verbrennung, beispielsweise der von Kohle, bezeichnet man auch das im Kernreaktor eingesetzte Spaltmaterial als **Kernbrennstoff**, obwohl keine Verbrennung, sondern eine **Kernspaltung** stattfindet. Als Kernbrennstoff eignen sich nur schwere Kerne ( $A > 200$ ) mit ungerader Massenzahl. Zudem dürfen keine Begleitstoffe enthalten sein, die Neutronen einfangen.

Von den in der Natur vorkommenden Kernbrennstoffen hat bislang nur das Uranisotop  $^{235}\text{U}$  (Abb.9) größere praktische Bedeutung bei der Energiegewinnung durch Kernspaltung erlangt. Natürlich vorkommendes Uran besteht aber nur zu etwa 0,7% aus dem mit **thermischen Neutronen spaltbaren U 235** und zu 99,3 % aus dem praktisch nicht spaltbaren U 238.



Abb.9: Uran

Das Schwermetall Uran ist ziemlich gleichmäßig über die Kontinente verteilt und es ist keineswegs ein seltenes Metall; es kommt allerdings meist nur in sehr geringen Konzentrationen vor, so daß sich oft die Frage nach einer wirtschaftlichen Gewinnung des Urans stellt. Die untere Grenze des noch wirtschaftlichen Abbaus liegt bei ca. 0,1 % Urangehalt im Erz. Einen Eindruck

von dem erforderlichen Aufwand kann man dadurch bekommen, wenn man sich überlegt, dass man bei obigem Grenzwert 1 t Erz fördern muss, um 1 kg Natururan zu erhalten. Darin ist aber nur zu 0,7 % das spaltbare Isotop U 235 enthalten, d h. aus **1 t Ausgangsmaterial** erhält man ganze **7 g Spaltstoff**. Das relativiert natürlich auch die Aussage über die theoretisch hohe Energiedichte der Kernenergie.

Grundsätzlich handelt es sich auch beim Uran um einen erschöpflichen Rohstoff. Aussagen über die Reichweite sind kaum möglich, da sie in starkem Maße vom Ausbaugrad der Kernenergie, von den Gewinnungskosten und von der Nutzung der Brütertechnologie abhängt. Legt man die derzeitigen sicheren Vorräte mit einem Urangehalt von mindestens 0,3 % und einen gleich bleibenden Verbrauch zugrunde, so erhält man eine Reichweite von ca. 50 Jahren. Da der Ausbau der Kernkraft stagniert, ist mit einer Verknappung des Urans derzeit nicht zu rechnen.

Zwar wäre es grundsätzlich möglich, Kernreaktoren mit Natururan (99,3 % U 238 und 0,7 % U 235) zu betreiben, jedoch müssten dazu aufwendige Reaktoren eingesetzt werden, die große Mengen von Uran enthalten. Zudem müßte die Moderation mit schwerem Wasser oder Grafit erfolgen, da diese Stoffe eine wesentlich geringere Neigung zum Neutroneneinfang haben als normales Wasser. Nur mit diesem erhöhten Aufwand ließe sich eine Kettenreaktion im Natururan aufrechterhalten.



Bei der Energiegewinnung durch Kernspaltung ist es deshalb üblich, das gewonnene Natururan **anzureichern**. Darunter versteht man, dass die Konzentration des U 235 im Kernbrennstoff auf 2,5 bis 4 % erhöht wird. In einer ersten Anreicherungsstufe am Erzlagerort entsteht pulverförmiges „Yellowcake“ (Abb.10), ein Gemisch von Uranverbindungen. Aus zwei Tonnen Erz enthält man einen Kilogramm Yellowcake.

Es gibt verschiedene Anreicherungstechniken, die letztlich alle darauf beruhen, daß das U 235-Isotop ca. 1 % leichter ist als das U 238-Isotop. Der zur Anreicherung erforderliche Aufwand ist aufgrund des geringen Massenunterschieds der beiden Isotope technisch anspruchsvoll und energetisch hoch.

Abb.10: Yellowcake

Das angereicherte Uran wird in pulverförmiges **Urandioxid** umgewandelt. Daraus werden **Brennstofftabletten** (Pellets) (Abb.11) gepresst.



Abb.11: Brennstofftablette

Die Brennstofftabletten (Pellets) werden in ein Hüllrohr aus einer Speziallegierung gegeben, das gasdicht verschlossen ist. Man spricht von einem **Brennstab** (Abb.12).

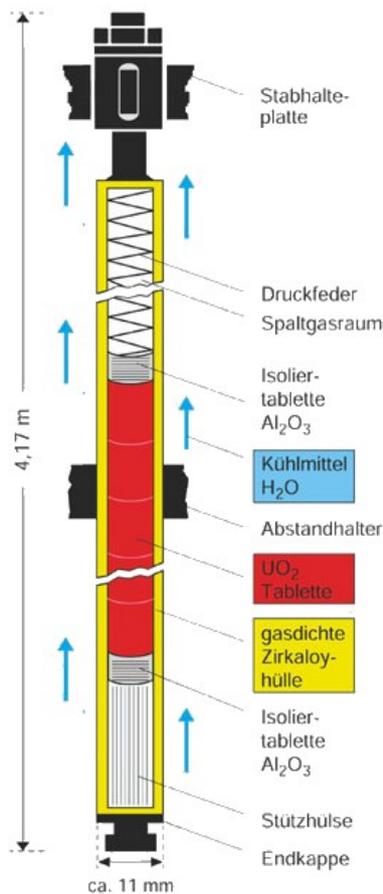


Abb.12: Brennstab

In den Brennstäben läuft die kontrollierte Kettenreaktion ab, sie enthalten also zunächst das angereicherte Uran und später die stark radioaktiven Spaltprodukte. Zudem muß von der Oberfläche der Brennstäbe die erzeugte Wärmeenergie an das Kühlmittel abgeführt werden.

