

## **Von der Entdeckung der Radioaktivität zur Nutzung der Kernenergie Das Problem der radioaktiven Abfälle**

Vorlesung /Seminar 24006 - Sommersemester 2007 Prof. Dr. Walter A. Franke  
Geocampus Lankwitz Haus C, Gr. Seminarraum, Freitag 13:15 bis 17:15 Uhr

Die Skripte soll Ihnen in der Lehrveranstaltung weitgehend die Anfertigung von Notizen ersparen, damit Sie sich auf den vorgetragenen Inhalt konzentrieren können. Die Skripte ist kein Lehrbuch; der Stoff ist oft extrem knapp notiert und deshalb ohne Erläuterung und Gelegenheit zu Rückfragen zuweilen nicht ohne weiteres verständlich. Die Skripte ersetzt nicht den Besuch der LV, sie kann Ihnen beim Versäumen einer Woche aber helfen den Anschluss zu finden.

Abbildungen und Diagramme sind nicht enthalten; dies hat folgende Gründe:

- Urheberrechtliche Bedenken
- Eine komplette Version mit Bildern hätte ca. 2 Mbit Umfang
- Die Teilnehmer können kostenlos zwei Broschüren des „Informationskreis Kernenergie“ mit zahlreichen Abbildungen per Internet bestellen
- Weitere Abbildungen stehen für Kopien zur Verfügung

Sie sollten bei Verständnisschwierigkeiten sofort Rückfragen stellen, ein Teil der LV wird als Diskussionsseminar gestaltet. Sie sollten also gewärtig sein zu Ihrem Kenntnisstand befragt zu werden und dabei nach Möglichkeit zwischen Meinung und gesicherter Erkenntnis unterscheiden können. - Dieser Teil der LV kann Ihnen helfen Ihre Fähigkeit zu mündlichen Diskussionen im wissenschaftlichen Bereich zu testen und zu verbessern.

Von etwa 14:40 bis etwa 15:10 Uhr wird eine Kaffee, bzw. Tee-Pause eingeschaltet; die Getränke sind kostenlos. In der Pause besteht Gelegenheit zur Diskussion in kleinerer Runde.

Bitte tragen Sie Ihren Namen in die jeweilige Anwesenheitsliste ein, bei der ersten Lehrveranstaltung bitte auch Hauptfach und Semester, sowie e-mail Anschrift. - Ein Seminarschein wird ausgegeben bei hinreichender Beteiligung und Präsenz. Ein Schein mit credit point Benotung kann lt. den Bestimmungen nur ausgegeben werden nach Teilnahme an einem Prüfungsgespräch nach Vereinbarung in der zweiten Semesterhälfte, bzw. nach erfolgreicher schriftlicher Hausarbeit

## Vorbemerkungen zur Geschichte bis 1930

1789 fand Klaproth, Professor an der Preußischen Bergakademie zu Berlin, in der Pechblende von Joachimsthal ein neues Element. Er nannte es Uran nach dem acht Jahre vorher von Herschel entdeckten äussersten Planeten unseres Sonnensystems, der den Namen Uranus erhalten hatte. Dabei unterlief Klaproth ein angesichts des damaligen Kenntnisstands der Chemie verständlicher Irrtum, er hielt das schwarze, schwere Pulver, das er bei der Reduktion des gelben Uran(VI)oxids erhielt, für das Uranmetall. Das Metall wurde erst 52 Jahre später hergestellt. Uran ist ein silberfarbendes Metall, das bei 1130°C schmilzt und die Dichte 19,05 hat. Uranverbindungen wurden bis zur Entdeckung der Kernspaltung 1938 kaum technisch genutzt (Zur Färbung von keramischen Glasuren und von Gläsern).

1895 entdeckte Röntgen die nach ihm benannte Röntgenstrahlung (engl. X-rays). Bei einem Vortrag über diese neue Strahlung im Januar 1896 in der Akademie der Wissenschaften in Paris beobachtete Becquerel, dass das Glas der Röhre an der Stelle an der die Rö.-Strahlen austraten, eine Fluoreszenz zeigte. Da Becquerel seit vielen Jahren über Fluoreszenz gearbeitet hatte, glaubte er, dass die Fluoreszenz für die Strahlung ursächlich wäre. Tatsächlich fand er, daß von fluoreszierenden Uranverbindungen eine Strahlung ausging, die alle Eigenschaften der Rö.-Strahlung aufwies. Seine ursprüngliche Annahme, die Fluoreszenz erzeuge diese Strahlen, korrigierte er bereits nach zwei Wochen: Alle Uranverbindungen, auch nicht fluoreszierende Stoffe, sandten diese Strahlungsart aus. - Er erkannte, dass ein Teil der Strahlung im Magnetfeld abgelenkt wurde und die Luft durch die Strahlung ionisiert wurde. Die nähere Untersuchung der Strahlung übertrug er einer jungen Doktorandin, Marya Curie, geb. Sklodowska. Ihr Mann Pierre Curie war Physikprofessor an der Sorbonne und beteiligte sich bald an diesen Arbeiten.

Mit einer von ihrem Schwager Jaques Curie konstruierten Anordnung konnte sie die Ionisierungsintensität von radioaktiven Präparaten quantitativ messen. 1898 wies Frau Curie nach, dass auch Thorium radioaktiv ist. Frau Curie fand auch, daß Lösungen aus denen Uran, bzw. Thorium chemisch völlig entfernt wurden, noch Strahlung aussandten. Es mußte sich um neue, bislang unbekannte Elemente handeln; noch im gleichen Jahr 1898 wurde das Polonium und das Radium entdeckt. - Um wägbare Mengen von Radium für eine Atomgewichtsbestimmung zu erhalten, arbeitete Frau Curie 60 t Pecherzrückstände aus Joachimsthal auf und erhielt daraus 22 mg Radium.

Sie trennte das Ra vom Ba durch fraktionierte Kristallisation der Chloride, später zeigte sich, dass beim Arbeiten mit Bromiden etwa 60% Zeitersparnis möglich gewesen wäre!

1903 erhielten Becquerel, sowie Marya und Pierre Curie den Nobelpreis für Physik. In seiner Festrede wies Pierre Curie erstmals auf die Gefahren hin, die mit der neuen Strahlung verbunden sein könnten. Die Bezeichnung "Radioaktivität" wurde durch das Ehepaar Curie eingeführt. (P. Curie starb 1906 bei einem Verkehrsunfall, seine Frau übernahm seine Prof.-Stelle an der Sorbonne) - 1911 wurde Marya Curie auch der Nobelpreis für Chemie verliehen. (M.Curie starb 1934 an Leukämie)

## Neue Elemente

Bis 1896 "fehlten" im Periodischen System der Elemente zwischen Wismut und Uran sieben Elemente, nur das Thorium war bekannt.

1896 Polonium (Curie) und Radium (Curie und Schmidt)

1898 Actinium (Debiere)

1899 Radon (Owens)

1918 Protactinium (Hahn+Meitner)

Die noch fehlenden zwei Elemente Astatin und Francium wurden erst 1938 bis 1940 aufgrund einer Voraussage von Minder entdeckt, bzw. hergestellt (Seaborg)

## Analyse der Strahlung

1903 P. Curie/Bequerel/ Rutherford  $\alpha$ ,  $\beta$  und Gamma-Strahlung

1903 P. Curie et.al Wärmeentwicklung von Radiumsalzen

1903 Radon produziert Helium(Ramsay)

1903 Geigerzähler ( Hans Geiger+Rutherford)

1903 Szintillationszähler (Crookes, Regener)

ab 1900 Nebelkammer nach Wilson

1905 Einstein  $e = m c^2$

1912 - 1916 Wellenlängenbestimmung der Gammastrahlen durch v.Laue, Knipping, W. Bragg, Rutherford.

1911 Zerfallsgesetze (Soddy+Fayans) **Rutherfordsches Atommodell (aus Ablenkung von  $\alpha$ -Teilchen)**

1913 Isotope Elemente (Soddy / partiell Erklärung von Ergebnissen Hahn/Meitners)

**1913 Bohrsches Atommodell**

**1914 Moseley + van den Broek: Protonen + Neutralteilchen**

1919 erste künstliche Elementumwandlung durch  $\alpha$ -Teilchen (Rutherford) N zu O

1921 Kernisomerie (Hahn)

1922 Aston (Nobelpreis) Massenspektrograph, Masse von 2000 Isotopen bestimmt.

1930-34 **Neutronen** (Bothe, Becker, Joliot-Curie, CHADWICK)

**1932 Linearbeschleuniger(Cockroft+Walton) - Zyclotron (Lawrence)**

**1932 Deuterium (Urey)**

**1934 Aufbau des Atomkerns (Heisenberg - Gamov)**

**1934  $\beta^+$ - Zerfall (Joliot-Curie) Entdeckung des Positrons**

**1938 Kernreaktionen durch Anlagerung langsamer Neutronen**

(Fermi,Nobelpreis) Erzeugung von Transuranen

**1938 Hahn, Straßmann, - Meitner, Frisch - Kernspaltung**

1938 Bethe-Weizsäcker-Zyklus (Erklärung der Kernfusion in der Sonne)

## Kenntnisstand Mitte der 30er Jahre

**Atome bestehen aus einem positiv geladenem Atomkern** (Durchmesser ca.  $10^{-16}$  cm) **und der Elektronenhülle** (Durchmesser ca.  $10^{-8}$  cm). **Der Kern besteht aus positiv geladenen Protonen und neutralen Neutronen. Das einzelne Proton hat die relative Masse 1,00728, das einzelne Neutron die rel. Masse 1,00860.**

(Als Einheit der Atommasse gilt heute 1/12 der Masse des Kohlenstoffisotops 12, früher bezog man sich auf die Masse des Wasserstoffs, bzw. von Sauerstoff 16)

Ein Elektron hat die Masse 0,000549. Ein neutrales Atom enthält soviele Protonen im Kern wie Elektronen in der Hülle, die auf bestimmten Bahnen angeordnet sind. Die Elektronenhülle ist maßgebend für das chemische Verhalten.

**Die Zahl der Protonen im Kern bezeichnet man als Kernladungszahl Z.**  
**Die Summe der Protonen und Neutronen bezeichnet man als Massenzahl.**

**Atome mit gleicher Kernladungszahl, aber verschiedener Massenzahl bezeichnet man als Isotope.**

### Massendefekt:

**Die Masse eines Atomkerns ist ein wenig kleiner als die Summe seiner elementaren Bestandteile.**

**Bei der Bildung eines Atomkerns aus seinen elementaren Bestandteilen wird eine dem Massendefekt entsprechende Energiemenge frei.**

### Dies ist die Bindungsenergie des Kerns.

Die Bindungsenergie ist ein Maß für die Festigkeit des Kerns. Umgerechnet wird nach der Einstein'schen Formel  $E = m c^2$ . Ein Nukleon entspricht etwa 930 MeV.

**Trägt man die Bindungsenergie je Nukleon gegen die Massenzahl auf, so erhält man eine Kurve mit einem Minimum bei etwa der Masse 60.** (Entspricht dem Element Eisen )

**Wenn sich aus zwei leichten Atomkernen also ein schwererer Atomkern bildet, so müßte diese Fusion die Differenz der Bindungsenergien freisetzen.**

Solch einen Prozeß hatten Weizsäcker und Bethe Mitte der 30er Jahre als Energie liefernden Prozeß in der Sonne postuliert.

- Eine Spaltung (fission) eines sehr schweren Atomkerns, bei dem zwei leichtere Elemente als Reaktionsprodukt auftreten, sollte ebenfalls Energie freisetzen. Bis 1938 glaubte aber niemand, daß dies mit relativ einfachen Mitteln zu erreichen sei.  
 ( Ausnahmen: Ida Noddack 1936 - L. Szillard: Kettenreaktion!)

## Radioaktiver Zerfall

**Alle Atome mit einer Kernladungszahl höher als 83 sind radioaktiv.**  
(Radioaktiv sind auch je ein Kalium-, Rubidium-, u. Kohlenstoff-Isotop)

### $\alpha$ -Zerfall:

**Es wird ein  $\alpha$ -Teilchen emittiert, meistens auch ein Gammaquant.**

**$\alpha$ -Teilchen sind doppelt positiv geladene Heliumatome (2 Protonen+2 Neutronen).**

**Der Tochter-Kern hat eine Kernladungszahl, die gegenüber dem Mutterkern um zwei erniedrigt ist, seine Masse ist um vier erniedrigt.**

Das  $\alpha$ -Teilchen hat eine für das Nuklid charakteristische Energie, das gleiche gilt für das Gammaquant. Aus der Reichweite (Energie) kann die Halbwertszeit abgeleitet werden. Je höher die Energie, umso kürzer die Halbwertszeit. (Geiger+Nutall 1911)

Sargent 1933: Ähnliche Verhältnisse bei  $\beta$ -Zerfall:

**Kurze Halbwertszeiten= Energiereiche Strahlung !!**

### $\beta$ - Zerfall:

**Der Mutterkern emittiert ein Elektron und ein Gammaquant.**

**Der Tochterkern hat die gleiche Massenzahl wie der Mutterkern, aber eine um eins erhöhte Kernladungszahl.**

Praktisch ist ein Neutron in ein Proton umgewandelt worden. Das Gammaquant hat eine für das Nuklid charakteristische Energie, dagegen zeigen die emittierten Elektronen eine wiederum für das Nuklid charakteristische Energieverteilung. (Neutrino-Hypothese)

### $\beta$ + Zerfall:

**Der Mutterkern emittiert ein Positron.** (Masse wie Elektron, aber positiv geladen, praktisch wird ein Proton in ein Neutron umgewandelt) **Die Kernladungszahl des Tochterkerns ist gegenüber dem Mutterkern um eins erniedrigt, die Massenzahl bleibt unverändert.**

### K-Einfang:

Ein Elektron der innersten Elektronenbahn, der K-Schale, wird vom Kern aufgenommen. Dadurch wird ein Proton in ein Neutron verwandelt. Die Masse bleibt unverändert, die Kernladung erniedrigt sich um eins, also genau wie beim  $\beta^+$  -Zerfall! Die K-Schale wird durch Sprünge von äußeren Schalen aufgefüllt, dies führt zu einem charakteristischen Gamma-Spektrum. Da solche Stoffe reine Gammastrahler sind und meist die Strahlungsenergie relativ gering ist, werden sie bevorzugt in der Medizin benutzt.

