

Die Kernenergie



Ein
Referat
von

N. Lühmann, T. Petersen, H. Molsen und S. Balhorn

Klasse **10D**

1. DIE GESCHICHTE DER ATOMENERGIE	1
2. URAN	2
2.1 Der Abbau von Uran	3
2.2 Die Aufbereitung von Brennstoffen am Beispiel Uran	4
3. DAS KERNKRAFTWERK	5
3.1. Aufbau eines Atomkraftwerks:	5
3.2 Der Reaktor	6
3.2.1 Der Druckwasserreaktor	6
3.2.2 Der Siedewasserreaktor	6
3.2.3 Hochtemperaturreaktor	6
3.2.4 Schneller Brüter	6
3.2.5 RBMK-Reaktor	7
3.3 Das Kühlsystem	7
3.4. Die Generatoren	8
4. SICHERHEIT UND GEFAHREN	8
4.1 Sicherheit	8
5. AN- UND ABSCHALTEN EINES MEILERS	10
6. STATISTIKEN	10
7. DIE KERNSPALTUNG	11
8. DER TRANSPORT MIT EINEM CASTOR	16
9. DIE WIEDERAUFBEREITUNG	18
10. DIE ENDLAGERUNG	19
11. UNGLÜCKSFÄLLE	20
11.1 Tschernobyl	20
11.2 Three Mile Island	21
12. EIN VERGLEICH MIT EINEM KOHLEKRAFTWERK	22
13. QUELLEN:	23

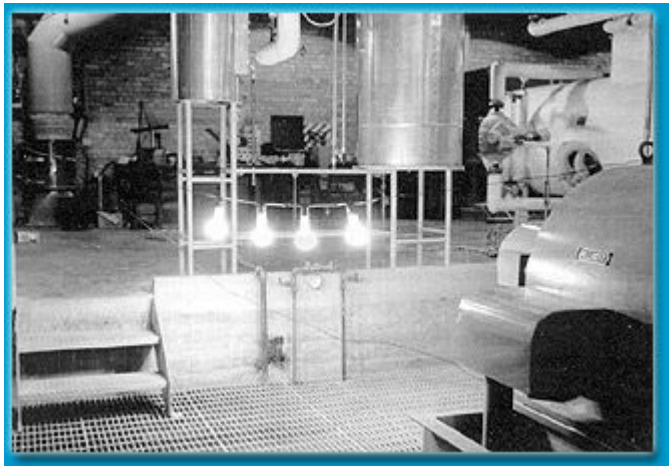
1. Die Geschichte der Atomenergie

Am 2. August 1939 schrieb Albert Einstein dem damaligen US-Präsidenten Roosevelt einen Brief, indem er erklärte, dass Deutschland vielleicht in der Lage sei eine Atombombe zu bauen. Daraufhin gründeten die Amerikaner im Juni 1941 das „Office of Scientific Research and Development“, das ein Jahr später zu dem so genannten „Manhattan Projekt“ erweitert wurde. Schon Anfang Dezember 1942 wurde in einem Chicagoer Labor die erste Kettenreaktion von Uran-235 beobachtet.

10 Größer Atomreaktoren wurden erst 1944 zur Gewinnung von Plutonium für den Bau von Atombomben errichtet. Der weltweit erste Brutreaktor wurde 1946 im Staat New-Mexico in den USA gebaut. Unter dem Namen „Clementine“ leistete er 25 kWh und diente 6 Jahre als Neutronenquelle in der Forschung. Die Brennelemente bestanden aus metallischem Plutonium und wurden durch Quecksilber gekühlt.

Das sowjetische Staatsoberhaupt Stalin erkannte erst 1945, vier Jahre nach einer Warnung von Georgij Fljorow, die Wichtigkeit der Atombombe und lies daraufhin ein eigenes, geheimes Projekt starten. Neben Fljorow arbeiten auch deutsche Spezialisten, wie Manfred von Ardenne, Alfred Recknagel, Max Steenbeck, Fritz Bernhard und Gustav Hertz, bis zum 23. September 1949 an einer sowjetischen Atombombe, die an diesem Datum fertig gestellt und getestet wurde.

20 Strom durch einen Brutreaktor wurde erstmals 1951 mithilfe eines schnellen Brütters, der von den Wissenschaftlern Enrico Fermi und Walther H. Zinn errichtet wurde, in Idaho (USA) gewonnen. Der Experimental Breeder Reactor I (EBR-I, davor auch Chicago Pile 4 genannt) erleuchtete am 20. Dezember vier Glühlampen. Später lieferte auch für das ganze Gebäude und daraufhin die gesamte Kleinstadt Arco (Idaho) den benötigten Strom.



30 In der sowjetischen Stadt Obninsk wurde am 27. Juni 1954 das erste Atomkraftwerk in Betrieb genommen. Es blieb fast zehn Jahre lang das einzige sowjetische Kernkraftwerk. Durch die erlangte staatliche Souveränität Deutschlands war es der Bundesrepublik 1955 möglich selber Forschungen im Bereich der Atomenergie zu tätigen. In Bonn wurde ein Bundesministerium für Atomfragen gebildet.

In England ging 1956 das erste industrielle genutzte Atomkraftwerk in Betrieb, noch im selben Jahr ließ sich der sowjetische Parteichef Chruschtschow von dem russischen

Kernphysiker Igor Kurtschatow überzeugen weitere Kernkraftwerke bauen zu lassen. Es entstanden vor allem in weniger dicht besiedelten Gegenden, wie Sibirien, Atomstädte.

Durch die steigende Zahl der verbrauchten Radioaktiven Materialien schlugen die Siemens-Schuckert-Werke 1958 die Lagerung des anfallenden Atommülls „in offenen Gräben und Löchern“ vor.

Igor Tamm und Andrej Sacharow entwarfen in den frühen sechziger Jahren den Prototypen des Tokamak, der ermutigende Ergebnisse lieferte.

1961 wurde das erste Atomkraftwerk der Bundesrepublik Deutschlands in Kahl am Main in Betrieb genommen. Es handelt sich hierbei um ein 15 MW-Versuchsatomkraftwerk mit einem Siedewasserreaktor aus der Linie der Leichtwasserreaktoren.

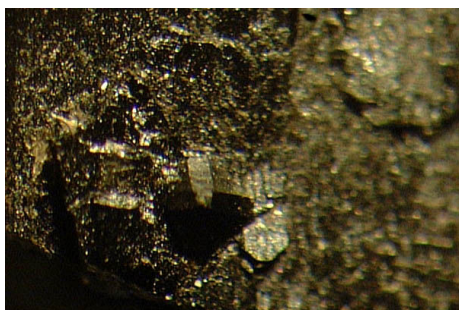
Schon 1965 wurde im Karlsruher Kernforschungszentrum die erste Kettenreaktion in einem deutschen Schwerwasser Reaktor (MZFR) dokumentiert. Im darauf folgenden Jahr in einem deutschen Hochtemperaturreaktor (HTR) mit der Bezeichnung AVR.

Im englischen JET - Laboratorium (Joint European Torus Laboratory) wurden 1991 1,7 Millionen Watt aus kontrollierter Kernfusion gewonnen. Doch schon im Jahre 1993 errichten Forscher an der Universität von Princeton mithilfe eines Tokamak - Fusionsversuchsreaktors 5,6 Millionen Watt.

Im Dezember 2001 plante Russland den Bau von vier Atomkraftwerken im Land selbst, weiterer in China, Iran und Indien. Die russische Atomindustrie soll ihre "Nach-Tschernobyl-Renaissance" erleben. Seit Mitte 2002 sind Weltweit sind 437 Atomreaktoren mit einer Leistung von etwa 370.000 Megawatt brutto in Betrieb - Tendenz steigend.

2. Uran

Uran ist das chemische Element mit der Ordnungszahl 92 und der Atommasse 238,0289.