Kühlmittel und Brennstäbe dürfen nicht in unmittelbaren Kontakt kommen, um die Kontamination des Kühlmittels so gering wie möglich zu halten.

Im Brennstab sind leere Räume enthalten, welche die bei der Spaltung entstehenden radioaktiven Spaltgase aufnehmen können.

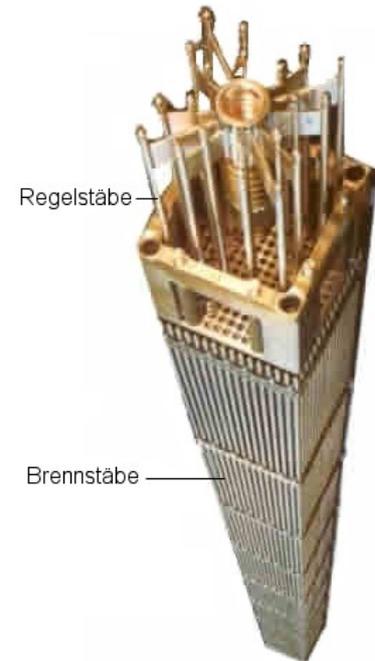


Abb.13: Brennelement

Eine Vielzahl solcher Brennstäbe wird mittels Abstandhalter zu einem Bündel, das man **Brennelement** (Abb.13) nennt, zusammengefaßt.

### 3.2 Kernkraftwerke mit Leichtwasserreaktoren

Die Stromerzeugung durch Kernenergie erfolgt weltweit hauptsächlich in sogenannten Leichtwasserreaktoren (LWR)(Abb.14).

Diese Bezeichnung rührt daher, daß als **Moderator leichtes Wasser** verwendet wird.



Abb.14: Kernkraftwerk „Three Mile Island“ (800 MW) bei Harrisburg/USA

Der Kernreaktor besteht aus dem **Reaktordruckbehälter** (Abb.15 und 17), der die Einbauten des **Reaktorkerns** (uranhaltige **Brennelemente und Regelstäbe**) (Abb.16) enthält.

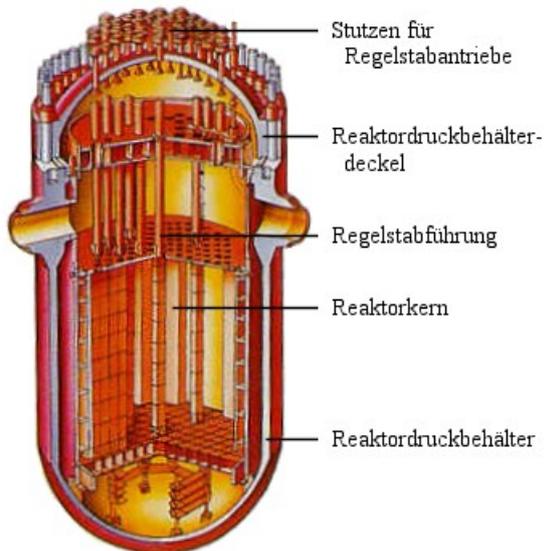


Abb.15: Reaktordruckbehälter (eines Druckwasserreaktors) mit Reaktorkern

Die Einbauten des Reaktorkerns bestehen aus den bereits beschriebenen Brennelementen und den Regelstäben

Je weiter die Regelstäbe in den Kern hineingeschoben werden, umso mehr Neutronen fangen sie ein.

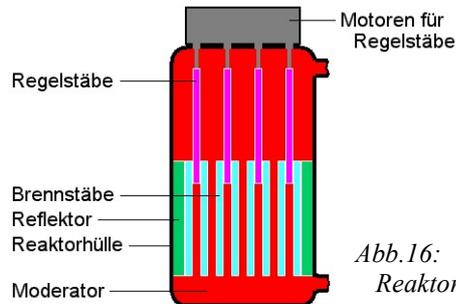
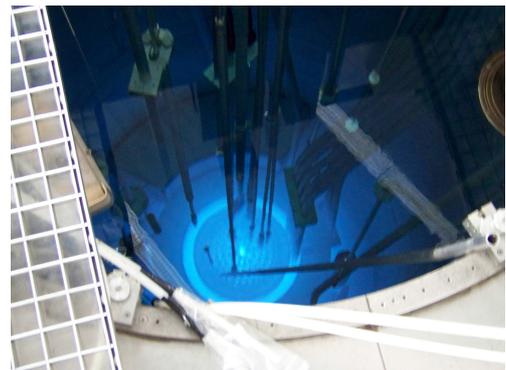


Abb.16: Einbauten im Reaktorkern

Bei den Leichtwasserreaktoren hat das **Wasser** eine **Doppelfunktion**:

- Zum einen dient es als **Kühlmittel**, das die bei der Spaltung freigesetzte Wärme aus dem Reaktorkern heraustransportiert.
- Zum anderen ist das Wasser der **Moderator**, der die schnellen Spaltneutronen durch ca. 20 Stöße zu thermischen Neutronen abbremst, so daß sie anschließend einen U-235-Kern spalten können. Diese Doppelfunktion ist ein wesentlicher Vorteil der Leichtwasserreaktoren, sie führt zu besonders einfach aufgebauten Reaktoren.