### Das Zerfallsgesetz

Die Menge  $dN$  der in der Zeit  $dt$  zerfallenden Atome ist gleich der Zahl der ursprünglich vorhandenen Atome  $N_0$  mal einem für das Nuklid charakteristischen Koeffizienten  $\lambda$ .

$$dN/dt = N_0 \lambda \qquad N_t = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$\ln N_t/N_0 = -\lambda t$$

Die Halbwertszeit ist die Zeit, in der gerade die Hälfte der vorhandenen Atome zerfallen ist.

$$t_{1/2} = \ln 2/\lambda = 0,693/\lambda$$

Nach  $x$  Halbwertszeiten ist noch  $1/2^x$  der ursprünglichen Menge vorhanden.

**Faustformel: Nach 7 Halbwertszeiten sind noch etwa 1%, nach 10 Halbwertszeiten 0,1%, nach 20 Halbwertszeiten der  $10^{-6}$  te Teil vorhanden.**

Ein Nuklid wird gekennzeichnet durch das entsprechende chemische Elementsymbol, links davon wird die Massenzahl hochgestellt angegeben, die Kernladungszahl wird links tiefgestellt angegeben. - Da dies etwas umständlich ist und andererseits die Angabe der Kernladungszahl zusätzlich zum Elementsymbol, jedenfalls für Fachleute, überflüssig ist, wird oft nur der Elementname mit nachgestellter Massenzahl benutzt:

z.B. Uran 238 statt  ${}_{92}^{238}\text{U}$

Der radioaktive Zerfall wird in einem rechtwinkligen Diagramm übersichtlich dargestellt, aufgetragen wird die Kernladungszahl gegen die Neutronenzahl oder die Massenzahl. - Leider sind in den Lehrbüchern die Darstellungen nicht einheitlich, teils werden die Elemente durch Punkte, teils durch Kästchen markiert. Unterschiedlich wird auch die Kernladungszahl mal auf der Ordinate, mal auf der Abzisse aufgetragen! Theoretisch bis zu 16 verschiedene Darstellungsarten, am verbreitetsten ist die sogenannte **Nuklidkarte**.

### **Nuklidkarte:**

Auf der Ordinate wird die Protonenzahl (Kernladungszahl), auf der Abzisse die Neutronenzahl aufgetragen. - Schwarze Kästchen = stabile Nuklide / gelb= $\alpha$ -Zerfall/ blau= $\beta^-$  Zerfall / rot= $\beta^+$  Zerfall / grün=Spontanspaltung

Alle Elemente mit einer Kernladungszahl oberhalb 83 (Bi, Wismut) zerfallen radioaktiv durch mehrere  $\alpha$ - und mehrere  $\beta^-$ -Zerfälle bis ein stabiles Blei- oder Bi-Isotop erreicht wird. Da sich beim  $\alpha$ -Zerfall die Masse um 4 ändert, beim  $\beta^-$ -Zerfall aber überhaupt nicht, gibt es 4 verschiedene natürliche Zerfallsreihen.

Th232	(alle Massenzahlen = 4n)	(mit n = ungerade Zahl)
Np237	(alle Massenzahlen = 4n + 1)	(entsteht im Reaktor)
U238	(alle Massenzahlen = 4n + 2)	
U235	(alle Massenzahlen = 4n + 3)	

Einige kurzlebige Zwischenglieder dieser Zerfallsreihen zerfallen teils durch  $\alpha$ - , teils durch  $\beta$ -Zerfall (Sogenannter dualer Zerfall). Schließlich wird aber in jedem Fall, wenn auch auf verschiedenen Wegen, das gleiche stabile Endglied erreicht.

### Künstliche Radioaktivität

Durch Beschießung von Atomkernen mit Teilchen, insbesondere mit  $\alpha$ -Teilchen oder Neutronen, können neue Nuklide entstehen. Die neuen Nuklide können stabil oder radioaktiv sein, dies hängt ab von ihrer Stellung im Nuklidschema.

**freie Neutronen** sind radioaktiv, sie zerfallen mit einer Halbwertszeit von 11 min zu H.

Neutronen entstehen durch Kernspaltung oder künstl Kernprozesse:  ${}^9_4\text{Be} (\alpha, n) {}^{12}_6\text{C}$

Unterscheidung nach Geschwindigkeit, bzw. Energie:

Thermische N. ( $v = \text{ca. } 2000 \text{ m/sec}$  ; ca. 0,03 eV)

langsame N. 0 - 1000 eV

mittelschnelle N. 1 - 500 keV

schnelle N. 500keV - 10 MeV

**Zählung** : Zählrohr enthält Bortrifluorid  $\text{BF}_3$  , durch die Reaktionen

${}^{10}_5\text{B} (n, \alpha) {}^7_3\text{Li}$  (7%) und

${}^{10}_5\text{B} (n, \chi) {}^{11}_5\text{B}$  (93%) wird eine Ionisierung erreicht.

Möglichkeiten der Wechselwirkung mit Materie: (Die Wahrscheinlichkeit des Effekts wird angegeben durch den Streu-, bzw. Einfangquerschnitt, der von der Energie des Neutrons abhängt.)

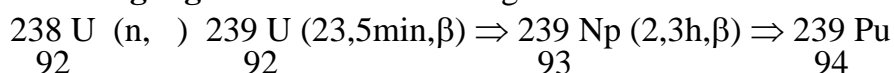
1.) Elastische **Streuung** , führt zu Energieverlust, ist am effektivsten bei kleinen Atommassen!

2.) **Einfang** und folgende Kernreaktion z.B.  ${}^1_1\text{H} (n, \chi) {}^2_1\text{D}$  bzw. Bor siehe oben.

Wichtig im Reaktor :

$135 \text{ J } (6,7\text{h}, \beta) \Rightarrow 135\text{Xe } (9,2\text{h}, \beta) \Rightarrow 135 \text{ Cs}$  Xenon 135 hat für thermische Neutronen einen Einfangquerschnitt von 3,5 Millionen barn !! nach :

$135 \text{ Xe } (n, \gamma) 136 \text{ Xe}$  Im Reaktorbetrieb ist die  $135\text{Xe}$ -Konzentration sehr klein, da es durch genügend vorhandene Neutronen sofort in  $136\text{Xe}$  umgewandelt wird. Wird der Reaktor abgeschaltet, so baut sich eine höhere Konzentration an  $135 \text{ Xe}$  auf, die ein Wiederaufstart verhindert, man muß warten bis es nach einigen Tagen zerfallen ist! Die vorstehend geschilderten Vorgänge führen dazu, dass in RBMK-Reaktoren bei niedrigen Leistungen plötzliche Energieexkursionen auftreten können und darum solche Betriebsbedingungen vermieden werden müssen!

**Brutvorgang:** Elementumwandlung durch Neutronenaufnahme

Große Einfangquerschnitte haben insbesondere Bor, Cadmium, Gadolinium.

**3.) Spaltung**

Spaltbar sind  ${}_{92}^{235}\text{U}$  ;  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$  und  ${}_{92}^{233}\text{U}$  (resultiert aus  ${}_{90}^{232}\text{Th}$  durch

Neutroneneinfang und zwei  $\beta$ -Umwandlungen mit 23min, bzw. 27d), sowie  ${}_{94}^{240}\text{Pu}$ ,  ${}_{94}^{241}\text{Pu}$ ,  ${}_{95}^{242}\text{Am}$  und  ${}_{98}^{251}\text{Cf}$ .

---

**30er Jahre - Die Entdeckung des Neutrons und die Folgen**

Frederic Joliot-Curie u. seine Frau Irene, (Schwiegersohn und Tochter von Marya Curie) variieren 1932 Experimente von Bothe, bei denen Neutronen entstehen. Bei der richtigen Erklärung kommt ihnen Chadwick zuvor! - 1933 weist Anderson das Positron nach, dem sie ebenfalls auf der Spur sind! - Erst ihre Experimente zur Erzeugung künstl. radioaktiver Elemente durch Anlagerung langsamer Neutronen werden 1935 mit dem Nobelpreis belohnt.

Ab 1934 bestrahlt Enrico Fermi, ein Schüler Bothes, in Rom Uran mit langsamen Neutronen und findet zahlreiche neue radioaktive Stoffe, offenbar Transurane. Er erhält den Nobelpreis 1938 und kehrt nicht in das faschistische Italien zurück, sondern geht nach Amerika an die Columbia-Universität.

In Berlin arbeitet seit 1907 Otto Hahn mit Lise Meitner zusammen, seit 1911 am Kaiser-Wilhelm-Institut für Physikalische Chemie in Dahlem. Hier arbeiten Hahn/Meitner u. Strassmann seit 1935 ebenfalls über die Neutronenanlagerung an Uran. - Lise Meitner verliert 1933 ihre Lehrberechtigung an der Uni weil sie Jüdin ist, kann aber bis zum sogenannten "Anschluß" Österreichs im März 1938 mit Hahn und seinem Assistenten Strassmann weiterarbeiten, da sie die österreichische

Staatsbürgerschaft besitzt. 1938 wird ihr auf Anweisung der SS die Ausreise verweigert, Hahn organisiert am 17.7.38 ihre Flucht über Holland nach Schweden, wo sie durch Vermittlung Niels Bohrs eine Arbeitsmöglichkeit bei Siegbahn erhält. - Hahn findet, dass sich ein radioaktives Erdalkalimetall (er hält es zuerst für Radium) das aus dem Uran entstanden ist, nicht durch Fraktionierung vom zugesetzten Barium trennen läßt. Er teilt dies am 19.12.38 Meitner in Stockholm mit, sie kommt in der Diskussion mit ihrem Neffen R.O. Frisch (Kopenhagen) zu dem Schluß, daß der beschossene Urankern zerplatzt sein muß und ein radioaktives Ba-Isotop eines der Spaltprodukte ist! Die entsprechende Publikation von Hahn/Strassmann erscheint am 6-1-39 in den "Naturwissenschaften".

Joliot-Curie nimmt an, daß bei der Kernspaltung mehr Neutronen entstehen als verbraucht werden, dies wird von mehreren teams, darunter Meitner/Frisch nachgewiesen. Damit sind mindestens theoretisch Atombombe und Kernreaktor möglich geworden! Angesichts des drohenden Krieges zwischen Nazi-Deutschland und Polen + Frankreich + England nicht nur für Hahn eine Horrorvorstellung; im Februar 39 äußert Hahn im Gespräch mit Weizsäcker " Wenn meine Entdeckung dazu führen sollte, daß Hitler eine Atombombe bekommt, begehe ich Selbstmord."

In Amerika bewegt Leo Szillard, ein Schüler Heisenbergs, den berühmtesten Wissenschaftler des Jahrhunderts, Albert Einstein zur Absendung eines Briefs an den Präsidenten F.D. Roosevelt in dem er auf die Möglichkeit der Entwicklung einer Atombombe hingewiesen wird. (Am 2-8-1939). Tatsächlich wird das "Manhattanprojekt" aber erst am 6.12.1941 beschlossen.

In Frankreich sorgt Joliot-Curie dafür, daß alle Vorräte an Uran und schwerem Wasser rechtzeitig und erfolgreich vor den Deutschen versteckt werden. Nach Kriegsende entwickelt er unabhängig von den USA bis 1948 einen französischen Kernreaktor. Da er sich während des Krieges in der Resistance den Kommunisten angeschlossen hatte, wird er 1950 aus allen Ämtern entlassen.

In Deutschland wird erst 1942 über die "Nutzung" der Kernenergie entschieden. Da Heisenberg für eine Atombombenentwicklung einen Aufwand von einigen Milliarden Mark und mindestens 3 bis 4 Jahre veranschlagt, wird nur die Entwicklung eines energieliefernden Reaktors in Auftrag gegeben.

Bis Mitte 1942 war es Hahn gelungen seine laufenden Ergebnisse zu veröffentlichen. 1943 wird er Mitglied der Königlich Schwedischen Akademie der Wissenschaften, der Nobelpreis 1944 für Chemie wird für ihn reserviert, die Entscheidung wird ihm vertraulich mitgeteilt, aber erst nach Kriegsende publiziert. (Deutschen Staatsbürgern war es in NS-Deutschland verboten einen Nobelpreis zu akzeptieren!)

Das **Manhattanprojekt** wurde am 6.12.1941 beschlossen als der Krieg der USA mit Japan unausweichlich schien. Einen Tag später erfolgte der japanische Angriff auf Pearl Harbour, am 11.12.41 erklärten Deutschland u. Italien den USA den Krieg. (300 000 Beschäftigte, davon 70 000 Wissenschaftler, Kosten etwa 10 Milliarden Schweizer Franken. Leitung J.O.Oppenheimer, der in Göttingen promoviert hatte. Beteiligt u.a. Chadwick, Fermi, James Franck, Hans Bethe, Leo Szillard, Edward Teller, R.O.Frisch, Klaus Fuchs)

Am 2.12.42 wurde ein von Fermi in Chikago gebauter Reaktor erstmals kritisch. Hanford : Reaktoren zur Pu239-Erzeugung / Clinton Engineering Works: Anlagen zur Uran-Isotopen-Trennung. Ab März 1943 Bombenlabor in Los Alamos. Anfang 1945 standen jeweils genügende Mengen an hochreinem Pu 239, bzw. U 235 für den Bau mehrerer Bomben zur Verfügung.- Trinity Test: Erste Versuchsexplosion am 16.7.45 bei Alamogordo in der Wüste von Neu-Mexiko. Drei Wochen später, am 6. und 9. August fielen die Bomben auf Hiroshima und Nagasaki. - Am 10.8.46 kapitulierte Japan bedingungslos.

Im August 1949 erster Atombombentest der Sowjetunion.

1.11.52 erster Wasserstoffbomben-Test der USA über dem Elugelab-Atoll

1955 erster H-Bombentest Sowjetunion

1963 Abkommen über den Stopp oberirdischer Atomtests (J.F.Kennedy) bis dahin über **250 Tests in der Atmosphäre.**

1968 Kernwaffensperrvertrag

bis heute insgesamt **2055 Atomtestexplosionen! (40-50 Megacurie)**

Wettrüsten bis Mitte der 80er Jahre - ab 1954 ⇒ Atom-U-Boote

1989 hatte die Sowjetunion ca. 153 Atom-U-Boote.