Uranerz

Es gehört zu den Schwermetallen, besitzt eine Halbwertszeit von 703,8 Millionen Jahren und kommt in der Natur überwiegend als Erz mit unterschiedlichen Reinheitsgraden vor, dabei ist es als Erz schwarz und als Oxid gelb gefärbt. Durch chemische Reaktionen wird ein Urankonzentrat herausgefiltert, das in der Regel zu 0,7% aus Uran-

235 und zu 99,3% aus Uran 238 besteht. Für eine Stabile Kettenreaktion in Reaktoren muss der U235-Anteil mindestens 2% -5% betragen, was in den Konversionslagern durch Verbindung mit Fluor zu Uranhexafluorid oder UF_6 erreicht wird.



Das erste Atomkraftwerk wurde 1954 mitten während des Kalten Krieges in Betrieb genommen. Da Uran für die Großmächte jedoch eine größere Bedeutung für Waffen als für Atomkraftwerke hatte, war es bis zum Fall der Mauer für Kraftwerke kaum verfügbar, so kostete 1 Kilogramm Uran etwa 190€. Da nach Ende der DDR das Uran nicht mehr streng militärisch verwendet wurde, standen die riesigen

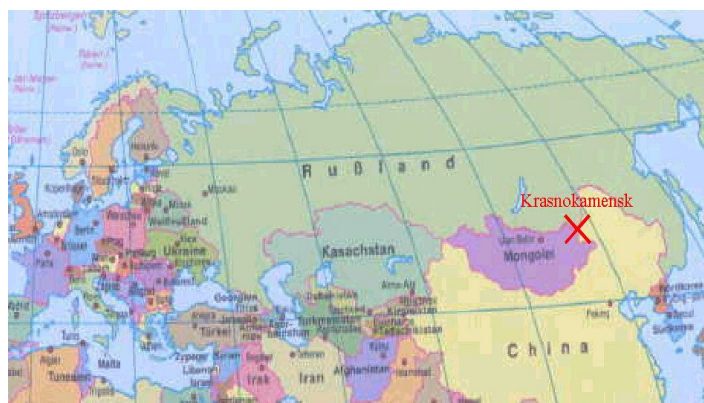
Militärbestände Russlands und Amerikas ab 1990 zur kommerziellen Verfügung und so fiel der Preis rapide auf 20€ pro Kilogramm. Durch diesen Preisverfall lohnte sich für viele Länder der Massenabbau nicht mehr und so wurde die Urangewinnung fast überall

20 *Uranoxid* zurückgefahren. Einige Länder wie Deutschland beendeten den Abbau ganz, bis dato wurde in Wismut bei Dresden das damals drittgrößte Uranbergwerk der Welt betrieben. Diese alten Lagerbestände der Großmächte sind seit 1994 jedoch aufgebraucht, was zur Folge hat, dass der Uranpreis wieder auf 40€ pro Kilogramm stieg und die Produktion wieder begann sich zu lohnen, so dass seit 1994 immer mehr Uranbergwerke gebaut werden.

2.1 Der Abbau von Uran

Die größten heutigen Abbaugelände liegen in Kanada und Australien, obwohl beide Länder das geförderte Uran nicht nutzen sondern ausschließlich exportieren, in Russland dagegen gibt es nur noch eine einzige Mine in Sibirien namens Krasnokamensk. Das Dorf wurde 1968 nach der dortigen Entdeckung von Uran gegründet und spezialisierte sich ausschließlich auf dessen Abbau.

40 Das Uranerz hat dort eine Urankonzentration von 0,2% was verhältnismäßig wenig erscheint, wenn man bedenkt, dass 1999 in Kanada Uranvorkommen mit einer



50 besonders viel Erz abgebaut werden um genügend Uran zu erhalten. Erz, das nicht verwendbar ist, weil es zu wenig Uran enthält, wird einfach aufgeschüttet und liegengelassen, was sich negativ auf die Umwelt auswirkt. Bei dem Abbau wird das mit unseren Sinnen nicht zu erfassende, aber sehr gefährliche Gas Radon freigesetzt. Es wird

zum Schutze der Minenarbeiter mit Ventilatoren aus den Bergwerken in die Natur gepumpt, was ebenfalls zu Umweltbelastungen führt.

Das abgebaute Erz wird gemahlen und es entstehen Gesteinsmehl, Uranoxid und wieder Radon. Das Uran wird durch eine chemische Reaktion aus dem Gesteinspulver herausgefiltert und kommt danach in die Aufbereitung. Nach dem Filtern bleibt jedoch ein Schlamm übrig, der aus radioaktivem Nickel, Arsen, Eisen, Aluminium und Sulfiden besteht und in großen Sammelbecken gelagert wird, bis er vertrocknet und der Wind den strahlenden Staub über die Landschaft verteilt. Dies ist zwar ein Problem bei allen Arten des Erzabbaus, bei Uranerz allerdings ein besonders ernstzunehmendes.

10 **2.2 Die Aufbereitung von Brennstoffen am Beispiel Uran**

Bei der Aufbereitung von Uranerz wird das Uran vom restlichen Gestein getrennt. Das geschieht durch physikalische und chemische Verfahren, die das Erz zerbrechen, fein mahlen und das Uran mit einer Säure oder Lauge herauslösen. So wird bis zu 90% Uran aus dem Erz gewonnen. Die Uran - Lösung enthält in diesem Stadium noch eine Reihe von Begleitstoffen, die durch verschiedene Reinigungsverfahren (Dekantieren, Filtern, Flüssigextraktion, Ionenaustausch usw.) entfernt werden. Zu diesem Zweck wird die Uran - Lösung in verschiedene chemische Zustände umgewandelt und anschließend getrocknet. So erhält man ein Konzentrat, das 70%-80% Uran enthält. Wegen seiner gelben Farbe hat es den Namen "Yellow Cake" erhalten.

20 Bei der Aufbereitung von Uran entsteht Uran-238. Uran-238 ist ein radioaktiver Alphastrahler und chemisch giftig. Gelangt es in den Körper, verursacht es bei hoher Dosis eine Schwermetallvergiftung, bei niedriger Dosis werden die Nieren beschädigt. Eingeatmete Isotope setzen das Lungengewebe der Strahlung aus, was zu einer Krebserkrankung führen kann.

3. Das Kernkraftwerk

Kernkraftwerk ist nicht gleich Kernkraftwerk, das Prinzip jedoch ist bei allen gleich. Durch Kernspaltung wird aus spaltbaren Kernen wie z.B. U235 Kernenergie zunächst in Wärme, dann in Druck und schließlich in Generatoren in Strom umgewandelt. Dabei verwendet man die Begriffe Primär-, Sekundär- und Nutzenergie. Die Primärenergie ist das Uran selbst, Die Sekundärenergie der daraus erzeugte elektrische Strom und die Nutzenergie das, wofür wir den Strom benutzen, z.B. Licht bei der Glühbirne, Bewegung beim Elektromotor, etc. Die Sekundärenergie fungiert hierbei also lediglich als „Transportmittel“ der Primärenergie zum Nutzer.

- 10 Bei Atomkraftwerken ist der Prinzipielle Aufbau immer gleich, zu unterscheiden sind allerdings vier verschiedene Reaktortypen, welche sozusagen das „Herz“ des AKWs darstellen.