Abb.17: Blick in den Reaktordruckbehälter



**Leichtwasserreaktoren sind zudem selbststabilisierend**: Eine erhöhte Spaltaktivität bewirkt eine höhere Wärmeproduktion, wodurch die Temperatur des Wassers steigt. Dadurch nimmt seine Dichte ab, es sind weniger Moderatorkerne pro Volumeneinheit vorhanden, so daß die Moderatorwirkung abnimmt. Weniger thermische Neutronen bedeuten aber weniger Spaltungen, wodurch die Energiefreisetzung reduziert wird.

Wenn durch ein Leck im Kühlsystem das Kühlwasser ausdampfen sollte, reißt die Kettenreaktion sofort ab, weil kein Moderator mehr vorhanden ist. Ein Durchgehen eines Leichtwasserreaktors im Sinne einer unkontrollierten Kettenreaktion (wie bei einer Atombombe) ist physikalisch nicht möglich.

Allerdings besteht hier die Gefahr eines GAU's, siehe hierzu den Abschnitt „3.4.2 Beherrschung von Störfällen“.

Bei den Leichtwasserreaktoren sind **zwei unterschiedliche Reaktorlinien** in Betrieb, und zwar **Siedwasserreaktoren und Druckwasserreaktoren**.

### 3.2.1 Siedewasserreaktoren

Kernkraftwerke mit Siedewasserreaktoren (SWR) sind ähnlich aufgebaut (Abb.18) wie konventionelle Dampfkraftwerke, beispielsweise wie Kohlekraftwerke. Die Dampferzeugung erfolgt allerdings hier im Kernreaktor selbst, der zu etwa 2/3 mit Wasser gefüllt ist.

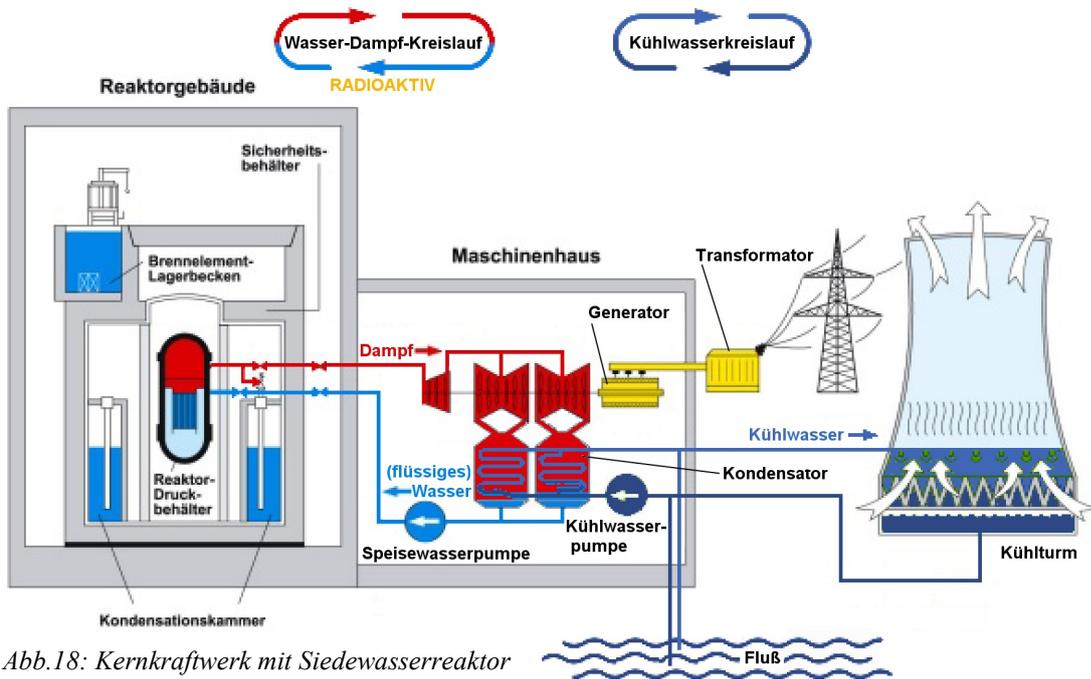


Abb.18: Kernkraftwerk mit Siedewasserreaktor

Die in den Brennelementen erzeugte Wärme bringt das Wasser im Reaktor zum Sieden. Der dadurch entstehende Wasserdampf wird nach Trocknung direkt zur Turbine geführt. Das nach der Turbine kondensierte Wasser wird mit Hilfe von Pumpen in das Reaktor Druckgefäß zurückgepumpt.

Beim Siedewasserreaktor ist im Unterschied zum Druckwasserreaktor **nur ein Wasser /Dampfkreis** vorhanden. Da im Reaktorkern eine radioaktive Kontamination des Wassers bzw. des Dampfes entsteht, müssen alle Komponenten des Dampfkreislaufes einschließlich der Turbinen in die Strahlenschutzmaßnahmen einbezogen werden. Aus diesem Grunde benötigt beim Siedewasserreaktor auch das Maschinenhaus eine sichere Abschirmung.

### 3.2.2 Druckwasserreaktoren

Kernkraftwerke mit Druckwasserreaktor (Abb.19 und 26) (DWR) besitzen **zwei Kreisläufe**. Der erste Kreislauf, der Primärkreislauf, transportiert die Wärme aus dem Reaktor, ohne daß das Wasser in diesem Kreislauf siedet. Das ist möglich, weil das Wasser unter entsprechend hohem Druck steht.