(1990: Insgesamt ca. 50.000 Nuclearsprengköpfe weltweit!!)

Dwight D.Eisenhower (US-Präsident 1953-1961) Kritik am Militärisch-Industriellen Komplex aus Rüstungsindustrie + Generalstab, der ständig mehr Geld forderte - Eisenhower forderte verstärkte friedliche Nutzung der Kernenergie

**Erstes ziviles KKW in USA 1951/ Sowjetunion 1954 / D: Versuchsreaktor 1958**

1961-65 erstes KKW Grundremmingen - Anfangs Widerstand der Energieversorgungs-Unternehmen. - KKW's waren nur durch massive Subventionierung u. politischen Druck durchsetzbar! (SPD/FDP-Koalition unter Helmut Schmidt unter dem Eindruck der ersten „Ölkrise“)

(Hochtemperaturreaktoren : THTR Hamm-Uentrop 1981 auf Vorschlag eines Heisenberg-Schülers)

**Curie =  $3,7 \times 10^{10}$  Zerfälle pro sec** entspricht 1 g Radium 226

**Becquerel = 1 Zerfall pro sec**

Für eine gegebene Menge eines Isotops läßt sich der Wert über Halbwertszeit bzw. Zerfallskonstante und Atomgewicht errechnen.- Damit ist noch nichts ausgesagt über die physikalische, bzw. biologische Wirkung, da kein Unterschied gemacht wird ob beim Zerfall  $\alpha$ ,  $\beta$  oder Gamma-Strahlung auftritt und welche Energie die Strahlung hat!!

**Wirkungen werden über ihre Ionisierungsleistung bestimmt!**

**1 Röntgen (R) ist diejenige Dosis einer Gammastrahlung die durch Ionisierung bei Absorption in 1 g Luft 84 erg, bzw. in 1 g Wasser 94 erg erzeugt.**

**radio absorbed dose = rad / 1 rd = ist die Dosis einer beliebigen Strahlung, durch die in 1 kg des bestrahlten Stoffes die Energie 0,01 Wsec absorbiert wird.**

Später Einführung von neuer Einheit **Gray (Gy) = 100 rad.**

Trotz gleicher Ionisierungsleistungen haben verschiedene Strahlungsarten unterschiedliche biologische Wirksamkeit, besonders  $\alpha$ -Teilchen und Neutronen haben eine bis zu 20fach stärkere Wirkung!

**Durch Multiplikation von rad mit entsprechenden Faktoren entsteht = rem (roentgen equivalent man)**

**1 rem ist die Dosis einer Strahlung, welche die gleiche biologische Wirkung hervorruft wie 1 rad harter Gammastrahlung.**

Später Einführung einer neuen Einheit: **Sievert (Sv) = 100 rem**

**Um im Wirrwarr zurechtzufinden zwei Faustregeln :**

**1 Curie erzeugt in 1 m Abstand innerhalb 1 Stunde die Dosis von 1 Röntgen.**

**Für Gammastrahlen bei Einwirkung auf biologisches Gewebe gilt 1 Röntgen entspricht etwa 1 rad, bzw. 1 rem, bzw. 0,01 Sv.**

$\alpha$ -Teilchen sind außerhalb des Körpers wegen ihrer kurzen Reichweite in Luft relativ ungefährlich, bei Inkorporation sind sie wegen der bis zu 20fach höheren Wirksamkeit extrem gefährlich. Einführung von biologischer Halbwertszeit, bzw. effektiver Halbwertszeit ( Im ersten Fall wird die Ausscheidung aus dem Organismus, im zweiten Fall wird zusätzlich die Abnahme durch Zerfall berücksichtigt.)

### **Reichweiten in Luft**

radioaktiver Strahlungen, bzw. Teilchen sind abhängig von ihrer Energie.

- $\alpha$ -Strahlen im Bereich cm
  - $\beta$ -Strahlen im Bereich Dezimeter bis einige Meter
  - Gammastrahlen im Bereich einige Meter bis hunderte von Metern.
- Neutronen haben in Luft höhere Reichweiten als Gammastrahlen.

Bei großen Reichweiten (Neutronen, Gammastrahlung) ist zu berücksichtigen, daß die Intensität mit dem Quadrat des Abstands von der Strahlenquelle sinkt.

### **Abschirmung**

bei  $\alpha$ -Strahlen genügt schon dickes Papier, bei  $\beta$ -Strahlen einige mm Plexiglas, bzw. Glas oder Metall.

Bei der Wechselwirkung von Gammastrahlen mit Materie konkurrieren Photoeffekt, Comptonstreuung und Paarbildung miteinander.  $I = I_0 e^{-\mu x}$   
 $x$  = Schichtdicke /  $\mu$  = Schwächungskoeffizient (ist abhängig von Materialart u. der Energie der Strahlung) - Je höher die Kernladungszahl  $Z$ , und damit die Zahl der Elektronen des Materials, umso besser die Abschirmung. Häufig verwendete billige Materialien: Blei und Bariumsulfat. Am effektivsten wäre Uran!

Neutronen passieren dagegen schwere Atome relativ wenig behindert, zuverlässige Abschirmung durch H-haltige Substanzen wie Wasser, Polypropylen, Titanhydrid, bzw. durch Borkarbid, Cadmium oder Gadolinium-Verbindungen.

**Die Gesundheitsgefahren durch Radioaktivität sind bis etwa Mitte des 20. Jahrhunderts stark unterschätzt worden, dies gilt sowohl für den zivilen als den militärischen Bereich!!**

**Uran und Thorium in Gesteinen**

Häufigkeit in der Erdkruste: Uran 2 - 3 ppm , Thorium ca. 10 ppm  
(Etwa so häufig wie Zinn, häufiger als Hg,Ag,Au,Sb,Bi+Pt zusammen!)

Vorkommen in Kristallen : Zirkon  $ZrSiO_4$  , Monazit  $CePO_4$  (Th,bzw U als isomorpher Ersatz von Zr, bzw. Ce), Uraninit  $UO_2$  , Brannerit  $UTi_2O_6$ , Coffinit  $USiO_4$ .

Die drei zuletzt genannten Minerale oxydieren an der Erdoberfläche. Das 6wertige Uran liegt dann als  $UO_2$ -Ion vor; es passt in keinen bekannten Gittertyp, es bilden sich typische Uranylminerale (über 100 bekannt). Bei Gegenwart von Phosphat-Ionen bilden sich schwerlösliche Uranglimmer. (Das sind keine Silikate, sondern Phosphate!)

Die stark strahlenden Zerfallsprodukte der Zerfallsreihen des  $U^{238}$ , des  $U^{235}$  und des  $Th^{232}$  bleiben im Kristallgitter "gefangen". (Darauf beruht u.a. die Altersbestimmung nach der Uran-Blei-Methode!) Eine Freisetzung der Tochternuklide, insbesondere des Radon  $^{222}$  aus der  $U^{238}$ -Reihe mit der Halbwertszeit 3,8 d erfolgt nur an der Oberfläche des Minerals und bei Verwitterung. (Auch nach dem Zerfall des Radons in der Atmosphäre sind die Folgeprodukte als Ultra-Nanoteilchen lungengängig. Erst durch Tau, Regen und Nebel werden sie aus der Luft entfernt.)

Beim Uran-Bergbau wird das Kristallgitter bei der chem. Aufbereitung zerstört und die Tochternuklide bleiben im Abfall zurück. Die Folge ist eine gegenüber dem unverletzten Erzkörper verstärkte Radon-Freisetzung. (Die Radon-Isotope  $^{220}$  aus der  $Th^{232}$ -Reihe, bzw.  $Rn^{219}$  aus der  $U^{235}$ -Reihe sind wegen ihrer kurzen Halbwertszeiten von 55 sec, bzw. 4 sec weniger gefährlich)

Radon  $^{222}$  verursacht etwa 1/3 der derzeitigen mittleren Strahlenbelastung der Bevölkerung ! - Wie hoch die Radonbelastung ohne Urangewinnung und Bearbeitung wäre ist nicht bekannt. (  $Rn^{222}$  wird auch beim Kohlebergbau freigesetzt!)

Die Erfahrung, dass radioaktive Elemente samt ihren Zerfallsprodukten in Kristallgittern über geologische Zeiten (mehrere Mio a) hinweg sicher eingeschlossen werden können, führte zu Vorschlägen dies als "Matrixbarriere" bei der Lagerung hochaktiver Abfälle zu nutzen. (Ringwood u. a.)

Reines Uran ist wie alle Schwermetalle bei Inkorporation in löslicher Form giftig, die Giftwirkung wird etwas höher als bei Quecksilber eingeschätzt. (Problem: Nutzung von abgereichertem Uran in Trägheitsgeschossen - Golfkrieg 1991 und 2003)

## Kernspaltung (fission)

Spaltbare Isotope haben die Eigenschaft nach Einfang eines "thermischen" Neutrons in zwei Kerne zu zerfallen. (Die Einfangwahrscheinlichkeit ist für thermische Neutronen etwa 1000 mal höher als für schnelle Neutronen.) Die Tochterkerne sind radioaktiv, in der kurzfristigen Stoffbilanz der Zerfallskette treten im Mittel bei U 235 2,5 Neutronen, bei Pu 239 sogar etwa 3 Neutronen und eine Massendifferenz von etwa 0,22 u auf. ( 1 u = Masse eines Nukleons)

Diese Massendifferenz tritt zu etwa 90% als Wärme und 10% als  $\beta$ - und Gamma-Strahlung auf. ( Die Wärmeproduktion von 1 kg spaltbarem Material ist etwa so groß wie der Heizwert von 2500 t Kohlenstoff. )

Die Tochterkerne verteilen sich über die Ordnungszahlen 34(Se) bis 68(Er).

Die Häufigkeitsverteilung entspricht einer Kurve mit zwei Maxima.

(Hauptbestandteile: Seltene Erden, Zirkonium, Molybdän, Cäsium, Barium, Strontium, Krypton, Ruthenium, Palladium und Technetium. )

Spaltbare Isotope sind U 235 ( Zu 0,7% in Natururan enthalten) und Pu 239, das durch Neutroneneinfang aus Uran 238 im Kernreaktor gebildet wird.

Da mehr Neutronen pro Zerfall freiwerden, als pro Zerfall benötigt werden, kann eine Kettenreaktion eintreten:

Ungebremste Kettenreaktion = Atombombe (Ablauf in Bruchteilen einer Sekunde, Neutronendichte nimmt Lawinenartig zu. )

In jedem System in dem eine Kettenreaktion stattfinden soll, muß berücksichtigt werden, daß Spaltneutronen im Prinzip durch vier Vorgänge aus dem System verschwinden können:

1. Einfang durch Uran 238 ohne Spaltung
2. Einfang durch Verunreinigungen im System
3. Austritt aus dem System
4. Einfang durch U 235 oder Pu 239 unter Spaltung

Eine Kettenreaktion ist nur möglich, wenn 4. eine höhere Wahrscheinlichkeit hat, als die drei anderen zusammengenommen. - (Eine Masse die bei kugelförmiger Anordnung dieser Bedingung genügt wird als kritische Masse bezeichnet)

(Bomben :Etwa 15 kg reines U 235 = Kugel mit 12 cm Durchmesser bzw. etwa 6 kg Pu 239/8 cm)

Kontrollierte Kettenreaktion = Kernreaktor ( Neutronendichte bleibt gleich)

Die Steuerung der Kettenreaktion im Reaktor ist möglich durch drei Faktoren:

1. Verlangsamung durch verzögerte Neutronen. Etwa 0,7 % aller Neutronen werden erst durch Zerfallsreaktionen der Tochterkerne mehrere Sekunden später frei.
2. Steuerung durch Neutronenabsorption. ( Bor, Kadmium in Form von Steuerstäben)
3. Selbstregulierung durch Temperatureinfluß ( Mit steigender Temperatur nimmt der Vermehrungsfaktor ab. Der Vermehrungsfaktor ist das Verhältnis der Neutronendichte in zwei aufeinanderfolgenden "Generationen". )

Da vorzugsweise langsame, "thermische" Neutronen zur Spaltung führen, werden im Reaktor die schnellen Neutronen durch "Moderatoren" gebremst. Mögliche Moderatorelemente sind: H, D und C, bzw. Be.

Natururan kann nur mit C oder D als Moderator benutzt werden! Wasser als Moderator wird möglich, wenn der Gehalt an U 235 durch Anreicherung auf 1,5 bis 3% gesteigert wird.

**Anreicherung** (Meist auf 3% U235):

- Durch Gasdiffusion: Ca. 1200 Diffusionsschritte nötig, 10.000 KWh pro 1 kg, dabei werden ca. 5% der später gewinnbaren Energie verbraucht, das kostet ca. 700 US-Dollar pro kg.
- Gaszentrifuge: Nur 10 Trennschritte- 0,25% rel. Energieverbrauch - 50 US-Dollar/kg. - Allgemein gebräuchlich, ist wahrscheinlich technisch am einfachsten zu beherrschen.
- Laseranregung + chem. Reaktion: Energieverbrauch u. Kosten ähnlich wie Gaszentrifuge?.
- Trenndüsen-Verfahren, wahrscheinlich ähnlich Zentrifuge

Durch Einfang von Neutronen durch U 238 werden Pu 239 (u. andere Pu-Isotope) gebildet, dadurch kann der "Abbrand" gesteigert werden.

Trotzdem sind nur etwa 70 - 80 % des spaltbaren Materials nutzbar, da einige Spaltprodukte einen so hohen Neutroneneinfangquerschnitt haben, dass die Kettenreaktion zum Stillstand kommt.

Ein grosser Anteil der Wärmeproduktion tritt erst verzögert beim radioaktiven Zerfall der Tochterkerne auf, deshalb muss ein Reaktor, auch nach Unterbrechung der Kettenreaktion durch volles Einfahren der Steuerstäbe, noch weiter gekühlt werden, sonst heizt er sich auf und das spaltbare Material schmilzt!! Dabei würden erhebliche Anteile der Spaltprodukte gasförmig und als Schwebstoffe freigesetzt.