Druckwasserreaktor (ähnlich: WWER)

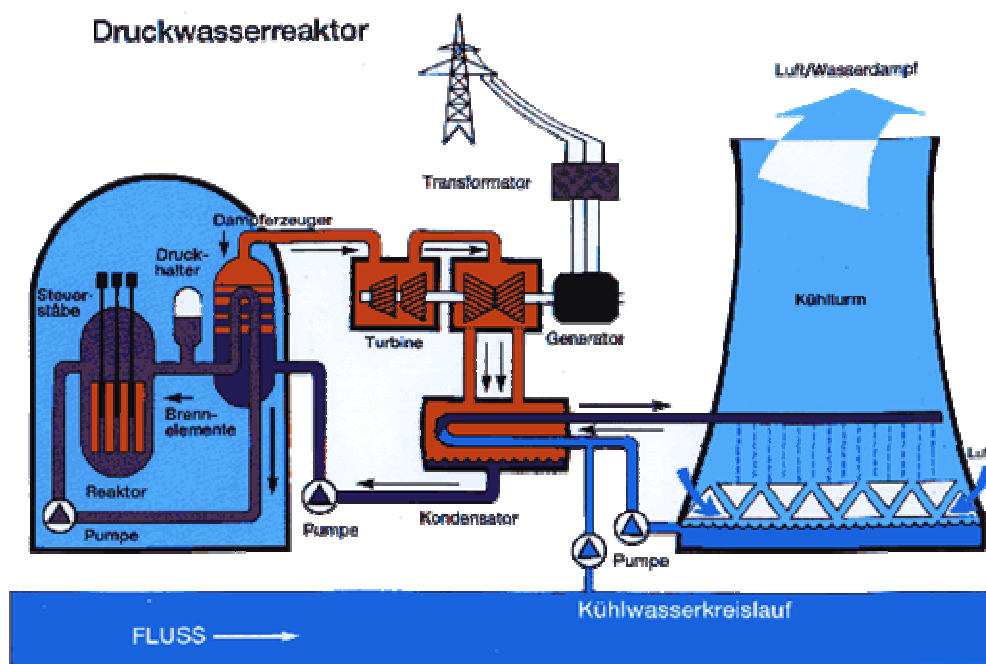
Siedewasserreaktor

Hochtemperaturreaktor

Schneller Brüter

RBMK (Reaktor Bolschoj Moschnostij Kanalnij)

3.1. Aufbau eines Atomkraftwerks:



- 20 Ein Reaktor besteht aus drei großen Bereichen: Dem Reaktor, Dem Kühlsystem und der Einheit, welche den Strom erzeugt.

3.2 Der Reaktor

3.2.1 Der Druckwasserreaktor

In einem Druckwasserreaktor (DWR) befinden sich zigtausend bleistiftdicke Brennstäbe, welche zur einfacheren Handhabung zu Brennelementen, bestehend aus 200-300 solcher Brennstäbe, zusammengefasst sind. In den Brennstäben läuft unter extremer Wärmeenergieabgabe eine Kettenreaktion ab, in der ein Uranatom mit einem Neutron beschossen wird. Diese Geschosse durchdringen die Atomhülle und zertrümmern den Atomkern in einzelne Bestandteile. Dadurch werden weitere Neutronen frei, die wiederum andere Atomkerne spalten. Das gefährliche hierbei sind die daraus resultierenden radioaktiven Spaltprodukte. Durch eben diese Brennkammern fließt unter hohem Druck Wasser hindurch. Dieses wird durch die Brennstäbe auf über 300°C erhitzt. Der enorme Druck im innern (176 Bar) verhindert ein Verdampfen des Wassers. Durch Rohre gelangt das erhitzte Wasser zu einem Wärmetauscher, der aufgrund seiner Funktionsweise in AKWs Dampferzeuger genannt wird. Hier erwärmt das unter Druck stehende 300°C heiße Wasser unter Normaldruck stehendes Wasser. Dieses verdampft und dehnt sich dabei aus. Der Wasserdampf treibt i.d.R. drei in abnehmender Größe hintereinander geschaltete Turbinen (Generatoren) an, welche dann letztendlich den Strom erzeugen.

3.2.2 Der Siedewasserreaktor

Der Siedewasserreaktor funktioniert ähnlich wie der DWR. Der einzige unterschied liegt darin, dass das Wasser direkt im Reaktor verdampft und nicht erst nach dem Wärmetausch.

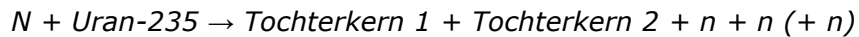
3.2.3 Hochtemperaturreaktor

Dieser Reaktor hat als Wärmeträger im Reaktorkern kein Wasser, sondern Heliumgas, welches sich auf etwa 1100°C erhitzt. Dies gelangt in einen Wärmetauscher und bringt, ähnlich wie beim DWR, Wasser zum Verdampfen. Der HTR ist der vermutlich sicherste Reaktor. Bei maximaler Fahrlässigkeit und maximalen Bedienfehlern erreicht dieser eine Höchsttemperatur von 1750°C, zur Kernschmelze und damit zu Super-GAU sind allerdings mindestens 3000°C nötig.

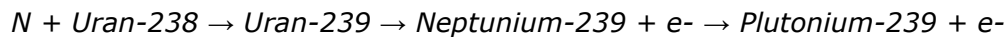
3.2.4 Schneller Brüter

Der Schnelle Brüter ist wohl der Komplizierteste Reaktor, aber dazu der effektivste und zweit gefährlichste. Bei einem Brutreaktor wird im Betrieb mehr Kernbrennstoff erzeugt als verbraucht wird. In einer „normalen“ Kernspaltung werden neben den Spaltprodukten

– den sog. Tochterkernen – nur zwei bis drei weitere Neutronen freigesetzt und sonst nichts.



Das Uran 235 kommt nur zu ca. 0,7% in der Natur vor, das nichtspaltbare Isotop Uran 238 jedoch zu über 99%, und eben jenes wird im schnellen Brüter verwendet. Bei der Kernspaltung von U235 schießen Neutronen auf das U238. Die nun startende Reaktionsfolge hat als Ergebnis Pu239, welches wiederum zur Kernspaltung verwendet werden kann.



- 10 Allerdings hat dieser Reaktortyp neben der guten Wirtschaftlichkeit auch gravierende Nachteile. Der Wärmeleitstoff kann in diesem Fall nicht Wasser oder Helium sein, wie in den anderen Reaktortypen, da diese die Neutronen zu stark abbremsen, was ein Abbrechen der Reaktion herbeiführt. Hierbei wird hauptsächlich Natrium verwendet. Dieses ist bei 400°C flüssig und eignet sich hervorragend dafür, aber das Sicherheitsrisiko ist enorm: befindet sich ein Leck im Wärmetauscher, so dass das Natrium mit Wasser in Berührung kommt, gäbe es eine Katastrophe. Des Weiteren ist Natrium sehr aggressiv gegenüber anderen Stoffen, daher ist der Bau eines solchen Reaktors nur mit teuren Materialien möglich. Allerdings ist es auch möglich das teure und ebenfalls nicht ungefährliche Blei als Wärmeleiter zu benutzen, da dies die Materialien
- 20 weniger angreift und auch keine Reaktion mit Wasser zeigt.

3.2.5 RBMK-Reaktor

Die Abkürzung RBMK steht für „Reaktor Bolschoj Moschnostij Kanalnij“, was frei übersetzt „Reaktor großer Leistung mit Kanälen“ bedeutet. Dieser Reaktortyp verbraucht derart viel Kühlwasser, dass er nur an großen Seen, Flüssen oder Meeren gebaut wurde. Bei diesem Reaktor sitzt jeder der ca. 1660 Brennstäbe in einem eigenen Druckbehälter. Bei den anderen Reaktoren sind diese zusammengefasst in einem Druckbehälter. Als Moderator fungiert bei diesem Reaktortyp nicht Wasser, sondern Graphit, welches die schnellen Neutronen abbremst, damit sie wieder U235-Kerne spalten können. Das Gefährliche an diesem Reaktor ist, dass sie einen positiven „Void-Koeffizienten“ haben.

30 Das heißt, dass die Kettenreaktion beschleunigt wird, wenn Kühlwasser verloren geht. Des Weiteren hat dieser Reaktortyp keine äußere Betonschutzhülle. Das macht ihn zum gefährlichsten Reaktor weltweit.