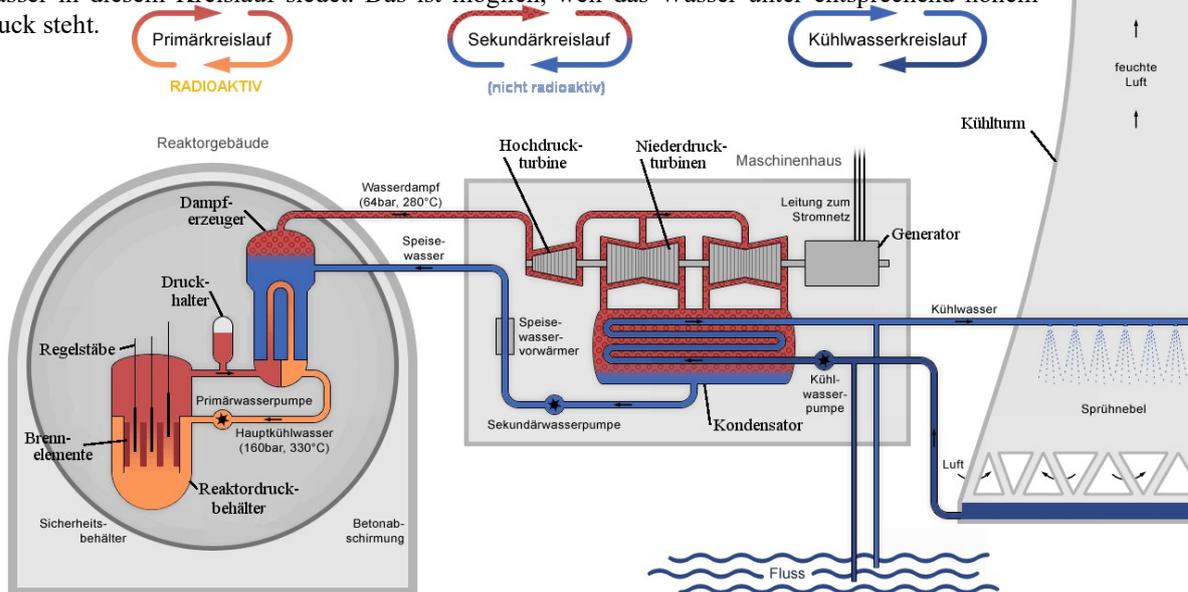


Abb.19: Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor

Die Wärme wird über einen Wärmetauscher an einen Sekundärkreis mit Dampferzeuger abgegeben. Dieser Sekundärkreis schließlich enthält die Turbine. Das hat den Vorteil, daß durch die zwei getrennten Kreisläufe der Sekundärkreislauf keine radioaktiven Verunreinigungen enthält, weshalb auch keine Abschirmungen zum Strahlenschutz im Sekundärkreislauf erforderlich sind. Freilich ist ein höherer Aufwand für die zwei Kreisläufe nötig, zudem ist dadurch der Wirkungsgrad etwas geringer.

### 3.3 Kernkraftwerke mit Brüter

Kernkraftwerke mit Brütertechnologie sind Kernkraftwerke, die mehr spaltbares Material erzeugen als sie verbrauchen. Hierbei führt die Absorption von schnellen Neutronen an U 238-Kernen zur Bildung von spaltbaren Plutonium-Kernen Pu 239. Wegen der schnellen Neutronen und dem Erzeugen von neuen Stoffen spricht man von „schnellen Brüttern“.

Diese Absorptionen finden auch ab und zu in Leichtwasserreaktoren statt. Die erbrüteten Plutonium-Kerne werden dann in der Folge gespalten oder verbleiben im Brennstab.

Kernkraftwerke, die ausschließlich mit Brütern arbeiten, sind technologisch und sicherheitstechnisch aufwendig, da die frei werdenden Neutronen nicht moderiert werden dürfen. An Stelle von Wasser als Kühlmittel wird flüssiges Natrium verwendet.

Des Weiteren ist das erbrütete Plutonium ein sehr gefährlicher Stoff. Es ist giftig und das Einatmen von nur sehr geringen Mengen erhöht das Risiko für Lungenkrebs deutlich. Außerdem ist es waffenfähig, seine kritische Masse zur Herstellung einer Atombombe ist dabei kleiner als die von Uran U 235.



Abb.20: Aufruf zur Demonstration

Aus diesen Gründen hat sich in Deutschland die Bevölkerung sehr stark gegen den Bau eines Brüters gewehrt (Abb.20). Das bereits fertig gestellte Kernkraftwerk in Kalkar wurde letztendlich nie in Betrieb genommen und dient heute als Hotel-/Tagungszentrum und Freizeitpark (Abb.21).



Abb.21: Freizeitpark Kalkar

### 3.4 Sicherheit von Kernkraftwerken

Kernkraftwerke enthalten nach einiger Betriebszeit im Reaktorkern eine erhebliche Menge verschiedener radioaktiver Spaltprodukte und giftiger Schwermetalle. Welche Katastrophe entsteht, wenn große Mengen dieses Materials in die Umwelt gelangen, hat das Reaktorunglück von Tschernobyl (Abb.22) gezeigt. Selbst in Deutschland, über 1000 km Luftlinie entfernt, waren die Auswirkungen noch messbar und sorgten für erhebliche Verunsicherung in der Bevölkerung. Wesentlich gravierendere Folgen hatte das Unglück für die Bevölkerung in der Nähe des Kraftwerks und erst recht für das Kraftwerkspersonal.