( core melt = Größter anzunehmender Unfall = GAU ) Dies trat beim Tschernobyl-Reaktor 1986 während eines Tests ein.

Beim Totalausfall aller Kühlmittelpumpen eines wassergekühlten Reaktors durch Sabotage oder Unfall tritt innerhalb von Stunden ein GAU ein. (Gilt für **alle** derzeit existierenden flüssigkeitsgekühlten Reaktoren!) Die Notkühlaggregate sind deshalb mindestens dreifach redundant ausgelegt.

Die "abgebrannten" Brennstäbe eines Reaktors haben bei der Entnahme eine Aktivität von etwa  $10^6$  Curie/t, d.h. sie sind etwa so radioaktiv wie reines Radium! Sie werden daher im Kernkraftwerk für eine gewisse Zeit (2 bis 50 a) in Abklingbecken unter Wasser aufbewahrt. - Außer den Spaltprodukten, dem Uran 238, dem nicht umgesetztem Spaltisotop U 235 und dem durch Neutroneneinfang aus U 238 gebildetem Plutonium 239 enthalten die Brennstäbe noch andere Pu-Isotope, Np 237, Am 243 und geringe Mengen anderer Transurane; diese sind meist  $\alpha$ -Strahler. (Gesamtmenge der Transurane etwa 1% der Masse)

Radioaktive Isotope können nicht vernichtet werden. (Unwichtige Ausnahme: Transmutation) - Man muß den natürlichen Zerfall abwarten: Nach 10 Halbwertszeiten ist noch 1/1000 der ursprünglichen Menge vorhanden, nach 20 Halbwertszeiten der  $10^{-6}$  Teil.

#### Halbwertszeiten einiger Nuclide in abgebrannten Brennstäben

Nuclid	T 1/2	
Sr 90	28,5 a	
Cs 137	30,17 a	
J 129	$1,57 \times 10^7$ a	
Pu 239	24110 a	
Np 237	$2,1 \times 10^6$ a	
Am 243	7370 a	
Tc 99	$2,1 \times 10^5$ a	
Zr 93	$1,5 \times 10^6$ a	
Tritium (H3)	12,3 a	(Gas!)
Kr 85	10,8 a	(Gas!)

Man müßte eigentlich die abgebrannten Brennstäbe etwa 100 a unter Wasser zwischenlagern und dann den radioaktiven Abfall so lagern, daß er für mindestens 0,5 Millionen Jahre sicher vom biologischen Kreislauf getrennt bleibt! (Kein Kontakt mit Grund- oder Oberflächenwasser)

Es gibt hierfür zwar zahlreiche Vorschläge, bislang wurde aber keine Tonne Material dieser Art derart bearbeitet und gelagert, **alle** Abfälle der Kernenergienutzung sind derzeit provisorisch zwischengelagert. (Dabei ist die Bezeichnung provisorisch in einigen Fällen, insbesondere bei Anlagen in der ehemaligen Sowjetunion, eine freundliche Umschreibung für eine verantwortungslose Schlamperie!)

Aus den oben gemachten Ausführungen geht klar hervor, dass die Kosten der Endlagerung der radioaktiven Abfälle praktisch von den kommenden Generationen aufgebracht werden müssen. Die Energieversorgungsunternehmen in Deutschland sind verpflichtet für diese Ausgaben Rücklagen zu bilden ( Etwa knapp 0,005 € pro KWh). Bis 1998 summierten sich diese Rücklagen bei den EVU's in Deutschland auf etwa 55 Milliarden DM. - Für 2003 wurde ein Wert von 31,4 Milliarden € angegeben. In Deutschland können die Unternehmen die Rücklagen am Kapitalmarkt frei anlegen, dagegen müssen in den USA und neuerdings auch in der Schweiz entsprechende Rücklagen in einen kontrollierten Fond eingezahlt werden! - Es gibt Bestrebungen in der EU einen kontrollierten EU-Fond dafür einzurichten. (Erbitterter Widerstand der deutschen Kernenergiebetreiber!)

## **Transmutation**

Als Transmutation wird die Elementumwandlung durch Aufnahme eines Neutrons bezeichnet. Primär entsteht ein um eine Massenzahl schwereres Isotop des gleichen Elements, das aber einer anderen Zerfallsreihe angehört falls die Kernladungszahl höher als 83 ist. Es ist ebenfalls radioaktiv.-

Im Reaktor entstehen so aus  $U^{238} \Rightarrow U^{239}$  und daraus durch zwei  $\beta$ -Zerfälle  $Pu^{239}$ .

Es wird immer wieder propagiert, dass man durch eine Transmutation  $Pu^{239}$  und  $Np^{237}$  in Isotope umwandeln kann, die sehr viel schneller in Uran-Isotope zerfallen, als diese beiden Isotope. - Das ist im Prinzip richtig, aber:

Dazu müssten diese Elemente erst relativ rein isoliert werden und dann einer geeigneten sehr intensiven Neutronenstrahlung ausgesetzt werden; selbst dann wäre die Umwandlung nicht quantitativ! Es müssten spezielle Neutronenquellen wie z.B. Reaktoren gebaut werden und spezielle Trennverfahren angewendet werden. Selbst dann wäre ein Zeitraum von weit über 1000 Jahren nötig bis ein erheblicher Teil der Pu und Np-Isotope zu Uranisotopen zerfallen wären. - Die Kosten sind bislang nur abgeschätzt worden, wären aber durch die bisher angesammelten Rücklagen sicher nicht gedeckt.

(Rücklagen gibt es überdies nur in westlichen Industrieländern!!)

## "Natur-Reaktor" Oklo

Oklo , Gabun, Westafrika Uranlagerstätte - Uraninit-Imprägnation in Sandstein / Vor ca. 2 Milliarden a lag der U 235-Gehalt wegen der unterschiedlichen Halbwertszeiten der U-Isotope damals noch bei ca. 3% ! Mit Wasser als Moderator im porösen Gestein liefen Kettenreaktionen ab, bis der U 235 -Gehalt auf etwa 0,5% gefallen war. Dauer wird auf 200.000a geschätzt. - Ist als Nachweis einer Unschädlichkeit völlig ungeeignet: Es gab vor 2 Milliarden Jahren wahrscheinlich noch kaum Sauerstoff in der Atmosphäre und die Biosphäre bestand ausschließlich aus Einzellern im Meer!

## Reaktortypen

Zu unterscheiden nach:

- Anreicherungsgrad des Urans, bzw. Pu-Gehalt
- Moderator (Wasser, schweres Wasser, Graphit, bzw. Beryllium)
- Kühlmedium (Flüssig: Wasser, schweres Wasser, Natrium oder Gas: He oder CO<sub>2</sub>)
- Brennstoffanordnung ( Fest, Lösung, Suspension)

Bei Leistungsreaktoren wird immer Dampf erzeugt, der eine Turbine antreibt, die etwa 40% der Wärmeenergie des Dampfes in Elektrizität wandelt. - 60% der Wärme wird per Kühlturm an die Atmosphäre oder das Flusswasser abgegeben.

Alle flüssigkeitsgekühlten zivilen Reaktoren haben einen dichten, druckfesten Stahlmantel und einen dicken Betonmantel. (Ausnahme RBMK-Reaktoren der ehemaligen USSR!)

Die Wahrscheinlichkeit einer Kernschmelze wurde Ende der 70er Jahre im sog. Rasmussen-Report auf einmal in 17.000 Betriebsjahren angegeben, neuere Berechnungen für die derzeit betriebenen Druck- und Siedewasser-Reaktoren liegen zwischen 0,1 bis 1 Mio. Jahre!

(1979 "Three Mile Island" Harrisburg, USA. - Keine Beschädigung des containments)

Eine Kernschmelze kann nicht eintreten bei **Hochtemperaturreaktoren** geringer Leistung (100 - 300 MW<sub>e1</sub>) mit He-Kühlung. Prinzipiell kann durch eine SiC-Beschichtung der Graphit-Brennstoff-Mischung auch bei Lufteinbruch ein Abbrennen des Graphits verhindert werden.

(Deutschland: 15MV-Forschungsreaktor in Jülich (1967 - 1988) / THTR-Hamm-Uentrop 1983 - 1988!! - Aufgegeben wegen Mangel an Interesse der Deutschen Atomindustrie)

Je ein Reaktor in Japan und China im Bau. - Pläne existieren in USA+Rußland in solchen Reaktoren Waffenplutonium zu vernichten. - Weiterer Vorteil: „Abgebranntes“ Material ist extrem korrosionsfest, es lässt sich nur in speziellen Anlagen unter extremen Kosten auflösen und wieder aufarbeiten.

## Tschernobyl

RBMK-Reaktor (high-power channel reactor): Graphitblock von 12 m Durchmesser und 7 m Höhe, vertikal von 1700 wassergefüllten Druckröhren (65 bar, 280°C) durchzogen. In den Druckröhren die Brennelement-Stäbe. - 211 Kontroll-Stäbe, die Verschiebungsgeschwindigkeit der Kontroll-Stäbe war 40 cm/sec, d.h. ein voll ausgefahrener Kontrollstab braucht ca. 18 sec. zum voll einfahren!! Die ganze Anordnung in einem Stickstoff-gefülltem Stahlblechmantel, oben abgedeckt mit einer dicken Stahlplatte (2000 t). Kein Containment!!  
Insgesamt gab es 16 solcher Reaktoren. Diese Reaktoren in Russland sind als 4er- oder 2er-Blöcke ausgelegt. (Chernobyl-Ignalina-Smolensk-Kursk-Leningrad)

Vorteile: Brennstäbe können während des Betriebs gewechselt werden, deshalb Betrieb ohne Unterbrechung möglich und günstig für Brütung von Pu 239 - Reaktor war leicht mit konventioneller Technik zu fertigen. - Geringere Anreicherung an U235 nötig.

Nachteile: Wasser siedet in Druckröhren auf, Dampfblasen führen zur Erhöhung des Neutronenflusses. (Positiver Void-Koeffizient) - Kein Scram vorgesehen!

Aufgrund der Konstruktion der Kontrollstäbe kam es beim Einfahren der oberen Kontrollstäbe zuweilen zu einer Erhöhung des Neutronenflusses, wenn diese vorher voll ausgefahren waren! Dies war den Konstrukteuren bekannt, eine entsprechende Anweisung an das Bedienungspersonal ist aber auf dem Weg durch die Bürokratie liegen geblieben.

Am 26. April 1986 gegen 1:23 Uhr betätigte während eines Tests, bei voll ausgefahrenen oberen Regelstäben, die Bedienungsmannschaft des Blocks 4 den emergency button, da sich die Leistung plötzlich steigerte. (Normalleistung 3200 MW) Drei Sekunden nach dem Drücken lag die Leistung nach der Anzeige des Kontrollsystems bei 520 MW, nach fünf Sekunden explodierte der Reaktorblock (Knallgasexplosion!), die Untersuchungskommission schätzte die Leistung in diesem Moment auf 200 bis 300 mal höher als Normalleistung!

Die offizielle sowjetische Untersuchungskommission gab dem Bedienungspersonal die Alleinschuld, die Internationale Atomenergiekommission in Wien hat dies akzeptiert. - Die gegenteiligen Feststellungen von V.M.Chernousenko, Wissenschaftlicher Direktor in der Ukrainischen Akademie der Wiss., einer der Leiter der Aufräumarbeiten, niedergelegt in seinem Buch "Chernobyl-Insight from the inside" Springer-Verlag 1991 wurden weder von der Regierung Russlands noch der Atomenergiekommission je kommentiert! - Eine realistische Einschätzung und Schilderung der Ursachen erfolgte erst 2006 in einem Bericht der Strahlenschutzkommission des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Heft 50 (2006).

Die Explosion zerstörte das Reaktorgebäude; Teile des Graphitblocks und der Reaktorstäbe wurden auf das Dach des Nebengebäudes und in die Umgebung

geschleudert und der restliche Graphit geriet in Brand. Der Brand auf dem Dach des Nachbargebäudes wurde durch die Feuerwehr gelöscht, der brennende Graphit wurde durch Abwurf von Sand, Dolomit und Blei von Hubschraubern aus bekämpft und erlosch schließlich nach 11 Tagen. - Da wahrscheinlich der gesamte Graphit verbrannte und die Nachwärme der Zerfallsprodukte eine weitere Temperaturerhöhung bewirkte, muss angenommen werden, dass praktisch alle Brennelemente geschmolzen sind. - Eine Zone von 30 km rund um den Reaktor wurde völlig evakuiert (116.000 Personen).- In unmittelbarer Nähe des Unglücksortes wurden Dosen von 30 bis über 200 Röntgen pro h gemessen. Der Einsatz von Robotern scheiterte, alle elektrisch oder elektronisch betriebenen Teile fielen nach kurzer Zeit aus (Ionisierung).- Aufräumungsarbeiten durch Kurzeinsatz von Armee-Angehörigen (4 min bis 2 Tage) (Dach: pro Mann 1,5 - 3,5 min, Bewegung von 10-50 kg Graphit, bzw. Hüllrohre!! - Kalkulation im Mittel 20 rem pro Person)

Um das Fundament zu sichern, wurde ein Tunnel gegraben (Mit Hacke, Schaufeln und Schubkarre!) Anschließend wurden alle kontaminierten Teile in der Umgebung vergraben und ein "Sarkophag" konstruiert, mit Betonwänden an der Seite und einem Dach aus Stahlrohren, bedeckt von Blechen. Beteiligt etwa 400 bis 700 Tausend Personen, meist Freiwillige. ("Liquidatoren") Die Angaben schwanken, da teils nur die direkt am Reaktor beschäftigten Personen gezählt werden, teils die in der 30 km-Zone eingesetzten Personen mitgezählt werden. Es standen nicht genügend Dosimeter zur Verfügung, um alle eingesetzten Personen zu überwachen, teilweise versagten die Dosimeter, da sie nicht für derartig hohe Dosen ausgelegt waren! Da das Dach nicht wasserdicht war, wird z.Zt. ein neuer „Sarkophag“ geplant. Internationale Beteiligung und Finanzierung!! Schätzung der Kosten: 1,1 Milliarden US-Dollar bei ca. 100 a Lebensdauer!