3.3 Das Kühlsystem

Es gibt zwei verschiedene Arten von Kühlsystemen. Zum einen die, die aus einem Kühlkreislauf bestehen, welcher der Wasserdampf abkühlt, der von den Turbinen kommt, und zum anderen die, die aus zwei Kühlkreisläufen bestehen. Der zusätzliche

Kühlkreislauf kühlt das Wasser, welches den Reaktorkern durchfließt. Beide funktionieren gleichermaßen:

Das Wasser wird aus einem Fluss gepumpt und in den Kühlkreislauf gebracht. Von dort gelangt das kalte Wasser in einen Kondensator, welches das warme Wasser des jeweiligen Kreislaufes durch Wärmetausch abkühlt. Das nun erhitzte Wasser des Kühlsystems gelangt zu einem Kühlturm. Dieser besteht aus einem hohen und breiten Turm in welchen das Wasser gesprüht wird. Diese Wasserdampftröpfchen werden von der Luft die durch den Kühlturm zieht abgekühlt und der Dampf kondensiert. Man könnte sagen, dass es in dem Turm „regnet“. Das Wasser wird in einem Auffangbehälter
10 eingefangen und entweder direkt wieder in den Kühlkreislauf geführt oder in den Fluss abgeleitet.

3.4. Die Generatoren

In einem AKW werden in der Regel drei durch Wasserdampf angetriebene Generatoren betrieben. Der erste Generator ist ein Hochdruckgenerator. Er erzeugt über die Hälfte des Stroms. Danach folgt ein Mitteldruckgenerator, welcher einen Großteil des verbleibenden Dampfdruckes umwandelt. Als letztes folgt ein kleiner Niederdruckgenerator. Er verwendet den Restlichen Druck. Durch die Reihenschaltung dieser drei Turbinen ist der größtmögliche Wirkungsgrad erzielt.

4. Sicherheit und Gefahren

20 Seit es Atomkraftwerke gibt liegt der Schwerpunkt der Forschung in der Sicherheit der Kraftwerke. Im Folgenden werden nun die Sicherheitsmerkmale eines Atomkraftwerks erläutert, sowie auf die Gefahren hingewiesen.

4.1 Sicherheit

Damit in einem AKW nicht so ein Unfall passiert, wie es Tschernobyl '86 der Fall war, ist ein AKW mit sechs Barrieren ausgestattet, welche den Austritt von radioaktivem Material verhindern.

Die erste ist eine sehr effektive, immer vorhandene Barriere. Eine Uranoxidmatrix, also die Kristallstruktur des Brennstoffs selbst.

Die zweite ist das Brennstabhüllrohr, welches den Brennstab Gasdicht umschließt.

30 **Die dritte** ist der Reaktordruckbehälter.

Die vierte ist der Biologische Schild, das Betonfundament, indem der RDB sitzt.

Die fünfte ist ein Sicherheitsbehälter aus Stahl mit Dichthaut. Das ist in den meisten Fällen eine Kugel mit einem Innendurchmesser von 56 m und einer Wandstärke von bis zu 4 cm, die das Reaktordruckgefäß und die unmittelbar daran anschließenden Teile des Kühlkreislaufs umschließt und mit Schnellschlussventilen ausgerüstet ist. Der Behälter ist

ausgelegt für einen Druck bis 6,3 bar und einer Temperatur bis 145 Grad Celsius. Hier könnte in einem theoretisch anzunehmenden Unfall alle Aktivität eingeschlossen werden.

Die sechste schließlich ist noch das Reaktorgebäude, dessen Wände 1,5 bis 2 m dick sind. Diese Barrieren sind sogar gegen ein im Winkel von 90 Grad auftreffende Militärflugzeug beständig.

Diese Schutzhüllen sind das sog. „Containment“.



Aber es gibt noch weitere Sicherheitsvorkehrungen im System selbst, welche schon das Auftreten eines Unfalls verhindern. So ist es in Europa und Amerika Gesetz, dass
 10 Reaktoren einen negativen „Void-Koeffizienten“ haben. Das heißt, dass die Kettenreaktion stoppt, wenn kein Kühlwasser mehr da ist. Dies ist beim RBMK-Reaktor wie er in Tschernobyl stand nicht der Fall gewesen. Das liegt daran, dass schnelle Neutronen kein U235 spalten können. Sie müssen vom Wasser abgebremst (moderiert) werden. Das Wasser fungiert hierbei als Moderator. Erhitzt sich das Wasser im Reaktor auf über 300°C beginnt es zu sieden und sich auszudehnen. Durch die geringere Dichte werden die Neutronen aber nicht mehr so stark moderiert, dass es zur Kernspaltung kommt => Die Kettenreaktion erlischt.

Eine weitere Sicherheitsvorkehrung sind die Regelstäbe aus Cadmium. Sie dienen zum kontrollieren der Kettenreaktion, indem Sie Neutronen „einfangen“. Das liegt daran, dass
 20 Cadmium eine hohe Absorptionsfähigkeit gegenüber Neutronen besitzt. Werden diese Regelstäbe in die Brennkammern gefahren, so absorbieren sie die umherfliegenden Neutronen, wodurch die Kettenreaktion zum Erliegen kommt. Die Regelstäbe sind an Elektromagneten aufgehängt, damit sie bei einer Unterbrechung der Stromzufuhr in den Reaktor „fallen“ und ihn damit schlagartig abschalten.

Die größte Gefahr bei der Nutzung von Kernenergie und zugleich der größte Nachteil sind die Abfallprodukte. Diese sind hochradioaktiv und haben eine Halbwertszeit im Milliarden-

Jahres-Bereich. Dies ist auch der einzige Aspekt auf den sich die Atomkraftgegner stützen können, da es sonst kaum Gefahren gibt.

5. An- und Abschalten eines Meilers

Der Komplett-Start, bzw. das komplette Abschalten eines Meilers ist eine langwierige und komplizierte Angelegenheit. Zum Anfahren eines Kernkraftwerkes wird der Druck im Primärkreis von Umgebungsdruck auf ca. 30 bar angehoben. Dies geschieht mit der so genannten Druckhalterheizung werden nacheinander die Hauptkühlmittelpumpen (Umwälz- pumpen im Volksmund) gestartet. Durch die Abwärme dieser Pumpen (ca. 7 MW) wird der Primärkreis aufgeheizt. Parallel zum Aufheizen des Primärkreises wird die
10 Sekundärseite angewärmt und aufgeheizt. Dies erfolgt mit eigens zu diesem Zweck elektrisch produziertem Dampf.

Mit der Temperaturerhöhung im Primärkreis steigt auch der Druck im Primärkreis. Bis zu einer Temperatur von 260 °C erfolgt die Aufheizung nur über die Abwärme der Pumpen. Es erfolgt hier noch kein nukleares Aufheizen, d. h. die Steuerstäbe sind komplett im Kern und die Borkonzentration im Kern beträgt 2400 ppm. Ab 260 °C erfolgt das nukleare Aufheizen: Die Steuerstäbe werden aus dem Kern gezogen. Noch ist der Reaktor durch die hohe Borkonzentration unterkritisch, d. h. es erfolgt keine Kettenreaktion, trotz gezogener Steuerstäbe. Jetzt wird der Primärkreis entboriert. Das Wasser im Primärkreis wird teilweise gegen Deionat (vollentsalztes Wasser)
20 ausgetauscht. Dadurch verringert sich die Borkonzentration im Primärkreis. Der Reaktor wird langsam kritisch, es erfolgt die erste selbsterhaltende Kettenreaktion. Durch weitere Deborierung wird nun die Leistung des Reaktors erhöht bis 100 % erreicht sind, was mehrere Tage dauern kann. Die Brennelemente müssen sich den "neuen Umgebungsbedingungen" erst anpassen, d.h. sie werden konditioniert. Die mittlere Temperatur im Primärkreis beträgt dann 306 °C bei einem Druck von 155 bar.

Parallel zum Anfahren des Reaktors wird auf der Sekundärseite die Turbine und der Generator in Betrieb genommen, um die vom Reaktor erzeugte Leistung auch abführen zu können. So ein Anfahrvorgang dauert in der Regel bis zu drei Tage.

Bevor ein Reaktor angefahren werden kann, sind mehrere Prüfungen notwendig, um
30 sicherzustellen, dass alle Systeme funktionieren. Erst wenn alle Prüfungen zur vollen Zufriedenheit durchgeführt worden sind, kann der Reaktor nach Zustimmung der Behörde angefahren werden.