Es wurden über 100 000 Personen evakuiert. Erhöhte Krebsraten und Missbildungen bei Neugeborenen sind die Folge. Selbst auf spätere Generationen wird sich diese Katastrophe durch genetische Veränderungen noch auswirken. Umsiedlungen der Anwohner in andere Gegenden mussten im großen Stile durchgeführt werden. Eine 30-km-Sperrzone ist errichtet worden. Freigesetzt wurden die typischen radioaktiven Spaltprodukte, die sich während des Betriebs eines Kernreaktors ansammeln, wie die Isotope Jod,

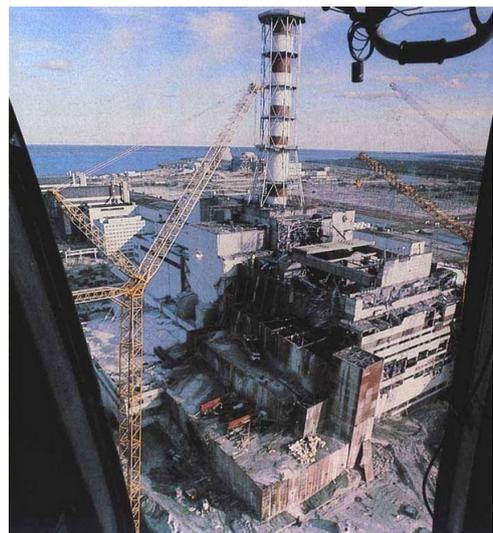


Abb.22: Unfall in Tschernobyl 1986

Cäsium, Barium, Strontium, Plutonium usw. Da manche der freigesetzten, radioaktiven Spaltstoffe lange Halbwertszeiten haben, wird dieses Gebiet für viele Generationen radioaktiv verseucht bleiben.

Es muss angemerkt werden, daß es sich beim Unglücksreaktor um einen anderen Reaktortyp handelt als die in Deutschland ausschließlich betriebenen Leichtwasserreaktoren. Hier wurde als Moderator Graphit verwendet. Da die Kettenreaktion nicht gestoppt werden konnte, führte die Energieerzeugung im Reaktor letztendlich zur Kernschmelze, wobei das Graphit dann brannte und Rauchgase mit radioaktiven Partikeln in große Höhen gelangten.

Nach Aussagen von Sicherheitsexperten ist ein solcher Unfall bei deutschen Kernkraftwerken ausgeschlossen.

Nichtsdestoweniger sind die radioaktiven Stoffe, die ein Reaktor in Deutschland beherbergt, die gleichen wie die des Unglücksreaktors von Tschernobyl. Weiterhin muß man bedenken daß in einem Kernkraftwerk je Megawatt Leistung jährlich die gleiche Menge an Radioaktivität freigesetzt wird wie bei der Hiroshima-Bombe. Ein wesentlicher Sicherheitsaspekt der Kraftwerkstechnik ist deshalb der **sichere Einschluss** des radioaktiven Materials, das unter keinen denkbaren Umständen in die Umwelt gelangen darf.

### 3.4.1 Barrierenkonzept

Um diesen sicheren Einschluss auch im ungünstigsten Fall gewährleisten zu können, sind mehrere Barrieren zwischen den radioaktiven Stoffen und der Umwelt errichtet, so daß diese Stoffe auch dann zurückgehalten werden, wenn einzelne Barrieren versagen sollten. Man unterscheidet sechs Barrieren (Abb.23 und 24).

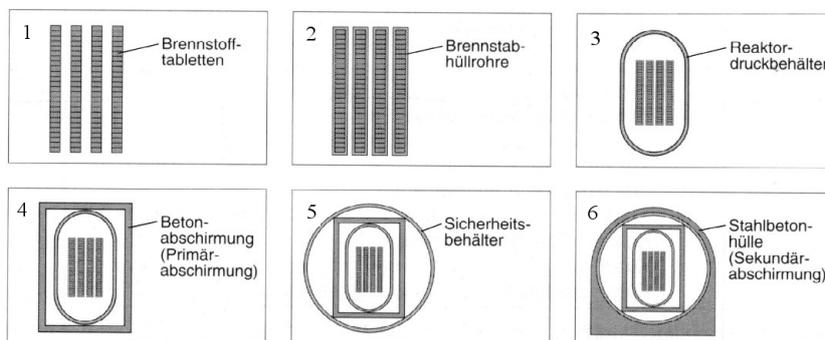
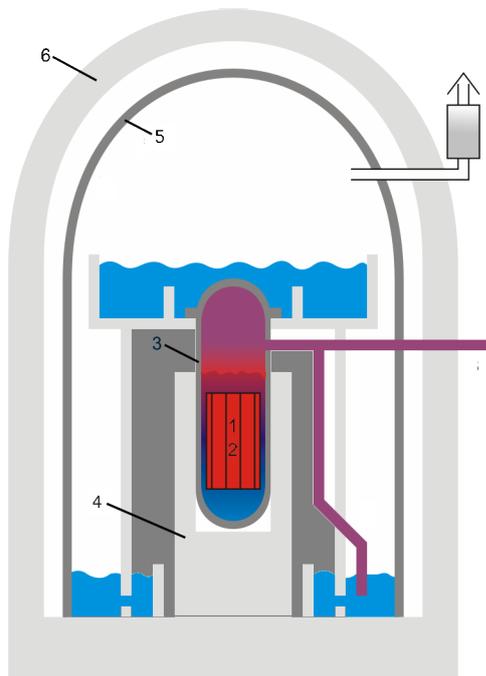