Die freigesetzte Menge Radioaktivität kann nur abgeschätzt werden, die publizierten Daten schwankten zwischen 4% und 40% des Gesamtinventars, also um eine Größenordnung! (Gesamtinventar ca. 6 GCi)

Weite Teile Weißrußlands, der Ukraine und Rußlands wurden vorwiegend durch radioaktives Cs belastet, die Angaben für die Flächen die mit 1 Ci und mehr pro Quadratkilometer belastet sind, schwanken zwischen 32.500 km<sup>2</sup> (Deutsche industriefinanzierte Studie 1998) und über 200.000 km<sup>2</sup> (Botschafter der Ukraine in den USA in Spektrum der Wiss. 1997) Die Internationale Atomenergiekommision gab 38.900 km<sup>2</sup> an die mit mehr als 5 Ci belastet sind!

Die Zahl der innerhalb kürzerer Zeit an Strahleneinwirkung verstorbenen Personen schwankt je nach Quelle zwischen 28 und 39 Personen, darunter viele Feuerwehrleute und alle Tiefbauarbeiter, sowie viele Hubschrauberpiloten. Da die evakuierten Personen u. "Liquidatoren" praktisch sich auf fast die gesamte Sowjetunion verteilten, sind wirklich verlässliche Angaben nicht erfaßbar.

Eine industriefreundliche Studie spricht von 1245 Fällen von Schilddrüsenkrebs bei Kindern und 200 Strahlen-Kranken, eine ukrainische Angabe von 30.000

strahlenbedingten Erkrankten unter 400.000 "Liquidatoren", davon 5000 Fällen von Erwerbsunfähigkeit. - Greenpeace verglich die Sterblichkeit vor 1986 mit der nach 86 und kommt so zu 32.000 Toten bis 1997.

Bislang sind 10 Reaktorunfälle mit erheblicher freigesetzter Radioaktivität bekannt geworden.

---

## Radioaktive Abfälle

Es gibt prinzipiell zwei Wege mit den "abgebrannten" Brennelementen nach einer Zwischenlagerung unter ca. 10 m Wasser im **Abklingbecken** des KKW's umzugehen:

### 1. Direkte Zwischenlagerung

Die Brennelemente werden direkt oder nach mechanischer Zerkleinerung in möglichst korrosionsfeste Behälter gefüllt und so gelagert. (In Overheads als Brennelemente ohne Wiederaufarbeitung = **BROW** gekennzeichnet.)

### 2. Wiederaufarbeitung

Die Brennelemente werden zerkleinert, in Salpetersäure gelöst, aus der Lösung wird das Uran und das Plutonium durch Extraktion weitgehend entfernt. - Die Restlösung enthält neben den Spaltprodukten Reste von Uran und Plutonium und alle übrigen Transurane (Np, Am, Cf, Cm), sie wird in ein Borosilikatglas eingeschmolzen.

(In Overheads als high active waste = **HAW** gekennzeichnet)

Dieses in Edelstahlkokillen abgegossene Glas ist schwarz, da die als Spaltprodukte vorhandenen Metalle der Platingruppe, teils als Telluride, feinverteilt im Glas vorliegen.

Das Hüllmaterial der Brennstäbe besteht aus einer Zirkoniumlegierung und wird nicht aufgelöst, ist aber ebenfalls radioaktiv. Es bildet zusammen mit den Edelstahlteilen der Halterung verpreßt einen gesonderten, mittelaktiven Abfall.

(In Overheads als **HSM** bezeichnet) Enthält Co 60 mit ca. 6 a Halbwertszeit.

Radioaktive Edelgase und Jod werden bei der Auflösung gasförmig frei, das Jod wird mit Ag-Filtern absorbiert, das Kr 85 und eventuell etwas Tritium wird an die Atmosphäre abgegeben.!!

Insgesamt steigt das Volumen der Abfälle etwa um den Faktor 15 !!

Die gesamte Arbeit muß per Fernbedienung hinter dicken Abschirmwänden vorgenommen werden, die Anlage ist so stark kontaminiert, daß sie kaum in absehbarer Zeit abgebaut werden kann.

(In Europa Anlagen in La Hague /Frankreich und in Sellafield/England)

In Deutschland verzichtete Ende der 80er Jahre die Atomindustrie auf den Bau der

geplanten Anlage in Wackersdorf, vorwiegend aus ökonomischen Gründen.

Das gewonnene Plutonium kann zwar theoretisch wieder zu Brennstäben für Reaktoren verarbeitet werden, dies ist aber unwirtschaftlich, entsprechende Brennelemente kosten etwa zweimal so viel wie aus Natururan gefertigte!!  
Das bei der Aufarbeitung gewonnene Uran enthält ca. 0,8% U 235 und 0,4% U 236, letzteres verhindert eine Wiederverwendung in Leichtwasserreaktoren!

Das gewonnene Plutonium könnte zur Bombenproduktion verwendet werden, deshalb versuchte US-Präsident Carter in den 70er Jahren die Wiederaufarbeitung in Staaten ohne Atomwaffen zu verhindern. Diese Bemühungen wurden von Präsident Reagan aufgegeben. (Problem der Proliferation)

Sowohl BROW als HAW haben noch 10 a nach Entnahme aus dem Reaktor eine Aktivität von etwa  $5 \times 10^5$  Ci/t, die Zerfallsenergie macht sich als Wärmeproduktion bemerkbar. (Ca. 10 Kilowatt pro Tonne ) Dies muß bei der Lagerung berücksichtigt werden.

Die ungenügende Beachtung dieses Umstands führte am 28. September 1957 zu einer **Katastrophe bei Kyshtym** (Südrural, in der Nähe von Tscheljabinsk). Dort waren die Lösungen aus der Wiederaufarbeitung (Nach Extraktion von U und Pu) in mit Edelstahl verkleideten Betonbehältern gelagert worden, wegen ungenügender Kontrolle versagte die Kühlung der verschlossenen Behälter, es kam zu einer "Explosion" (Im Prinzip zu vergleichen mit einem überhitzten Schnellkochtopf, bzw. einem Geysir). Dabei wurden ca. 2 M Ci vorwiegend Cs137 und Sr90 versprüht. - Bereits vorher waren im Eifer des Rüstungswettlaufs 1949 - 1952 mehrere M Ci einfach in offenen Becken gelagert worden!

Als der russische Biochemiker Z. Medwedjew nach seiner Ausbürgerung 1976 in England darüber berichtete, wurde dies vom Vorsitzenden der Britischen Atomenergiebehörde als Quatsch bezeichnet.- Ein offizielles Eingeständnis durch das Außenministerium der Sowjetunion erfolgte erst Anfang 1990.

Auch im Rahmen des amerikanischen Waffenprogramms waren Lösungen in Tanks gelagert worden. Hier kam es vereinzelt zu Korrosionslecks, da die Tanks aber in Gebieten mit sehr tiefen Grundwasserspiegel standen, wurde das Grundwasser nicht kontaminiert.

### **Zusammensetzung der Abfälle ( BROW bzw. HAW)**

Spaltproduktphase ca. 600 a

Actinidenphase ca. 600 bis 80.000 a

Zerfallsproduktphase über  $10^5$  a (Aktivität wesentlich durch Tochterelemente)

**Zentrale Frage bei der Abfall-Lagerung: "Wie lange muß der Abfall vom biologischen Kreislauf ferngehalten werden?"**

Um eine Tonne Brennelement zu erzeugen werden ca. 7 Tonnen Natururan gebraucht.  
- Es läge nahe zu verlangen, den Abfall so lange vom Biokreislauf zu separieren, bis die Aktivität auf den Wert = 7 t Natururan gesunken ist.

7 t Uran im radioaktiven Gleichgewicht mit seinen Zerfallsprodukten hat ca. 2 Ci.

Die Ergebnisse eines entsprechenden Vergleichs zeigen, daß HAW etwa nach 5 Mio Jahren diesen Wert erreichen würde, BROW nach etwa 20 Mio Jahren.

Diese nicht gerade beruhigend klingende Überlegung ist nie der politischen Öffentlichkeit präsentiert worden. ( Nur in internen Diskussionen wurde dies relativ zutreffend damit begründet, dass es nicht auf die Aktivität sondern auf die Radiotoxizität ankommt.)

In den **50er und 60er Jahren** lautete die Argumentation etwa so:

Die Spaltprodukte werden per Wiederaufarbeitung abgetrennt. Ihre Hauptaktivität entfällt auf Cs137 und Sr90 mit Halbwertszeiten von ca. 30 a. Nach 20 Halbwertszeiten, also 600 Jahren ist praktisch alles zerfallen, einige Spaltprodukte mit längeren Halbwertszeiten wie etwa Zr und Seltene Erden sind praktisch wasserunlöslich.

Das abgetrennte Plutonium und Uran wird zu neuen Brennelementen verarbeitet.

Die Tatsache, daß im HAW bezogen auf 1 t Brennelemente immerhin noch 1,2 kg Actiniden und 1,9 kg Uran vorliegen, wurde in der breiteren Öffentlichkeit und gegenüber politischen Entscheidungsträgern nicht diskutiert. ( Dazu kommen noch 0,9 kg Technetium 99 mit einer Halbwertszeit von  $2,1 \times 10^5$  a .)

Entsprechend wurde für die Lagerung in unterirdischen Deponien nur eine Sicherheit für etwa **1000 Jahre** gefordert.

Als die positive Stimmung gegenüber der Nuklearenergie in den 70er Jahren nachliess, besonders als US-Präsident Carter anregte aus Gründen der Non-Proliferation in Staaten ohne Atomwaffen auf die Wiederaufarbeitung zu verzichten, wurde eine andere Abschätzung präsentiert:

Die Internationale Strahlenschutzkommission (International commission on radioactive protection - ICRP) hat seit Kriegsende 1945 bis heute relativ unbeeinflusst vom Kalten Krieg gearbeitet. Sie legt Maßeinheiten für die Gefährlichkeit einzelner

Radionuklide fest. Diese Maßeinheit ist der **annual limit of intake (ALI)**, es ist die sehr geringe Menge des Nuklids (Gemessen in Bequerel) die nach Meinung der Kommission ein Mensch im Verlauf eines Jahres noch inkorporieren kann, ohne erkennbaren gesundheitlichen Schaden zu erleiden. Für eine gegebene Menge eines Nuklids kann man eine Radiotoxizität definieren, indem man diese Menge (Den ihr entsprechenden Bq-Wert) durch den ALI-Wert des Nuklids teilt. Der Wert ist dimensionslos und gibt sozusagen die Zahl der Menschen an, an die man die Nuklidmenge in einem Jahr feinverteilt relativ gefahrlos verfüttern könnte! - Für ein Nuklidgemisch wären die Werte der Radiotoxizität einzeln für jedes Nuklid zu ermitteln, die entsprechenden Werte wären zu addieren und ergeben die gesamte Radiotoxizität.

Entsprechende Berechnungen wurden Ende der 70er Jahre für HAW und BROW, sowie Natururan gemacht und verglichen. Zur Freude der Nuklearindustrie zeigte sich, daß HAW nach ca. 400 Jahren, BROW nach etwa 2000 Jahren den Radiotoxizitätsindex von Natururan erreichten.

Anfang der 80er Jahre legte die ICRP 30 jedoch etwas andere Werte aufgrund neuerer Erkenntnisse fest: U 238 und Ra 226 wurden in ihrer Giftigkeit dabei geringer eingeschätzt, dagegen wurde die Giftigkeit fast aller Transurane, besonders des Np 237, höher angesetzt.

Auf dieser Grundlage würde HAW erst nach ca. 500.000 a , BROW erst nach mehr als mehr als 1 Million a die gleiche Radiotoxizität aufweisen wie das Natururan, aus dem sie ursprünglich produziert wurden.

In neueren Publikationen werden darum derartige Vergleiche nicht mehr angestellt, in der Regel wird nur die Veränderung der Radiotoxizität mit der Zeit dargestellt.

**Eine konkrete Antwort ist nicht möglich, eine etwa korrekte Antwort sollte sein:  
"So lange wie möglich, wenn möglich mindestens 0,5 Mio. Jahre"**

### **Zeitvergleiche:**

Spaltprodukt-, Actiniden- + Zerfallsprodukt-Phase mit Human- u.Erdgeschichte

Besondere Schwierigkeiten macht bei einer Tieflagerung die **Wärmeentwicklung**, sie nimmt in den ersten 500 a um ca. drei Zehnerpotenzen ab. Auch einige mittelaktive Abfälle, wie etwa konditionierte Hüll- u. Strukturmaterialien (HSM), entwickeln Wärme und müssen für 10 Jahre zwischengelagert werden. Für HAW und BROW muss vor einer Tieflagerung **mindestens eine Zwischenlagerung von 30 a** vorgesehen werden!

Bei einer Tieflagerung in Salzstöcken würde dann mit einer Erhitzung der Behälter auf ca. 150 - 190° C im verschlossenen Tieflager zu rechnen sein! Bei einer Lagerung in anderen Gesteinen (Ca. 1/2 der Wärmeleitfähigkeit von Salz) könnten noch höhere

Temperaturen erreicht werden. - Berechnet je Tonne Brennstoff produziert HAW nach 100 a Zwischenlagerung 100 Watt, BROW je nach Abbrand 200 Watt und mehr.

In Deutschland steht seit Mitte der 90er Jahre fest, dass der Hauptteil der Endlagerung als "Brennelemente ohne Wiederaufarbeitung" (BROW) erfolgen wird. (Die Erlaubnis zur Wiederaufarbeitung lief Anfang 2005 aus!) Als Lagerbehälter sind hierfür bislang der "Castor", bzw. "Pollux" vorgesehen.

Da aber in einzelnen KKWs die Abklingbecken relativ voll waren, hat man daneben noch Verträge mit der Cogema in La Hague in Frankreich, bzw. der englischen Wiederaufarbeitungsanlage in Sellafield abgeschlossen. Die Abfälle in Form von HAW-Kokillen, Plutonium und Uran sind dort zwischengelagert, es besteht eine rechtliche Verpflichtung sie zurückzunehmen, die inzwischen praktiziert wird! Bis 1998 wurden 4.500 t nach La Hague geliefert, pro Jahr wurden bis 2005 ca. 200 HAW-Kokillen für deutsche EVUs produziert.