6. Statistiken

Mit der vergleichsweise geringen Zahl von nur 19 Reaktoren produzierte Deutschland im Jahr 2002 die vierthöchste Strommenge hinter den USA, Frankreich und Japan. Im gesamten Jahr produzierte Deutschland 2666,7 Milliarden kWh. Zum Vergleich: ein

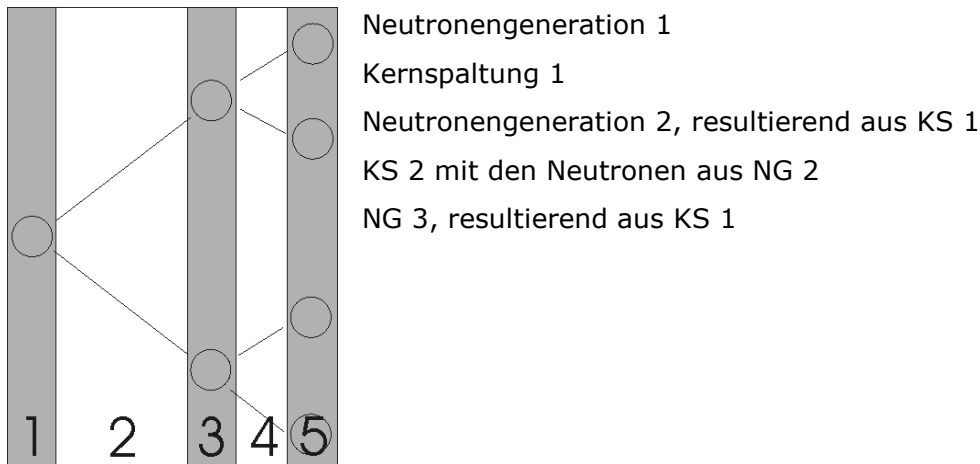
„Durchschnittshaushalt“ mit zwei bis drei Personen verbraucht pro Jahr etwa 5000 kWh, also könnte man mit der Produzierten Energie 533.340.000 Haushalte ein Jahr mit Strom versorgen oder einen Haushalt ebenso viele Jahre.... Aktuell befinden sich auf der ganzen Welt 441 Reaktoren in 31 Ländern, diese Produzieren etwa 17% des gesamten Stroms auf der Welt.

Ort (von Nord nach Süd)	Leistung (in MW)	Reaktortyp
Brunsbüttel	806	SWR
Brokdorf	1440	DWR
Stade	672	DWR
Unterweser	1350	DWR
Krümmel	1316	SWR
Emsland	1363	DWR
Grohnde	1430	DWR
Mühlheim-Kärlich	fertig, noch nicht in Betrieb	DWR
Biblis (A / B)	(1225 / 1300)	DWR
Grafenrheinfeld	1345	DWR
Obrigheim	357	DWR
Philippsburg (1 / 2)	(926 / 1424)	(SWR / DWR)
Neckar (1 / 2)	(840 / 1365)	DWR
Isar (1 / 2)	(907 / 1440)	(SWR / DWR)
Grundremmingen (B / C)	1344	SWR

7. Die Kernspaltung

Die Kernspaltung läuft ganz grob gesagt so ab: Ein Neutron trifft auf einen Kern, in diesem Beispiel Uran²³⁵. Dieser Kern wird durch den Aufprall stark verformt und der Kern nimmt dieses Neutron an sich. Nun haben wir also Uran²³⁶. Dieser Kern ist durch das zusätzliche Neutron und die Verformung extrem instabil geworden und teilt sich in zwei sog. Tochterkerne. Die Spaltstelle der Äquator um den Punkt, an dem das Neutron aufgetroffen ist. Bei diesem Spaltprozess werden neue Neutronen frei. Diese sind aber so schnell, dass sie keine weitere Kernspaltung vornehmen können. Sie müssen durch einen Moderator abgebremst werden. Dieser ist in Kernkraftwerken für gewöhnlich Wasser, Graphit oder Heliumgas. Die nun langsamen Neutronen können wieder neue Kerne spalten. Diese Kettenreaktion setzt erst ein, wenn eine bestimmte kritische Masse vorhanden ist. Diese bestimmt man durch die Reichweite der Neutronen im spaltbaren Material und dem Verhältnis der Wahrscheinlichkeit für das Eintreten einer Spaltung und eines anderen Prozesses.

Die Neutronen die bei den jeweiligen Spaltvorgängen entstehen nennt man Neutronengeneration.



Eine Kettenreaktion wird mit dem Faktor k beschrieben. Dieser wird folgendermaßen berechnet:

$$k = \frac{\text{Anzahl der Neutronen einer Generation}}{\text{Anzahl der Neutronen der vorausgegangenen Generation}}$$

10

Ist $k < 1$, so bezeichnet man den Zustand als Unterkritisch

Die Kettenreaktion kommt zum Erliegen

Ist $k = 1$, so bezeichnet man den Zustand als Kritisch

Die Kettenreaktion läuft konstant fort

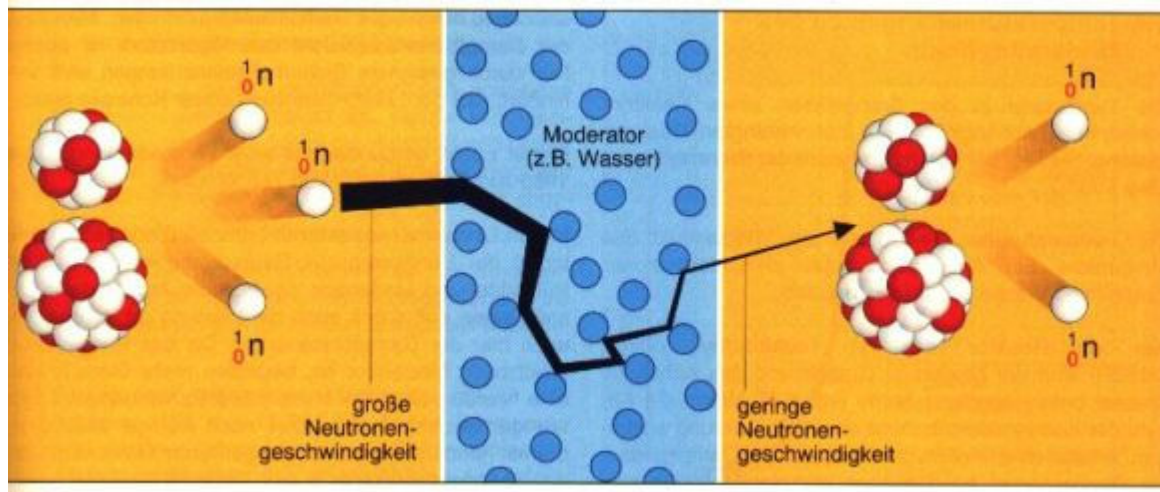
Ist $k > 1$, so bezeichnet man den Zustand als Überkritisch

Die Kettenreaktion wird konstant stärker ($[NG3] = [NG2]^2$; $[NG4] = [NG3]^2$; usw.) Diese Eigenschaft macht man sich bei der Atombombe zunutze.

Warum „moderiert“ man die Neutronen?

20

Nach einer Spaltung fliegen die Neutronen mit etwa 2000 km/s (schnelle Neutronen) aus der Zone heraus, in der sich das spaltbare Material befindet. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Neutron bei dieser Geschwindigkeit auf einen Kern trifft, ist sehr gering, also werden sie durch einen Moderator auf etwa 2 km/s abgebremst (thermische Neutronen).



Um den Multiplikationsfaktor k zu bestimmen hilft es, sich den Lebenslauf einer Generation von Neutronen (Neutronenzyklus) von ihrer Entstehung an in einem **unendlich ausgedehnten Reaktorkern** zu beobachten. Im Reaktorkern werden die Absorber (Strukturteile, Regelstäbe et c.) für diese Betrachtung mal vernachlässigt. Es sei hier " n " die Anzahl schneller Neutronen, die durch thermische Spaltung entstehen.

Aus der thermischen Spaltung entstehen n schnelle Neutronen, also die Generation 1 unserer Betrachtung.