Abb.23: Sicherheitsbarrieren



1. Das **Kristallgitter des Brennstoffs** Uranoxid verhindert bereits ein Austreten der Spaltprodukte.
2. Die **Hüllrohre der Brennstäbe** aus 0,6 mm starkem Zirkaloy umschließen den Brennstoff gasdicht.
3. Der **Reaktordruckbehälter** aus 20 cm dickem Stahl enthält den **Reaktorkern** (uranhaltige Brennelemente und Regelstäbe).
4. Der **biologische Schild** (Primärabschirmung) (Abb.25), ein Betonfundament in dem der Reaktordruckbehälter sitzt.
5. Der **Sicherheitsbehälter** (Containment), ein 3 bis 4 cm dicker Stahlbehälter, der den Reaktordruckbehälter und die unmittelbar daran angeschlossenen Teile des Kühlkreislaufes umschließt. Er ist ausgelegt für einen Druck von 6,3 bar und Temperatur von 145°C.
6. Die **Stahlbetonhülle** (Sekundärabschirmung), das eigentliche Reaktorgebäude, das aus 1,2 bis 2 m dickem Stahlbeton gebaut ist.

Abb.24: Sicherheit



Abb.25: Biologisches Schild (beim Abbau einer Anlage)

Während des ungestörten Betriebes werden von Kernkraftwerken (Abb.26) kontrolliert geringe Mengen radioaktiver Isotope über Abluft und Abwasser abgegeben.

Den größten Anteil der abgegebenen Radioaktivität macht Krypton-85 aus, das über die Abluft emittiert wird.

Iod 131 wird über Abluft und Abwasser freigesetzt.

Tritium gelangt vorwiegend mit dem Abwasser in die Umgebung.

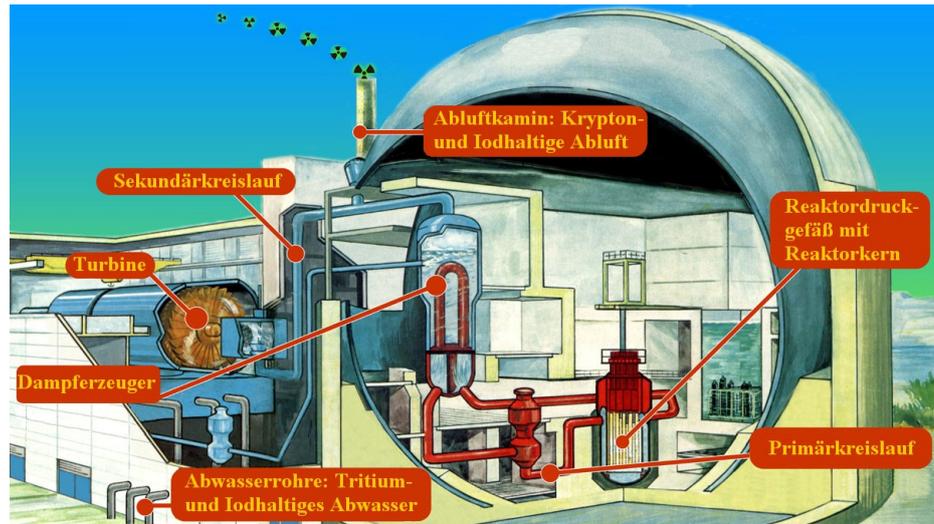


Abb.26: Bauteile und Emissionen von Kernkraftwerken (am Beispiel DWR)

Diese Abgaben müssen unter den gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerten liegen, sie werden staatlich überwacht.

Im Vergleich zu der natürlichen und künstlichen radioaktiven Strahlenbelastung sind die Emissionen aus Kernkraftwerken gering.

### 3.4.2 Beherrschung von Störfällen

Während herkömmliche Technik auch dadurch in der Sicherheit optimiert wird, indem man aufgetretene Schadensfälle analysiert und daraus neue Erkenntnisse gewinnt, ist ein solches Vorgehen bei der Kerntechnik nicht möglich. Hier muß von vornherein dafür gesorgt werden, dass Störungen, die sich trotz aller Vorsorge nicht völlig ausschließen lassen, sicher beherrscht werden können.

Nachdem eine nukleare Explosion bei Leichtwasserreaktoren aus physikalischen Gründen ausgeschlossen ist, gilt als **größter anzunehmender Unfall (GAU)** eines Leichtwasserreaktors der **Kühlmittelverlust im Primärkreislauf**. Dieser könnte beispielsweise durch einen Rohrbruch im Kühlmittelkreislauf entstehen, so daß das Wasser ausdampft. Zwar kämen damit auch die Kettenreaktion und weitere Kernspaltungen zum Erliegen, jedoch produzieren die radioaktiven Spaltstoffe so viel Nachwärme, daß der Reaktorkern sich immer weiter aufheizen und schließlich schmelzen (Kernschmelze) würde, wenn diese Nachwärme nicht abgeführt werden kann. Im schlimmsten Fall würde die Kernschmelze die Barrieren überwinden und die radioaktiven Spaltstoffe nach außen gelangen.

Die Sicherheitsmaßnahmen, die ergriffen werden, um die Eintrittswahrscheinlichkeit eines GAUs möglichst gering zu machen, werden auch bei anderen sicherheitssensiblen Bereichen angewandt. Es sind dies:

#### Redundanz

Wichtige Systeme (z.B. Pumpen oder Ventile) sind mehrfach vorhanden. Es steht auch dann noch ein System bereit, wenn eines ausfällt und das andere gerade in Reparatur ist. Diese Methode verwendet man auch in anderen Technikbereichen, so haben Autos Zweikreisbremssysteme. Die Wahrscheinlichkeit, dass zwei Systeme oder noch mehr gleichzeitig versagen, ist wesentlich geringer als die Versagenswahrscheinlichkeit eines Systems.