Es besteht also die Notwendigkeit in Deutschland Kapazitäten für die Zwischen- und Endlagerung von sowohl BROW als auch HAW zu schaffen. Außerdem ist für eine hinreichend sichere Zwischen- und Endlagerung von HMS, mittelaktiven Abfällen ( $10^3$  bis  $10^4$  Ci/m<sup>3</sup>) und niedrigaktiven Abfällen, (weniger als  $10^3$  Ci/m<sup>3</sup>) teils aus medizinischen Anwendungen zu sorgen. Zwischenlager gibt es in Ahaus und Gorleben.

In Frankreich, England und Rußland werden verbrauchte Brennstäbe zu HAW, eingeschmolzen in Borosikatglas, sowie Plutonium und Uran aufgearbeitet. (Ebenso HAW in Belgien, Japan, Schweiz)

Auf direkte Endlagerung (BROW) setzen die Länder USA (Zivilprogramm), Finnland, Kanada, Schweden und Spanien.

**Was passiert mit verbrauchten Brennelementen?**

**Erste Phase : Abklingbecken**

**Warten bis die extreme Radioaktivität ( $2 \times 10^6$  Ci/t) etwas abgeklungen ist. Mindestens 2 a, besser 10 bis 50 a !!**

**Zweite Phase: Oberirdische Zwischenlagerung**

**Lagerung in gekühlten Behältern.** (Lageraum muß vor Terroranschlägen und Flugzeugabsturz gesichert werden.) Zeitraum zusammen mit erster Phase mindestens 30 Jahre.

**Dritte Phase: Tieflagerung in geologischen Formationen**

( Erschlossen im Bergbau oder in Bohrlöchern)

**Folgerung: Zeitraum zwischen Abschaltung des letzten KKW's in Deutschland und Tieflagerung des letzten Brennelements beträgt mindestens 30 Jahre!**

Der Begriff "Endlagerung" wird im Englischen nicht benutzt, der verharmlosende Ausdruck "Entsorgung" läßt sich nicht übersetzen ohne albern zu wirken!

Ende der 70er Jahre wurden **Matrixbarrieren**, also ein **Einschluß in Kristallgittern**, für Wiederaufarbeitungsabfälle vorgeschlagen. Dabei handelt es sich um synthetische Gesteine, die durch Zusatz von Aluminiumoxid, Siliziumoxid, bzw. Calciumoxid oder Bariumoxid + Titandioxid zu den Abfällen und abschliessendes Heißpressen oder Sintern bei Temperaturen zwischen 1150° bis 1350°C hergestellt werden. Diese Vorschläge wurden vor allem von dem australischen Petrologen Ringwood gemacht und an nicht aktiven Proben experimentell untersucht. Es zeigte sich, dass auch Uran, Cäsium und Ruthenium fester gebunden sind als im HAW-Glas. (Synroc, super calcine ceramic) - Versuche mit Technetium und Transuranen wurden nicht gemacht, da die Nuklearindustrie kein Interesse zeigte. Der Grund hierfür dürfte vor allem materieller Art gewesen sein; dieses Verfahren hätte die Kosten der Wiederaufarbeitung mindestens verdoppelt! - Auch die Verglasung von HAW ist eine Matrixbarriere.

Anfang der 80er Jahre wurde in Cargill/Kanada eine Lagerstätte untersucht, die neben etwa 0,1% U auch gewinnträchtige Anteile an Niob, Seltenen Erden und Phosphat aufwies. Das Erz war zwar in konzentrierten Säuren löslich, beim Verdünnen mit Wasser bildete sich aber sofort wieder ein unlöslicher Rückstand, der praktisch die gleiche Zusammensetzung hatte wie das primäre Erz. Es handelte sich um ein Erdalkalie-Seltenerd-Aluminium-Hydroxid-Phosphat (Crandallit-Gruppe).

Auf Anregung von Ballhorn (damals Metallgesellschaft/Frankfurt) untersuchten Schwab & Herold an der Uni Erlangen-Nürnberg diese Mischkristallgruppe. Sie stellten fest, daß im Kristallgitter praktisch alle mehrwertigen Kationen eingebaut werden und bei pH-Werten von 2 und höher fest gebunden bleiben. Falls statt Phosphat-Ionen

Arsenat-Ionen eingebaut werden, ist der Kristall selbst in konzentrierten Säuren unlöslich! - Anfang der 90er Jahre wurde dieses Verfahren radioaktive Stoffe (bzw. Schwermetalle überhaupt) so zu immobilisieren patentiert. (Ballhorn, Brunner & Schwab.) Allerdings lassen sich nach diesem Verfahren Cäsium und andere Alkalimetalle nicht immobilisieren.

### **Immobilisierung im Versatz (backfill)**

Anfang der 90er Jahre zeigten Ballhorn & Franke, daß Hydroxylapatit sowohl bei Normaltemperatur als auch bei erhöhten Temperaturen Schwermetalle, Uran, Seltene Erden und Strontium in wasserunlösliche, kristallisierte Verbindungen überführt. Dies führte zu dem Vorschlag in Endlagern Hydroxylapatit als Zusatz zum Versatzmaterial einzubringen; dadurch sollten beim Zutritt von Wasser zu tiefgelagerten Brennelementen ohne Wiederaufarbeitung (BROW) eventuell gelöste Radionuklide wieder ausgefällt werden.

Ein entsprechendes Szenario wurde an der FU Berlin (Abt. Radiochemie, Arbeitsgruppe Prof. Marx) experimentell untersucht. (BMFT-Projekt) Es zeigte sich, dass Uran, aber auch Np und teilweise Pu sogar in konzentrierten Salzlösungen bei Temperaturen bis zu 200°C immobilisiert werden. In die gebildeten Uran-Phosphat-Schicht-Mineralen, die sogenannten Uranglimmer, wird auch Cäsium eingebaut.

(Die französische Nuklearindustrie ließ sich inzwischen ein Verfahren zur Aktivierung von Naturapatit für diesen Zweck patentieren)

Eine Immobilisierung von Radionukliden im Störfall in Versatzmaterialien war schon in den 70er Jahren von den Sands Laboratories/ Albuquerque in New Mexico, USA vorgeschlagen worden, bislang sind aber in den USA nur Sorptionen durch Schichtsilikate wie etwa Bentonit untersucht, bzw. in Erwägung gezogen worden.

### **Laugungsbeständigkeit von HAW , bzw. BROW**

HAW-Gläser haben bis 100°C eine Laugungsbeständigkeit, die etwa vergleichbar ist mit Basalt. Pro Quadratmeter Oberfläche werden in 1 Jahr etwa 0,1 bis 10 g Substanz hydrolysiert. Es ist damit zu rechnen, daß dabei fast das gesamte Cäsium und Neptunium dieser hydrolysierten Menge in Lösung übergeführt werden, der Hauptteil der anderen Radionuklide bildet neue schwerlösliche Verbindungen. - Bei Temperaturen bis 180°C erfolgt die Zersetzung wesentlich schneller.

Bei BROW (spent fuel) liegt als Matrix ein polykristallines UO<sub>2</sub> (Uraninit) mit Korngrößen von 10 - 20 µm vor. Die Spaltprodukte und Actiniden machen etwa 4,2 - 5,0 % der Masse aus, sie sind angereichert auf den Korngrenzen, insbesondere in Randbereichen der Brennstofftabletten. (Randeffect 3 - 5 mm)

Bei Wasserzutritt werden Cs, Jod und Spaltgase (Krypton, Tritium) in erheblichem Umfang gelöst. Die übrige UO<sub>2</sub>-Matrix ist bei reduzierendem Milieu beständig.

Leider kann von einem reduzierenden Milieu aber keine Rede sein, die  $\alpha$ -Strahlung bedingt eine intensive Radiolyse des Wassers, dabei wird sowohl Sauerstoff, als auch

Wasserstoffsuperoxid gebildet. Nur die Radiolyse bestimmt die Auflösungsgeschwindigkeit, es besteht keine Temperaturabhängigkeit.

Die Radiolyse + Wasser verwandelt das  $\text{UO}_2$  in  $\text{UO}_3$ , also einen gelben Schlamm; viele Spaltprodukte sind auch unter diesen Umständen extrem schwerlöslich, leider aber nicht Cs und das Neptunium. Np bildet in fünfwertigem Zustand  $\text{NpO}_2^+$  Ionen, dieses einwertige Ion bildet mit fast alle Anionen leichtlösliche Komplexe!

Bei Zutritt von trockenem Sauerstoff zum spent fuel tritt ab  $200^\circ\text{C}$  langsam, bei  $400^\circ\text{C}$  sehr schnell eine Oxidation des  $\text{UO}_2$  zu  $\text{U}_3\text{O}_8$  ein; dabei zerrieseln die gepreßten Tabletten und viele Spaltprodukte liegen dann als feinverteilte Oxide vor und können durch Lösungen leicht mobilisiert werden. (Sogenannte Voloxidation)

### Wo soll der radioaktive Abfall endgültig gelagert werden?

Bis in die 80er Jahre wurde eine Deponie im Tiefsee-Sedimenten, bzw. im antarktischen Eisschild in Erwägung gezogen. Diese Überlegungen sind inzwischen durch internationale Verträge obsolet geworden. Die Lagerung in Tiefseesedimenten wird trotzdem von US-Wissenschaftlern weiter propagiert!

In den 60er Jahren schlug ein Mitglied der Sowjetischen Akademie der Wiss. vor, hochaktiven Abfall per Rakete in die Sonne zu schießen. Dies wäre zwar eine echte "Entsorgung", leider aber im Fall eines Fehlstarts extrem gefährlich und zudem recht teuer.- (Zur Zeit liegen die "Transportkosten" in der Größenordnung von 25 Mio US-Dollar pro Tonne Fracht!)- Bei einer Weiterentwicklung der Raumfahrttechnologie könnte möglicherweise dieser "Entsorgungspfad" aber in etwa 100 Jahren für die Beseitigung der bis dahin anfallenden Plutoniummengen von weit über 2000 Tonnen in Betracht kommen.

Eine internationale Einigung über die Deponie radioaktiver Abfälle ist derzeit und sicher auch für die nächsten Jahrzehnte nicht in Sicht. Die Gründe hierfür sind nicht technisch bedingt, sondern ausschliesslich politisch! - Deshalb ist auch die Nutzung einer geomorphologischen Barriere nie in Erwägung gezogen worden. (Geomorphologische Barriere : Lagerung oder Tieflagerung in hochariden Inlandsdepressionen)

Es muß davon ausgegangen werden, dass jedes Kernenergie nutzende Land seine Abfälle auf dem eigenen Territorium tieflagert. Entsprechend den jeweilig vorhandenen geologischen Formationen sind deshalb die Möglichkeiten beschränkt.

In Betracht gezogen wurden bislang international folgende Gesteinstypen: Granit, Schiefer, Tone, Tuffe, Quarz-arme, bzw. Quarz-freie Plutonite (Diorit, Gabbro, Syenit), Basalt, Anhydrit und Steinsalz. (Diskussion der Vor- und Nachteile)

Es herrscht ausserdem im internationalen Rahmen keine Einigkeit, ob die Abfälle in Bohrungen oder Bergwerken endgültig tiefgelagert werden sollen, oder ob eine **"Rückholbare Lagerung"** in Erwägung gezogen werden soll. Dabei wird argumentiert, daß beim weiteren Fortschritt von Forschung und Technik eventuell nach mehreren Generationen neue, bislang nicht absehbare, technische Möglichkeiten zur Verfügung stehen könnten. (USA) - In Deutschland werden zur Zeit solche Überlegungen nicht mal diskutiert.

In Deutschland muß davon ausgegangen werden, daß bis etwa 2010 folgende Abfallmengen für eine Tieflagerung anfallen:

Etwa 280.000 Kubikmeter ohne Wärmeentwicklung.- (HSM nach Zwischenlagerung, Neutronenaktivierter Stahl aus KKW-Rückbau, Niedrigaktiver Abfall + Abfälle aus der Medizin)

Etwa 6.000 Kubikmeter mit Wärmeentwicklung. - (Wesentlich HAW-Kokillen + BROW)

### **Castor und Pollux**

Seit 1977 wurden in Deutschland von der GNS (Gesellschaft für Nuklearservice, einer 100% Tochter der EVUs, inzwischen umbenannt in GNB Gesellschaft für Nuklear-Behälter) eine Reihe von Transportbehältern entwickelt. Entsprechend der engl. Bezeichnung "Cask for storage" werden sie Castor genannt.

Es gibt nicht einen Castor, sondern insgesamt etwa acht Typen, angepaßt an den jeweiligen Verwendungszweck. Die meisten Typen sind etwa knapp 6 m lang, haben Wandstärken von 40 bis 50 cm und Durchmesser zwischen 2,5 und 1,9 m. Sie bestehen aus Stahlguß und haben zwei übereinander liegende aufgeschraubte Verschlußdeckel mit Metall + Elastomer-Dichtungen. Durch ein aufgepreßtes Gaspolster zwischen beiden Verschlüssen läßt sich die Dichtigkeit kontrollieren.- Die Behälter haben außen Kühlrippen. Das Gewicht der befüllten Behälter liegt zwischen etwa 60 und 120 Tonnen!!

Diese Behälter werden unter Wasser im Abklingbecken der KKWs beladen und nach Verdampfung des Wassers durch die Wärme produzierenden Brennstäbe verschlossen. Es schließt sich eine Aussenreinigung an, da im Wasser des Abklingbeckens geringe Mengen von Kobalt 60 als Feinpartikel und Cs 137 als gelöstes Ion vorliegen. Nach den Bestimmungen der Internationalen Atomenergie Kommission darf die Aktivität der Behälteroberfläche 4 Bq./ Quadratzentimeter im Mittel nicht überschreiten.