1) Manche dieser Neutronen bewirken sofort eine Spaltung (insbesondere im U-238), diese Spaltungen betrachtet man als schnelle Spaltung - er wird beschrieben durch den **"Schnellsplutfaktor ' ϵ ' "**. Es existieren nun $n * \epsilon$ schnelle Neutronen.

2) Auf dem weiteren Wege werden die Neutronen nun abgebremst (Moderation) und durchlaufen auf dem Wege von 2MeV nach 0,025eV das Resonanzeinfanggebiet (5 bis 100eV) des U-238. In diesem Bereich werden Neutronen eingefangen, lösen aber keine Spaltung aus. Die Wahrscheinlichkeit, dass das Neutron diesem Einfang entkommt, nennt man **"Resonanzentkommwahrscheinlichkeit ' p ' "** oder "Bremsnutzung ' p ' ". Nach der Moderation stehen nun also $n * \epsilon * p$ Neutronen zur Verfügung.

3) Einige der nun thermischen Neutronen unterliegen jetzt aber der Absorption in U-235-Kernen, ohne dass sie dort eine Spaltung auslösen. Sie werden "thermisch genutzt". Beschrieben wird das durch die **"thermische Nutzung ' f ' "**. Übrig sind nun $n * \epsilon * p * f$ thermische Neutronen.

4) Von diesen übrig gebliebenen Neutronen lösen nun eine thermische Spaltung aus und vermehren dadurch die Anzahl der Neutronen um den Faktor ' η ', man nennt diesen Faktor **"Neutronenausbeute ' η ' " oder "Regenerationsfaktor"**.

Nach all diesen Vorgängen stehen dem Reaktor nun $n * \epsilon * p * f * \eta$ Neutronen in der 2. Generation zur Verfügung.

Da wir einen unendlich ausgedehnten Reaktor betrachtet und den Multiplikationsfaktor k definiert haben als Verhältnis der Neutronen einer Generation zur Anzahl der Neutronen der vorhergehenden Generation, erhalten wir als Produkt dieser vier Faktoren nun den Multiplikationsfaktor für den unendlichen Reaktor k_{∞} (inf steht hier für infinity). Dieses Produkt wird bezeichnet als "**Vierfaktorenformel**":

$$k_{\infty} = \epsilon * p * f * \eta$$

(das n fällt durch Kürzen heraus, da in Generation 1 n Neutronen, in Generation 2 $n * \epsilon * p * f * \eta$ Neutronen vorhanden sind)

Dieser Faktor ist nur vom Material (Brennstab, Brennstoffkonzentration, Moderator) des Reaktors, der sog. "Strukturzelle" abhängig - nicht von seiner Grösse!

5) Um die Anzahl der Neutronen zu bestimmen, die in einem **endlichen** Reaktor existieren zu bestimmen, muss man noch zwei Faktoren berücksichtigen, die die Anzahl der Neutronen mindern. Auch hier seien die Absorber wieder vernachlässigt.

Manche Neutronen gehen im endlichen Reaktor durch Leckage verloren, d.h. sie verlassen den Reaktorkern. Die Leckageverluste schneller Neutronen aus dem Kern werden mit dem Faktor $(1 - P_s)$ und die Verluste thermischer Neutronen mit dem Faktor $(1 - P_{th})$ beschrieben. Es verbleiben $P_s * P_{th}$ Neutronen im endlichen Kern.

20 Berücksichtigt man diese im Multiplikationsfaktor, so erhält man daraus k_{eff} . Er sagt aus, wie gross das Verhältnis der Neutronengenerationen zueinander **effektiv** ist.

Somit ist der Multiplikationsfaktor für endliche Reaktoren ohne Absorber:

$$k_{eff} = (\epsilon * p * f * \eta) * P_s * P_{th} = k_{\infty} * P_s * P_{th}$$

Dieser Faktor ist Material und Geometrieabhängig (also auch von der Grösse des Reaktors)!

Bei der Planung eines Reaktors wird k_{eff} so ausgelegt, dass $k_{eff} > 1$ ist.

Begründet liegt dies in der Überschussreaktivität, die in den Brennstäben vorhanden sein muss. Dieser Überschuss ist technisch so vorgesehen, um Reaktivitätsminderungen durch Vergiftung und Abbrand zu kompensieren. Mehr dazu in 3.5 Spaltproduktvergiftung und
30 Abbrand.

Übliche Zahlenwerte und Definitionen für diese Faktoren:

1) Schnellspaltfaktor:

$$\epsilon = \frac{\text{Neutronen, die insgesamt durch Spaltung entstehen}}{\text{Neutronen, die durch thermische Spaltung entstehen}}$$

Er liegt in Leichtwasserreaktoren bei etwa 1,06 im kalt-kritischen und 1,1 im heiß-kritischen Zustand.

2) Resonanzentkommwahrscheinlichkeit

$$p = \frac{\text{Neutronen, die thermische Energie erreichen}}{\text{Anzahl der schnellen Neutronen, die durch thermische und schnelle Spaltung entstanden}}$$

Sie liegt im Leichtwasserreaktor bei etwa 0,7

3) thermische Nutzung

$$f = \frac{\text{Zahl der im Brennstoff absorbierten thermischen Neutronen}}{\text{Gesamtzahl der in der Anordnung absorbierten thermischen Neutronen}}$$

10

Bezeichnet den Bruchteil thermischer Neutronen, die nicht in sonstigem Material sondern im Brennstoff absorbiert wird. Üblicherweise ist f ungefähr 0,8 im Leichtwasserreaktor.

4) Neutronenausbeute

$$\eta = \frac{\text{Zahl der durch schnelle Spaltung entstandenen schnellen Neutronen}}{\text{Zahl der durch im Brennstoff absorbierten thermischen Neutronen}}$$

Dieser Faktor berücksichtigt, dass sowohl der nichtspaltbare Anteil des Brennstoffes thermische Neutronen absorbiert, als auch den Anteil der Neutronen der zwar vom Brennstoff eingefangen wird aber keine Spaltung auslöst. Deshalb ist der Faktor auch kleiner als die mittlere Neutronenentstehung von 2,43 Neutronen pro Spaltung. Er liegt in der Praxis bei ca. 1,7.

20 5) Leckageverluste

Der Leckageverlust $P_s * P_{th}$ schlägt mit etwa 0,98 zu Buche, lässt sich aber durch den Einbau von Neutronenreflektoren im Kern vermindern.

8. Der Transport mit einem CASTOR



C.A.S.T.O.R. ist die Abkürzung für "**C**ask for **S**torage and **T**ransport **O**f **R**adioactive material", das bedeutet "Behälter für Lagerung und Transport von radioaktiven Stoffen". Es handelt sich dabei um einen Metallzylinder mit einer Hülle aus 40cm dickem Gusseisen der im Schnitt 6m lang ist, einen Durchmesser von ca. 2,5 Metern hat und leer etwa 100 Tonnen wiegt. Er wird für den Transport und für die Lagerung von radioaktiven Stoffen benutzt um die Umwelt vor deren Strahlung zu

20 schützen. Dies gilt sowohl für verbrauchte Brennstäbe, die von deutschen Atomkraftwerken in die französische Wiederaufbereitungsanlage „La Hague“ gebracht werden als auch für die dabei entstehenden Abfallstoffe die wieder nach Deutschland zurückgebracht werden. Seit 1978 werden deutsche Brennstäbe nach Frankreich gebracht, nachdem sich die Deutschen EnergieVersorgungsUnternehmen gegenüber COGEMA, der französischen Firma die „La Hague“ betreibt, verpflichtet hatten, das Material ab 1996 zurück zu nehmen.

Erschwert wird das ganze, durch die regelmäßigen Proteste bei CASTOR-Transporten, aus Angst vor den radioaktiven Abfallstoffen. Diese werden in „La Hague“ in Säure aufgelöst, diese wird getrocknet, und das so entstandene Pulver wird zusammen mit flüssigem Glas
30 in einen Edelstahlzylinder mit einem Durchmesser von 43cm und einer Höhe von 134cm gegossen.