#### Diversität

Die mehrfach vorhandenen Systeme werden mit unterschiedlichen Funktionsweisen versehen (z. B. elektrisch, mechanisch). Fällt die Stromversorgung aus, so würde es nichts nützen, doppelt ausgelegte elektrisch betriebene Kühlmittelpumpen zur Verfügung zu haben.

#### Räumliche Trennung

Wichtige Sicherheitssysteme werden in Kernkraftwerken räumlich getrennt ausgeführt. Dies verhindert, dass bei Störfällen wie z.B. einem Brand, einer Explosion oder einem Flugzeugabsturz alle Sicherheitssysteme zugleich beschädigt werden.

### Fail-safe

Dieses Prinzip bedeutet daß die Systeme bei Fehlern immer auf Nummer sicher gehen: kein Zögern, keine Risiken. So wird beispielsweise im Falle eines Stromausfalls (Abb.27) automatisch eine Hydraulik wirksam, die die Regelstäbe in den Reaktor einfährt. Dadurch wird die Kettenreaktion unterbrochen.

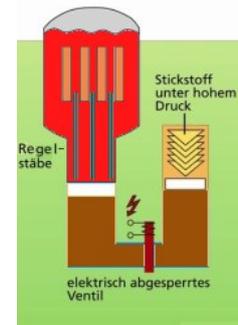


Abb.27: Beispiel Fail-safe-Prinzip

Damit sind nur die wichtigsten Punkte der Sicherheitskonzeption in deutschen Kernkraftwerken angesprochen. Es wurden ausführliche Sicherheitsstudien und Störfallsimulationen durchgeführt, um die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines großen Störfalls zu minimieren.

Insgesamt gilt die Technik der Leichtwasserreaktoren als ausgereift und sicher.

Absolute Sicherheit ist prinzipiell nicht möglich.

## 3.5 Entsorgung

Die Versorgung von Kernkraftwerken mit Kernbrennstoffen, die von der bergmännischen Gewinnung über die Aufbereitung des Uranerzes und die Anreicherung des Natururans bis zur Brennelementeherstellung reicht, ist weiter oben kurz skizziert worden. Dieser Versorgung steht die Entsorgung gegenüber. Darunter versteht man alle Maßnahmen, die zur Aufbewahrung der aus gedienten Brennelemente und der radioaktiven Abfallstoffe ergriffen werden.

Die während des Betriebes eines Reaktors entstehenden Spaltprodukte wirken zum Teil als starke Neutronenabsorber; man nennt sie, wie weiter oben bereits ausgeführt, Reaktorgifte. Deshalb müssen die Brennelemente bereits ausgewechselt werden, wenn noch spaltbares U 235 enthalten ist. Zusätzlich ist in den Brennstäben weiteres spaltbares Material vorhanden, nämlich das durch Brutreaktionen entstandene Pu 239. Man bezeichnet die zur Auswechslung anstehenden Brennelemente in Anlehnung an konventionellen Brennstoff als abgebrannt.

Bei einem LWR mit 1000 MW elektrischer Leistung fallen pro Jahr ca. 20 t abgebrannter Brennelemente an, die entsorgt werden müssen. Diese hochradioaktiven Brennelemente enthalten viele radioaktive Spaltprodukte mit kurzer Halbwertszeit. Deshalb werden sie nach der Entnahme aus dem Reaktorkern zunächst in einem mit Wasser gefüllten Abklingbecken längere Zeit im Kernkraftwerk zwischengelagert. In dieser Zeit nimmt die Radioaktivität ab, die langlebigen radioaktiven Substanzen bleiben natürlich erhalten. Die radioaktiven Stoffe produzieren Wärme, die abgeführt werden muß.

### 3.5.1 Wiederaufarbeitung

Da die abgebrannten Brennelemente einen höheren Anteil spaltbaren Materials enthalten als beispielsweise Natururan, liegt der Gedanke nahe, die Brennelemente nicht sofort endzulagern, sondern die enthaltenen Spaltstoffe wieder zu verwenden. Die oben dargestellte Brütertechnologie macht überhaupt nur Sinn, wenn die erbrüteten Spaltstoffe in anderen Reaktoren wiederverwendet werden. Der Prozess, der aus den abgebrannten Brennelementen die Spaltstoffe extrahiert und sie wieder der Brennelementeherstellung zugänglich macht, wird als Wiederaufarbeitung bezeichnet.

Wiederaufarbeitungsanlagen (WAA) arbeiten mit dem so genannten PUREX-Verfahren. (PUREX = Plutonium-Uranium-Recovery by Extraction). Bei diesem Verfahren erfolgt die Wiederaufarbeitung in drei Prozessschritten:

1. Die Brennelemente werden in ca. 5 cm lange Teile zersägt und in konzentrierte Salpetersäure gegeben. Dadurch gehen die Inhalte der Brennstäbe in Lösung, während die Legierung der Hüllrohre erhalten bleibt.
2. Uran und Plutonium werden von den in der Lösung verbleibenden Spaltprodukten getrennt. Die hochradioaktiven Spaltprodukte werden verfestigt, in Glas eingeschmolzen und in dicht schließende Edelstahlzylinder eingeschlossen, die mittlerradioaktiven mit Beton ummantelt.
3. Das extrahierte Uran und Plutonium werden getrennt und so aufbereitet, daß sie in der Brennelementefertigung weiterverarbeitet werden kann.