1998 gab es einen Skandal in diesem Zusammenhang. Jahrelang waren bei Transporten von deutschen KKWs entsprechende Transportbehälter französischer und englischer Firmen (Keine Castor-Behälter!) wegen ihrer rauhen Oberfläche mit erheblich höherer Kontamination auf die Reise nach La Hague, bzw. Sellafield geschickt worden. Die KKWs hatten dies gegenüber den Behörden nicht gemeldet. Die Kontaminationen stellten zwar keine Gefahr für das Transport- und

Begleitpersonal dar, der Skandal lag vielmehr darin, daß die KKW-Betreiber jahrelang Verstöße gegen gesetzliche und international verbindliche Regeln systematisch vor den Behörden und der Öffentlichkeit verheimlicht hatten!

### **Zwischenlagerung in Deutschland (Stand 1999)**

HAW liegt in Glaskokillen mit 140 cm Länge und 42 cm Durchmesser vor, Gewicht ca. 400 kg. Je etwa 20 bis 28 Kokillen werden in einem Castor-Behälter im Zwischenlager (Gorleben oder Ahaus gelagert )  
Pro Jahr fallen derzeit etwa 200 Kokillen an.

BROW : Je etwa 4 bis 5, bzw. bis 21 Brennelemente in einem Castor-Behälter.  
Gewicht 67 bis zu 120 t

Zwischenlager für HAW und BROW bestehen in Deutschland in Gorleben und in Ahaus in Nordrheinwestfalen; in Greifswald gibt es ein Zwischenlager in dem Abfälle aus den abgeschalteten sechs KKW's der DDR gelagert sind.

Für die spätere Tieflagerung ist dann eine Umladung in einen ähnlichen dickwandigen Stahlbehälter (Pollux) vorgesehen - Der Pollux wiegt 65 t, hat 1,5 m Durchmesser bei 6 m Länge. (Der Name "Pollux" wurde in Analogie zu "Castor" gewählt, Castor und Pollux sind ein Zwillingpaar in der griechischen Mythologie.)

Ende der 70er Jahre entschied man sich in Schweden keine neuen KKW's zu bauen und für eine spätere Tieflagerung der abgebrannten Brennelemente im Granit. Als Endlagerbehälter konzipierte man damals einen extrem dickwandigen Behälter aus Kupfer, die Brennelemente im Inneren sollten mit Blei vergossen werden.

Eine direkte Übertragung dieses Konzepts auf die vorgesehene Tieflagerung im Steinsalz in Deutschland kam nicht in Betracht; Kupfer korrodiert in Salzsole extrem schnell, ist aber gegen wässrige Lösungen in Granitplutonen ziemlich beständig, sofern Radiolyse des Wassers ausgeschlossen bleibt. Nach längeren Untersuchungen fand man eine Stahllegierung die keine Lochfrass-Korrosion zeigte. Auf dieser Basis wurde das "Castor + Pollux"-Projekt entwickelt.

Der dicke Stahlmantel hat mehrere Funktionen:

- Mechanischer Schutz gegen Beschädigungen durch Unfälle
- Strahlenschutz während des Transports für das Bedienungs- und  
Bewachungspersonal

- Strahlenschutz zur Verhinderung der Radiolyse und damit rascher Oxydation im Bergwerk bei Wasserzutritt beim Pollux
- Die große Eisenmenge soll für ein reduzierendes Milieu im Behälter sorgen. (Pollux)

Eine Tonne BROW emittiert etwa  $10^9$  Neutronen pro Sekunde, die durch den Stahl kaum gebremst werden, es muß daher durch zusätzliche Maßnahmen der Neutronenfluß absorbiert werden! (Die Neutronen entstehen durch Spontanspaltung von Transuranen und durch  $\alpha, n$  - Reaktionen)

Bei Castorbehältern werden daher in einem aufwendigen Verfahren im Mantel Bohrungen über die volle Länge eingebracht, in diese Bohrungen werden Polypropylenstäbe zur Neutronenabsorption eingesetzt.

Die Entscheidungen über Behälter (Container) für die Zwischen- und Endlagerung wurden Ende der 70er Jahre entsprechend dem damaligen Stand der Technik und Forschung getroffen. Damals waren zwar völlig korrosionsfeste Materialien bekannt, wie etwa Korund, Spinell und andere keramische Materialien; alle sind aber spröde und würden unter einseitigem Druck brechen. Lediglich in Schweden wurde die Verwendung von Korund erwogen. - Man entschied sich daher für metallische Behälter, ging aber realistischerweise davon aus, daß diese Behälter bestenfalls die Spaltproduktphase überstehen würden. - Korrosionsbeständige Metalle wie etwa Tantal oder Zirkonium-Niob-Legierungen sind übrigens nie diskutiert worden. (Wahrscheinlich zu teuer!)

Aufgrund des Fortschritts von Fertigungstechnik und materialwissenschaftlicher Forschung in den letzten 20 Jahren ist eine Verbesserung der Behälter für die Tieflagerung möglich geworden:

Es gibt inzwischen Techniken der Plasmabeschichtung auch für sehr große Werkstücke durch die dünne und fest haftende, korrosionsfeste Schichten von Karbiden oder Nitriden aufgebracht werden können. (Titankarbid, Chromnitrid u.a.) - Ob seitens der Nuklearindustrie solche Möglichkeiten bereits untersucht werden, ist nicht bekannt, es ist aber eher unwahrscheinlich, da dadurch höhere Kosten und Planänderungen verursacht würden.

Die Castorbehälter für die Zwischenlagerung haben einige Nachteile:

Sie sind zwar prinzipiell nach dem Umladen des BROW in den für die Tieflagerung vorgesehenen Polluxbehälter mehrmals verwendbar. Sehr wahrscheinlich sind sie aber danach innen und am inneren Deckel radioaktiv kontaminiert und nur mit zusätzlichem Aufwand handhabbar. - Außerdem ist der dichte Verschluß und die gewählte Form der Neutronenabschirmung extrem teuer und aufwendig.

(Der Preis für Castor-Behälter wird je nach Typ auf 0,2 bis zu 0,6 Millionen € geschätzt.)

Der experimentelle Nachweis der Sicherheit bei Brand, Sturz usw. wurde seinerzeit nur bei den ersten Castor-Versionen erbracht, inzwischen wurde aber das Herstellungsverfahren wesentlich verändert, auch die Abmessungen wurden teils verändert. Dies ist aber eine rein juristische Frage, es kann davon ausgegangen werden, dass alle Castorbehälter völlig hinreichende Brand und Sturz-Sicherheit aufweisen.

Es gab auch Überlegungen BROW in einen dünnwandigeren, dicht verschweissten Behälter direkt im Kernkraftwerk einzufüllen.

Der Stahlmantel ist zwar zu dünn für einen ausreichenden Strahlenschutz, für den Transport müsste der Behälter in eine strahlensichere Abschirmung eingeschoben werden. Diese wäre aber immer wieder verwendbar, eine Kontamination ist nicht zu befürchten: Der Einschlußbehälter ist dicht. - Zusätzlich könnten neutronenabsorbierende Stoffe im Einschlußbehälter eine Neutronenemission unterbinden. (Z.B. Cadmium, Borcarbid, Titanhydrid) - Erforderlich wären Änderungen des Ablaufs im Kraftwerk, eventuell incl. einiger Umbauten.

Im Bergwerk würde dann der Einschlußbehälter in den Polluxbehälter eingesetzt. Auch hier könnte dann die bislang vorgesehene Neutronenabschirmung entfallen.

Dieses Konzept wäre langfristig entschieden billiger und außerdem sicherer, da im Zwischenlager kein Hantieren mit unabgeschirmten Brennelementen mehr erforderlich wäre! Dieses Anfang bis Mitte der 90er Jahre erwogene Konzept wurde etwa 1996/97 aufgegeben. (Das Projekt scheiterte nach neueren Informationen an der Tatsache, dass innerhalb des Sicherheitsbehälters keine Schweissarbeiten erlaubt sind)

## **Allgemeine Probleme der Tieflagerung**

Das Auffahren von Bergwerken bzw. die Anlage von Bohrlöchern auch mit großen Durchmessern ist technisch kein grösseres Problem. Dies gilt auch für den dichten Verschluss von Bohrlöchern. - Dagegen ist die möglichst trockene und hohlraumfreie Verfüllung eines Bergwerks und die wasser- und gasdichte Versiegelung des Bergwerks nach dem Abschluß der Tieflagerung ein völlig neues Problem. Kein Bergwerk wurde bislang so rückgebaut!

Im normalen Bergbau wurde zwar oft nach dem Abbau ein Versatz eingebracht, um Bergschäden durch das "Setzen" des Hangenden gering zu halten. Dieser Versatz hat aber stets ein Porenvolumen in der Größenordnung von 20 bis 30%. Aus Gründen der Arbeitssicherheit wurde der Versatz angefeuchtet. (Mehrere % Wasser!) - Die Füllung von Hohlräumen mit Beton ist mindestens im Salz mit Problemen verbunden. Im Salz wandern nämlich Flüssigkeitseinschlüsse im Temperaturgradienten in Richtung

höherer Temperatur, also in Richtung zum Endlagerbehälter. Im Prinzip lassen sich Wasser und Sauerstoff durch Zusätze zum Versatz binden; so setzen sich etwa Magnesiumoxid und feinverteiltes Kupfer mit Sauerstoff und Mg-Salzlösungen zu einem festen Magnesiumhydroxid-chlorid-Gel (Sorelzement) und Atakamit (Kupferhydroxid-Chlorid  $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ ) um. Auch gebrannter Kalk CaO oder besser MgO könnte als Mittel zur Bindung von Wasser eingesetzt werden. -

Bei einer Tieflagerung in Salzbergwerken ist als günstig immerhin zu bewerten, dass sich NaCl unter hohen Drucken plastisch verhält. Es ist zu erwarten, dass sich Hohlräume dadurch weitgehend (ca. zu 99%) schließen.

### **Gorleben (Salzdiapir)**

Auswahl 1977 aufgrund überwiegend politischer Erwägungen (Dünnbesiedelte Region in einer Randlage der BRD, politisches Entgegenkommen der damaligen Landesregierung von Niedersachsen). Erkundungsbohrungen begannen 1983, die Schachtabteufung erreichte 1994 den Salzstock, 1995 wurde eine Teufe von 850 m erreicht. Es ist geplant in dieser Tiefe 25 km Stollen aufzufahren. Die Entscheidung, ob der Salzstock wirklich geeignet ist, kann erst danach getroffen werden! Der frühest mögliche Beginn einer Tieflagerung wäre 2008 gewesen. Erkundungsstopp 2000 unter der Regierung Schröder auf Druck der Grünen und theoretischer Suche nach neuen Endlagermöglichkeiten in Deutschland! Bisher 7 km Stollen aufgefahren!

Als weiteres Endlager für mittelaktive Abfälle und kontaminierte Teile von abgewrackten Kernkraftwerken ist die ehemalige Eisenerzgrube Konrad vorgesehen.

Das Endlager der ehemaligen DDR in Morsleben wurde nur für die Einlagerung mittel- und niedrigaktiver Abfälle genutzt, die Betriebsgenehmigung lief 2000 aus.

### **EVU-Planung (Stand 1996)**

Bis 1996 rechneten die Energieversorgungsunternehmen (EVU) in Deutschland mit folgendem Szenario:

Es werden keine neuen KKW's gebaut.- Betrieb der bestehenden KKW's (teilweise) bis etwa 2045. - Beginn der Tieflagerung etwa 2028, Ende des Betriebs etwa 2080. Kosten der Auffahrung (Gorleben) etwa 4 Milliarden DM, jährliche Betriebskosten ca. 80 Millionen DM; Gesamtkosten also ca. 6,5 Milliarden DM.

In der BRD müssten nach 2046 alle KKW's abgebaut werden. Abbaukosten in der Größenordnung von 30 Milliarden DM. Aktivierte Teile müssen tiefgelagert werden, falls hierfür die Grube Konrad in Betracht kommt, wären Bergbaubetriebskosten von ca. 4 Milliarden DM zu erwarten. Ende der Rückbauphase etwa 2150.

Summe für Tieflagerung bis dahin also ca. 11 Milliarden DM.

### **Wohin mit dem Plutonium?**

Plutonium fällt an in USA und Rußland aus abgewrackten Sprengköpfen (START-Verträge), dabei handelt es sich um ziemlich reines Pu 239. (Pu-Sprengköpfe müssen etwa alle 4 a aufgelöst und von Zerfallsprodukten gereinigt werden!!)

Eine größere Menge fällt bei der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen aus ziviler Nutzung an. Dieses Plutonium besteht aus einem Gemisch der Isotopen Pu 239, Pu 240 und wenig Pu 241. Auch dieses Gemisch ist im Prinzip für einen Bombenbau geeignet, allerdings sind solche Sprengsätze wegen der kurzen Halbwertszeiten von Pu 241 von 14,4 a nicht sehr lange haltbar und militärisch deshalb kaum sinnvoll nutzbar.

Die Substanz ist hochtoxisch, der ALI-Wert liegt bei etwa  $10^5$  Bq. Es erscheint nicht ratsam dieses Material länger in reiner Oxid-Form zu lagern.

Es wird erwogen, einen Teil in Hochtemperaturreaktoren in Rußland und USA zur Energiegewinnung einzusetzen. Die abgebrannten Brennelemente sind dann durch die Spaltprodukte "vergiftet" und liegen außerdem in einer Form vor, die in normalen Wiederaufarbeitungsanlagen nicht verarbeitet werden können. Da sie selbst in konzentrierten Säuren unlöslich sind, stellen sie eine ideale Matrixbarriere dar; eine Tieflagerung ist dadurch weniger problematisch als bei üblichem BROW oder HAW. Allerdings wäre dies mit erheblichen Kosten verbunden! Außerdem ist es wahrscheinlich unmöglich alles Pu in einer absehbaren Zeit so umzusetzen.

In den USA wird derzeit erwogen einen Teil des Pu in sichere Matrixbarrieren einzuschließen. (Zirkon, Zirkonoxid ) Dabei würden Substanzen zugegeben werden, die als Neutronenfänger wirken (Hafnium bzw. Gadolinium), um eine Kritikalität zu vermeiden. - Schließlich gibt es noch die Möglichkeit gepreßte Pu-Oxid-Tabletten (Mit oder ohne Neutronenfänger) mit Siliziumkarbid zu bedampfen und zusammen mit BROW der Tieflagerung zuzuführen.