Der radioaktive Glasblock, in seinem Inneren, wiegt 400kg und entwickelt durch seine Strahlung eine Temperatur von etwa 400°C. Diese Apparatur nennt man Glaskokille. Diese Kokille muss in einem Zwischenlager in „La Hague“ 20 Jahre abkühlen, dann wird sie zusammen mit anderen Kokillen in einem CASTOR in das deutsche Zwischenlager Gorleben gebracht, wo sie weitere 20 Jahre abkühlen. Erst dann dürfen sie in ein Endlager gebracht werden.

Durch diese langen Wartezeiten haben sich innerhalb von 25 Jahren 3500 Glaskokillen gefüllt, das entspricht 147 CASTOR-Transporten! Wären die Castoren noch die gleichen
40 wie 1978 wären noch mehr Transporte nötig.

Inzwischen gibt es 4 verschiedene CASTOR-Typen:

CASTOR V/19

5 Jahre Abkühlung 2,4m x 5,8m

19 Brennelemente

CASTOR V/52

5 Jahre Abkühlung 2,4m x 5,4m

52 Brennelemente

CASTOR 440/84

440=russischer Kraftwerkstyp 2,7m x 4,1m

84 Brennelemente

CASTOR HAW 20/28

(HAW = HighActiveWaste -> HochAktiverAbfall) 2,5m x 6,1m

20-28 Kokillen

Bei so vielen radioaktiven Glaskokillen ist es natürlich wichtig, dass alle CASTORen sicher sind, deswegen muss sich jeder CASTOR 4 Tests unterziehen:

- 1) er wird aus 9 Metern Höhe auf einen Betonklotz mit Stahlplatte fallen gelassen
 - 2) er wird aus 1 Meter Höhe auf einen 20cm hohen und 15cm dicken Stahldorn gestürzt
 - 3) er wird für eine halbe Stunde in Feuer bei einer Temperatur von 800°C gelegt
 - 4) er wird eine Stunde einem Druck von 21 bar ausgesetzt
- und um die Stabilität zusätzlich zu demonstrieren ließ man
- 5) einen Zug mit 165km/h auf einen CASTOR fahren

- 10 6) einen Gegenstand mit einer Tonne Gewicht mit Schallgeschwindigkeit auf einen CASTOR prallen

Bis jetzt ist noch kein CASTOR an einer dieser Aufgaben gescheitert, somit geht von ihnen keine Gefahr aus.

9. Die Wiederaufbereitung

Wenn die Brennstäbe in den Kernkraftwerken einmal ausgebrannt sind, werden sie nicht sofort aus dem Reaktorgebäude in die Wiederaufbereitungsanlagen gebracht. Um die Strahlung einzudämmen, werden die Stäbe in einem Wasserbecken neben dem Gebäude gelagert. Dadurch vermindert sich die Strahlung um etwa ein Dreißigstel.

Danach werden die Brennstäbe in ein Zwischenlager (wie z.B. Gorleben in Niedersachsen) gebracht, wo sie in Castor-Behältern gelagert werden. Von dort wird ein Teil in die Wiederaufbereitungsanlagen transportiert, wo sie ebenfalls wieder in einem Wasserbecken aufbewahrt werden, bis sie wiederaufbereitungsfähig sind.

- 10 Wenn die Brennstoffe aus dem Wasserbecken entnommen werden, werden sie in eine Kammer gebracht, wo die äußeren Hüllen der Brennstäbe entfernt werden. Nach diesem Vorgang werden die Brennstäbe mithilfe von ferngesteuerten Werkzeugen zersägt und in Salpetersäure gelegt, wobei sich radioaktive Abfälle und Brennstoffe (nicht vollständig) auflösen.

Zur Sicherheit sind die Kammern mit 2m dicken Wänden und bleihaltig verglasten Fenstern ausgestattet worden, die die Strahlung zurückhalten sollen.

Durch verschiedene chemische Prozesse werden die Brennstoffe voneinander getrennt und wieder zurückgewonnen, wobei das Uran 235 und das Plutonium wieder zu Brennstoffen verarbeitet wird.

- 20 Der dabei zurückbleibende strahlende Rest wird endgelagert.

In ganz Europa gibt es 3 Wiederaufbereitungsanlagen; 2 in Großbritannien (Sellafield, Dounreay) und eine in Frankreich (La Hague). Deutschland muss seine wiederaufzubereitenden Stoffe ins Ausland (ausschließlich nach La Hague) transportieren, wobei das Land, das diese Stoffe aufnimmt, (also Frankreich) hohe Gebühren einkassiert. Im Jahre 1980 wurde der Bau einer Wiederaufbereitungsanlage auch in Deutschland, und zwar im bayrischen Wackersdorf geplant. Dies wurde jedoch nicht realisiert, da es viele Proteste von Seiten der Bevölkerung gab, und der Plan trotz der investierten 2,6 Mrd. DM Steuergelder aufgegeben werden musste.

- 30 Denn Wiederaufbereitungsanlagen haben auch Risiken. In der Umgebung der drei Wiederaufbereitungsanlagen ist das Leukämierisiko viel höher als an anderen Orten.

So behauptet Greenpeace aber auch, dass das an der englischen Westküste gelegene Werk Sellafield Unmengen von hochgiftigem Plutonium und andere gefährliche Substanzen in die Irische See geleitet habe.

10. Die Endlagerung

In den 50ern und 60ern wurden Brennstäbe und Überreste von der Wiederaufbereitung in Tonnen verpackt und an verschiedensten Stellen der Weltmeere versenkt. 1984 wurde diese Art der Entsorgung verboten, denn viele Stellen der Weltmeere waren dadurch radioaktiv belastet.



10 Heute werden schwach- und mittelradioaktive Stoffe in stillgelegten Salzstöcken gelagert. Die Vorteile dieser Salzstöcke bestehen darin, dass sich das Steinsalz leicht verformt und sich öffnende Spalten oder Hohlräume schließen. Außerdem ist die Wahrscheinlichkeit, dass Wasser dorthin gelangen könnte, sehr gering, da das Salz hätte gelöst sein müssen. In den Salzstöcken werden die Abfälle in mehreren Etagen gelagert. In den oberen lagern die schwachradioaktiven Abfallfässer und werden mit Salz bedeckt. In den unteren Stockwerken werden die mittelradioaktiven Abfälle in besonderen Betonabschirmbehältern gelagert. In diesen Bereich dürfen keine Menschen rein. Es hat sich erwiesen, dass von den in den Salzstöcken gelagerten Abfällen keine Gefahr ausgeht.

20

Hochradioaktive Abfälle werden in Glas eingeschmolzen, die Glasblöcke dann in einen Edelstahlbehälter eingeschweißt.

Die Anforderungen an solche Endlager wie in Salzstöcken sind neben Sicherheit



gegenüber dem Zutritt von Wasser: geologische Stabilität über einen Zeitraum von etwa 10 000 Jahren und gute Wärmeleitfähigkeit zur Abfuhr der beim radioaktiven Zerfall auftretenden Wärme. In Deutschland gibt es zurzeit ein Endlager (in Morsleben), für weitere wird eine Genehmigung angestrebt.

*Das Endlager in Morsleben***11. Unglücksfälle**

In Tschernobyl ereignete sich der bislang schwerste Unfall in der Geschichte der Atomenergie. Insgesamt wurden seit 1945 rund 60 erhebliche Vorfälle in zivilen Atomkraftwerken gezählt. Die meisten Unfälle, insgesamt 33 Stück, gab es in den USA, wie das französische Institut für Nuklearsicherheit berichtet. Darüber hinaus gab es auch im Westen wie im Osten eine Reihe von schweren Unfällen in militärischen Kernanlagen, die ebenfalls erhebliche Auswirkungen auf die Umwelt hatten (Windscale, Chelyabinsk etc.). Ich möchte hier aber nur auf zwei schwerwiegende Vorfälle eingehen.