Die Wiederaufarbeitung ist chemische Verfahrenstechnik mit konzentrierten Säuren, wie sie auch in der Großchemie angewandt wird, hinzu kommt allerdings, daß es sich um hochradioaktive Stoffe handelt; man spricht deshalb auch von heißer Chemie. WAA sind ebenso wie schnelle Brüter im militärischen Bereich seit langer Zeit

in Betrieb. Frankreich und England betreiben die zivile Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente in großem Stil, in diesen Ländern lassen auch deutsche Kernkraftwerksbetreiber Brennelemente wiederaufarbeiten.

Die sogenannten Castor-Transporte (von Brennelementen) zwischen La Hague und dem Zwischenlager Gorleben werden immer von heftigen Demonstrationen (Abb.28) seitens der Atomkraftgegner begleitet.

Deutschland selbst hat sich aus der Wiederaufarbeitung verabschiedet. Zwar ist sie in einer Versuchsanlage in Karlsruhe erfolgreich erprobt worden. Der Bau der in Wackersdorf (Bayern) geplanten nationalen WAA ist jedoch nicht zuletzt wegen anhaltender massiver Proteste eingestellt worden.



Abb.28: Demo gegen den Transport von Brennelementen

Als Vorteile der Wiederaufarbeitung können angeführt werden:

- bessere Ausnutzung der Spaltstoffressourcen; es werden etwa 30 % neuer Spaltstoffe durch die Wiederaufarbeitung eingespart,
- Vernichtung des gefährlichen und langlebigen Plutoniums durch Spaltung.
- Komprimierung der endzulagernden hochradioaktiven Abfälle.

### 3.5.2 Endlagerung

Ob mit oder ohne Wiederaufarbeitung: Bei der friedlichen Nutzung der Kernenergie bleiben hochradioaktive Stoffe zurück, die für viele Generationen (mehrere Jahrhunderte lang) absolut sicher aus der Biosphäre (gesamter Lebensraum, also Erde, Wasser und Luft) ferngehalten werden müssen; man nennt dies Endlagerung. Werden die Brennelemente ohne zwischengeschaltete Wiederaufarbeitung endgelagert, so spricht man von direkter Endlagerung.

Während schwach- und mittlerradioaktive Abfälle in Deutschland routinemäßig in stillgelegten Bergwerken eingelagert werden, ist die Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle erst in der Erprobung. Vorgesehen ist die Einlagerung in Salzstöcken, Ton- oder Granitformationen. Um die sichere Endlagerung für derart lange Zeiträume zu gewährleisten, müssen die Endlagerstätten eine Reihe von Anforderungen erfüllen:

- geologische Stabilität,
- keine Verbindung zum Grundwasser,
- ausreichende Tiefe,
- gute Wärmeleitfähigkeit.

Derzeit werden Salzstöcke für die Endlagerung des radioaktiven Atom mülls favorisiert, da sie die oben genannten Anforderungen am besten erfüllen: Die Salzstöcke sind seit vielen Millionen Jahren stabil, sie haben keine Verbindung zum Grundwasser und besitzen ausreichende Tiefe.

Da die hochradioaktiven Abfälle Wärme produzieren, muß diese Wärme abgeleitet werden, um Überhitzungen der Ummantelung zu vermeiden. Salzstöcke weisen eine gute Wärmeleitfähigkeit auf.

In Gorleben (Norddeutschland) wurden seit 1977 Untersuchungen zur Eignung von Salzstöcken als Endlager durchgeführt. Am 17. September 2021 wurde endgültig entschieden, dass diese nicht geeignet sind.

In Finnland ist seit 1992 das Endlager Olkiluoto für schwach- und mittlerradioaktive Abfälle in Betrieb. Es ist in granitem Gestein gebaut. Zurzeit wird dort ein Endlager für hochradioaktive Abfälle errichtet.

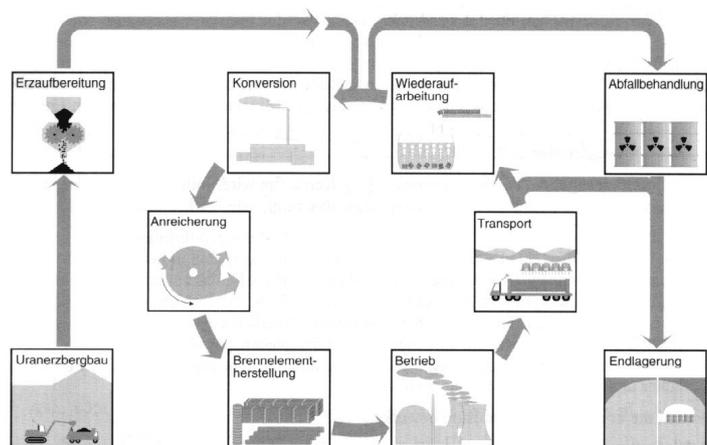


Abb.29: Nuklearer Brennstoffkreislauf

Obwohl es üblich ist, im Umgang mit nuklearen Brennstoffen von einem Brennstoffkreislauf (Abb.29) zu sprechen, muss angemerkt werden, daß es einen **Kreislauf** nur dann **ansatzweise** gibt, wenn Brennelemente wiederaufgearbeitet werden. Beim Weg der direkten Endlagerung ist keinerlei Kreislauf mehr vorhanden: Die Rohstoffe werden der Erde entnommen und die Abfallstoffe wieder in der Erde vergraben, eine Wiederverwendung im Sinne einer Kreislaufwirtschaft existiert ebenso wenig wie bei den fossilen Brennstoffen.