10 **11.1 Tschernobyl**

Am 26.04.1986 geriet in einem Kernkraftwerk 20km vor der Stadt Tschernobyl, die ca. 130 km nördlich von Kiew liegt, ein Reaktor außer Kontrolle, der den bisher folgenschwersten Reaktorunfall auslöste. Grund war ein, nach einem offiziellen Bericht, ungenehmigter Test an den Turbogeneratoren in Block 4, bei dem der Reaktor in Betrieb blieb. Die Verringerung des Kühlmitteldurchsatzes führte zu einer Überhitzung der Brennstäbe. Dies führte zu zwei Wasserstoffexplosionen, durch dieses wurde der obere Teil des Reaktors weggesprengt, der Reaktorkern entzündete sich und brannte bei einer Temperatur von 1500°C. Bei diesen Temperaturen wurde das Reaktorgebäude zerstört. Im Gegensatz zu Reaktoren in westlichen Ländern hatte der Reaktor von Tschernobyl keine Sicherheitshülle. Ein solches Gebäude hätte möglicherweise das Austreten von radioaktivem Material verhindert.

20

Der radioaktive Fallout belastet Teile von Russland, Weißrussland, der Ukraine, Skandinavien und Mitteleuropas unterschiedlich stark. Als Notmaßnahmen wurden Borcarbid (zur Bremsung der Kettenreaktion), Blei (zur Strahlenabschirmung) und Brand hemmende Mittel auf den Reaktor abgeworfen.

30



Nach sowjetischen Angaben wurden 31 Menschen sofort bei diesem Unfall getötet, die Zahl der durch die Strahlung verursachten Todesfälle ist bis heute unbekannt. Mehr als 135.000 Menschen wurden aus dem unmittelbaren Gefahrenbereich, mit einer Gesamtfläche von 1600 Quadratkilometer evakuiert. Die 5km Nahzone ist bis auf weiteres unbewohnbar.

Von den unmittelbar verantwortlichen Funktionären wurden 1987 sechs zu Haftstrafen in Arbeitslagern verurteilt. Das Kraftwerk wurde zwar mit einem so genannten Sarkophag, einbetoniert dennoch wurden 1988 die übrigen drei Reaktoren wieder in Betrieb genommen.

1991 verpflichtete sich die Regierung, das Kraftwerk stillzulegen. Eine sofortige Stilllegung war allerdings aus energiepolitischen Gründen nicht möglich. So entwickelten westliche Staaten 1994 Hilfsmaßnahmen, um die Schließung des unsicheren Kraftwerkes zu erreichen.

11.2 Three Mile Island

- 10 Trotz aller Sicherheitseinrichtungen ereignete sich am 28.3.1979 im Druckwasserreaktor von Three Mile Island in der Nähe von Harrisburg in dem US-Bundesstaat Pennsylvania ein Unfall. Durch einen Wartungsfehler wurde ein defektes Ventil übersehen, dies führte



zu einem Verlust von Kühlwasser. Der Reaktor wurde durch ein Sicherheitssystem abgeschaltet, und das Notkühlsystem nahm kurze Zeit nach Beginn des Unfalls seinen Betrieb auf. Dann wurde jedoch aufgrund menschlichen Versagens das Notkühlsystem abgeschaltet, wodurch es, wie in Tschernobyl, zu einer partiellen Kernschmelze und zum Austritt von flüchtigen Spaltprodukten aus dem Reaktorbehälter kam. Diese waren aber ungefähr 50mal schwächer als in

Tschernobyl. Denn im Unterschied zu Tschernobyl wurde der größte Teil der radioaktiven Spaltprodukte durch das Reaktordruckgefäß und vor allem durch das Containment zurückgehalten. Es gelangten nur geringe Mengen an radioaktiven Stoffen unterhalb der erlaubten Grenzwerte nach außen, woraus sich keine gesundheitlichen Folgen für die Bevölkerung ergaben.

12. Ein Vergleich mit einem Kohlekraftwerk

	Stromproduktion	Menge von Energieträger	Platzbedarf	Abfall pro Jahr
Kernkraftwerk	Ca.7 Milliarden kWh/Jahr	25 -35 t/a Uran -> 2 Güterwagen	10-20 ha	735 Tonnen schwach und mittelaktive Abfälle 12 Tonnen starkaktive Abfälle jeweils incl. Verpackung
Kohlekraftwerk	Ca.7 Milliarden kWh/Jahr (Großkraftwerke!)	2 500 000 t/a Steinkohle -> 50 000 Güterwagen	40-70ha	Abgabe über Kamin: 7 500 000 Tonnen Kohlendioxid 40 000 Tonnen Schwefeldioxid 20 000 Tonnen Stickoxide 5 000 Tonnen Staub 350 000 Tonnen Asche und Schlacke 120 000 Tonnen Schlamm

13. Quellen:

- www.anti-atom.de/uran.htm
- www.muenster.de/~uwz/wiga/uran/rundgang/index.html
- www.ecology.at/files/kontexte/2002_1_10.pdf
- <http://www.cuxonline.de/bleicken/zeitung/erfindungen.htm>
- <http://www.uniterra.de/rutherford/ele092.htm>
- www.infokreis-kernenergie.org/d/faq_transport.cfm#not
- www.rhein-zeitung.de/old/96/05/09/topnews/ahint3.html
- www.infokreis-kernenergie.org/d/transportbehaelter.cfm
- 10 www.marvin.sn.schule.de/~ms86/prowo/projekt17.htm
- www.zwischenlagerung.de/blq.pdf+%22eine+glaskokille+ist%22&hl=de&ie=UTF-8
- <http://www.web-quest.ch/framecontent/arbeiten/arbeiten2001/wasser/Wasserkraft/KraftwerkeVergleich.htm>
- http://archiv.greenpeace.de/GP_DOK_3P/BRENNPUN/F0017C20.HTM
- <http://www.fh-lueneburg.de/u1/gym03/expo/jonatur/umwelt/eingriff/gorleben/atom/kern.htm>
- <http://www.fh-lueneburg.de/u1/gym03/expo/jonatur/umwelt/eingriff/gorleben/atom/threem.htm>
- <http://www.fh-lueneburg.de/u1/gym03/expo/jonatur/umwelt/eingriff/gorleben/atom/tscherno.htm>
- <http://www.reyl.de/tschernoby/Inter/gast/nowak1.html>
- <http://www.fh-lueneburg.de/u1/gym03/expo/jonatur/umwelt/eingriff/gorleben/atom/chronik.htm>
- 20 <http://www.joannamacy.net/Atomenergienutzung.doc>
- <http://www.fh-furtwangen.de/~www-gf/strahlenschutz/faqs/geschichte.html>
- http://www.greenpeace-magazin.de/archiv/hefte99/2_99/three_miles_island.html
- http://www.umweltbuero.at/umweltgemeinderat/umweltordner/framesets/5_umwelt_a_bis_z/5_frame.html?main1=/umweltgemeinderat/umweltordner/framesets/5_umwelt_a_bis_z/5_strahlung1_frame.html&main=/umweltgemeinderat/umweltordner/html/5_s_strahlung_4.html
- <http://www.quarks.de/castor/bilder/tschernob.jpg>
- <http://azimuth.harcourtcollege.com/history/ayers/chapter30/images/threemileisland.jpg>
- http://www.kernenergie-wissen.de/Aufbau_KKW/aufbau_kkw.html
- <http://www-user.rhrk.uni-kl.de/~schlemme/facharbt.html>
- 30 <http://www.oneworldweb.de/castor/presse/stromthemen/1998/akws.jpg>
- <http://www.energie.de/is-bin/INTERSHOP.enfinity/eTS/Store/de/-/EUR/Pressrelease-CategoryDetailView?ObjectID=BtbAqB6WtTAAADzVDBL2N0x&ObjectType=Pressrelease&ParentCategoryID=cat011>
- <http://www.sisol.de/brennpunkt/artikel/073C8F56E3EE4830977781B8A7EADADD.sisol>
- <http://www.kernenergie-wissen.de/Kernspaltung/Neutronenzyklus/neutronenzyklus.html>