**Eine weitere Möglichkeit mit BROW umzugehen ist bisher nicht öffentlich erwogen worden:**

Dazu müsste BROW in Castorbehältern ca. 210 Jahre gelagert werden, die bereits jetzt benutzten Castorbehälter wären geeignet. Dann wäre

- die Wärmeentwicklung von  $10^4$  Watt pro Tonne auf 100 W/t gesunken,
- die Aktivität von  $2 \times 10^6$  Ci/t auf  $3 \times 10^3$  Ci/t gesunken
- die Spaltgase Kr85 und Tritium wären völlig zerfallen
- Sr90 und Cs137 wären zu etwa 98% zerfallen
- Ru106 und Rh106 wären quantitativ in stabiles Palladium 106 zerfallen, das etwa 0,38% der Menge ausmachen würde. (3,8 kg Pd pro t)

Eine dann ausgeführte Aufarbeitung in einer Anlage, analog zu den gegenwärtig betriebenen Wiederaufarbeitungsanlagen, würde bei geringfügig variiertes Prozessführung pro t BROW zu folgenden Produkten führen:

1. ca. 3,8 kg Palladium
2. 835 kg Uran
3. 2 kg Uran vermischt mit ca. 10,3 kg Actiniden (Pu, Np, Am, Cm)
4. ca. 32 kg restliche Spaltprodukte
5. HSM (Zirkaloy-Hüllrohre + Edelstahl-Distanzstücke)



1. Das Palladium hat gegenwärtig einen Marktwert von ca. 16.000 €
2. Das Uran könnte ohne Probleme nach Überführung in Uraninit oder Brannerit tiefgelagert werden.
3. Das Actiniden-Uran-Gemisch stellt das eigentliche Problem dar, ist aber in Volumen und Masse stark reduziert! Oxidvolumen ca. 2 Liter!!
4. Die restlichen Spaltprodukte müssten konditioniert und weitere 400 Jahre (rückholbar) tiefgelagert werden, eventuell stellen sie dann ein interessantes „Erz“ zur Gewinnung von Mo und Seltenen Erden dar.
5. Die Hüllelemente können, wie bereits jetzt, als nicht wärmeproduzierender Abfall tiefgelagert werden. ( ca.  $2 \times 10^{-2}$  Ci/t)

**Rückbau von Kernkraftwerken**

Ausgediente KKW's müssen auf Kosten der Betreiber abgerissen werden. Durch Neutronenaktivierung sind aber insbesondere in Stahlteilen (Reaktordruckgefäß) und in Edelstahlteilen (Rohre, Wärmetauscher, Dampferzeuger u.ä.) radioaktive Isotope entstanden. Die längste Halbwertszeit dieser Isotope hat Co 60 mit 5,3 a, Mn 54 hat 312 Tage, Zn 65 noch 244 Tage, die meisten anderen unter 100 Tagen Halbwertszeit! - Das Wasser im Primärkreislauf enthält Tritium mit 12,3 a !

Eine Möglichkeit besteht darin den eigentlichen Reaktor mit Beton zu verschließen und den Abbau erst nach etwa 60 Jahren vorzunehmen. Dadurch fallen aber erhebliche Kosten für Bewachung an und das Grundstück kann solange nicht genutzt werden.

Günstiger erscheint es die Kenntnisse des Reaktorpersonals zu nutzen und unter entsprechenden Vorsichtsmaßnahmen sofort mit dem Abbau zu beginnen. Dabei muß jede Staub- oder Gasentwicklung bei der Zerlegung aktivierter Teile vermieden werden. Soweit möglich werden darum Schneid- und Schweißarbeiten unter Wasser im Abklingbecken vorgenommen. Wo dies nicht möglich ist, kann das Teil in einem Eisblock eingeschlossen und dann zersägt werden. (Dampferzeuger) Oberflächlich kontaminierte Teile können durch elektrolytisches Abtragen der Oberfläche gereinigt werden. Alles anfallende aktive Material ist in feste Form überzuführen, dicht und strahlensicher zu verpacken und der Tieflagerung zuzuführen. (Insgesamt etwa 3% des Volumens des KKW's, ⇒ MAW, bzw. LAW)

(Beim Import von Schrott aus GUS-Ländern ist mehrmals stark aktiver Schrott in EU-Länder wie Spanien gelangt!)

Derzeit werden die KKW's Kahl, Rheinsberg, 5 Blöcke in Greifswald, Würgassen und Grundremmingen A so abgewrackt, sowie ein Forschungsreaktor in Karlsruhe. Man rechnete 1999 mit mindestens 10 bis 15 Jahren Arbeitszeit pro Kraftwerk und Kosten von je etwa 1 Milliarde DM. (Unter Berücksichtigung der Inflationsrate kostet der Rückbau soviel wie der Bau !!) Inzwischen rechnet man mit 25-30 Jahren Zeit zwischen Abschaltung und Ende des Rückbaus, Kosten pro KKW 300 Mio € geschätzt 2003.

Erheblich billiger und schneller ist der Rückbau bei Anlagen, die nur extrem kurz oder überhaupt nicht in Betrieb waren (Schneller Brüter in Kalkar, eventuell in Zukunft Mülheim-Kärlich), sowie bei Brennelementfabriken.

Wasser läßt sich durch Filter von Feinteilchen befreien, gelöste Ionen wie etwa Cäsium können mit Ionenaustauschern (z.B. Berliner Blau) entfernt werden. Nicht entfernen läßt sich Tritium (In Form von THO). Solche Wässer müssen für ca. 120 Jahre vom Biokreislauf ferngehalten werden. (Möglichkeit der Injektion in tiefliegende geologische Formationen oder Salzkavernen)

In Deutschland gibt es derzeit 16 stillgelegte KKW's (ohne Forschungsreaktoren!), 19 KKW's sind in Betrieb, eine Anlage ist betriebsbereit, hat aber keine Genehmigung.

## **Kernenergie + Terrorismus**

Nach einhelliger Meinung von Experten ist die Wahrscheinlichkeit, dass terroristische Organisationen funktionierende Atombomben bauen könnten, nahe Null einzuschätzen. Benötigt würde eine Wiederaufarbeitungsanlage + Reaktor oder grosse Mengen an Natururan + eine grössere Gaszentrifugenanlage, zusätzlich ein Stab an gut ausgebildeten Physikern u. Chemikern. Solche Ressourcen über eine Zeitraum von mindestens 2 - 3 Jahren kann nur ein Staat zur Verfügung stellen.

Dagegen könnte eine sog. „dirty bomb“ relativ leicht hergestellt werden. Dies ist ein konventioneller Sprengsatz der beigefügte hochradioaktive Stoffe bei der Explosion auf möglichst grosser Fläche verteilt und so nachhaltig kontaminiert. (In Betracht kommen Sr 90, Cs 137 und Co 60 aus medizinischer Anwendung oder illegal beschafftes Pu-Isotopengemisch aus der Wiederaufbereitung von zivilen KKWs.)

Die Sabotage durch Selbstmordattentäter eines laufenden, flüssigkeitsgekühlten KKW mit dem Ziel alle Kühlaggregate zu zerstören würde eine Kernschmelze hervorrufen, bei gleichzeitiger Zerstörung des Sicherheitsbehälters würde eine Situation ähnlich wie in Tschernobyl entstehen! Diese Möglichkeit wurde schon als Roman und Fernsehfilm behandelt.

Nach Schätzungen der Hessischen Stiftung Friedens- und Konfliktforschung in Frankfurt/Main gibt es gegenwärtig weltweit etwa 1700 t hochangereichertes waffenfähiges Uran und mindestens 450 t Plutonium. Nähere Informationen siehe unter [www.hsfk.de](http://www.hsfk.de)

### **Internationale Kosten**

Einige Länder, insbesondere Russland, GUS-Staaten und die Ukraine sind nicht in der Lage, bzw. nicht bereit, dringend erforderliche Aufräumungs und Sicherungsmassnahmen im nukleartechnischen Bereich zu finanzieren. Um Umweltkatastrophen zu vermeiden, müssen dann Industriestaaten solche Massnahmen mitfinanzieren. Regelmässig ergeben sich dabei Schwierigkeiten wegen übertriebener Geheimhaltung. - Aktuelle Beispiele:

Neuer Sarkophag für Tschernobyl und bessere Lagerung von Abfällen dort. - Lagerung von alten U-Boot-Reaktoren in Murmansk u. Umgebung. - 28 Abfallhalden der Uranproduktion aus den Jahren 1945 bis 1968 in Kasachstan am Mailu-Su-Fluss sind durch Erdbeben und Starkregen gefährdet und drohen das Fergana-Tal zu kontaminieren; betroffen wären bis zu 6 Millionen Anwohner!

---

### **Kernenergie im Vergleich**

**Etwa 12,8% des Primärenergiebedarfs in Deutschland, bzw. ca. 30% der Stromerzeugung wird durch Kernenergie gedeckt.**

Verglichen werden :

**Stromerzeugungskosten** in €/pro kWh (Unsicherheit ob im Wert noch Kapitalkosten enthalten sind)

**Investitionskosten** in €/pro KW installierter elektr. Leistung

**Energie-Ernte-Faktor** : Summe der in der Betriebsdauer erzeugten Energie, dividiert durch Summe des Energieaufwands für Bau, Betrieb, Wartung, Brennstoffgewinnung, Schlackenbeseitigung, Umweltschutzmaßnahmen.

Fossile Brennstoffe : Etwa 0,03 €KWh

" 1000 €KW

Energieerntefaktor etwa 20 , erhöht sich bei Kraftwärmekopplung (Blockheiz-Kraftwerk) auf 30 bis 35

Kernkraftwerk Etwa 0,02 bis 0,05 €KWh

" 2000 - 3000 €KW

Energieerntefaktor etwa 10

Wasserkraft Etwa 3000 €KW

" 0,10 €KWh (?)

Windkraft Etwa 1000 - 2300 €KW

" 0,08 - 0,16 €KWh

Photovoltaik Etwa 0,60 - 1,00 €KWh

9000 - 10000 €KW

Bei Serienfertigung würde der Gestehungspreis auf mind. 0,30 €KWh sinken.

Bei Kraftwerken, die mit Erdgas betrieben werden, ist in Zukunft mit einer gesteigerten Effizienz bis zu 80% zu rechnen. (Gasturbine + Dampfturbine + Kraft-Wärmekopplung ⇒ GUD)

**1998 weltweit 427 Kernkraftwerke , 46 im Bau (GUS,China,Indien, Pakistan)**

**19 " in Deutschland**

**"Abfälle" : Plutonium weltweit ca. 1780 t , davon 65 t in Deutschland**

**Brennelemente ohne Wiederaufarbeitung 1997 weltweit ca. 186.000 t.**

1989: 429 KKWs mit 325 Gigawatt - 1999: 433 KKWs mit 368 Gigawatt

In Deutschland 1989 23,7 GW, dagegen 1998 nur noch 22,6 GW

## Quellen

H. Lindner " Grundriß der Atom -und Kernphysik " Fachbuchverlag Leipzig 1972

A.G. Herrmann " Radioaktive Abfälle " Springer Verlag 1983

D.G. Brookins " Geochemical Aspects of Radioactive Waste Disposal " Springer Verlag 1984

Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft Bd 131, Teil 2  
 " Geowissenschaftliche Aspekte der Endlagerung radioaktiver Abfälle "  
 Enke Verlag Stuttgart 1979

I.S. Roxburgh " Geology Of High-Level Nuclear Waste Disposal "  
 Verlag Chapman and Hall 1987

V. M. Chernousenko " Chernobyl - Insight from the inside "  
 Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York 1991

Deutsche Ausgabe:

W.M. Tscherousenko „Tschernobyl: Die Wahrheit“  
 Rowohlt, Reinbeck bei Hamburg 1992

J. Smith, N. A. Beresford „Chernobyl -Catastrophe and Consequences“  
 Springer Praxis 2005

W. Minder "Geschichte der Radioaktivität"  
 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1981

Klaus Heinloth "Die Energiefrage" Vieweg-Verlag 1997

"Umweltdaten Deutschland 1998" Umweltbundesamt

„Basiswissen zum Thema Kernenergie“ Martin Volkmer  
 „Radioaktivität und Strahlenschutz“ Martin Volkmer  
 beide Broschüren herausgegeben vom  
 Informationskreis KernEnergie, Robert-Koch-Platz 4  
 10115 Berlin November 2005 ISBN-Nr. 3-926956-44-5/3-926956-45-3  
 (Kann kostenlos angefordert werden dort oder über [www.kernenergie.de](http://www.kernenergie.de))

## **Argumente Pro und Contra Nuklearenergie**

**Bei der Erzeugung von Energie aus Kohle entstehen pro KWh 80 g Abfälle,  
 bei nuklearer Energiegewinnung aber nur 0,12 g.**

Das ist richtig, aber die Abfälle bei fossiler Energiegewinnung lassen sich teilweise nutzen (Schlacken), giftige Abfälle wie etwa Filterstäube relativ problemlos und kostengünstig tieflagern. (Nach Bindung in Zement Tieflagerung in alten Salzminen mit Kosten von ca. 100 €/t )

**Kernkraftwerke produzieren kein CO<sub>2</sub>**

Das ist richtig, soweit der laufende Betrieb betrachtet wird. Für je 10 KWh elektr. Leistung muß aber ca. 1 KWh Leistung für Kraftwerkbau, Bergbau, Transport, Aufbereitung, Abfallbeseitigung und Nachsorge aufgewandt werden. Ein großer Teil dieser Energiemenge (80-90%) wurde oder wird fossil erzeugt.

Kernenergie macht derzeit nur etwa 3 bis 4% der weltweit verbrauchten Primärenergiemenge aus.

In Deutschland wird nur 12,8% des Primärenergiebedarfs durch Kernkraft erzeugt, dagegen werden 29% im Verkehr, 28% zur Raumheizung benötigt! Einsparungen in diesen Bereichen führen schneller und billiger zu verminderter Kohlendioxid-Emmision.

**Beim normalen Betrieb eines Kernkraftwerks wird die Umgebung weniger mit Radioaktivität belastet, als beim Betrieb eines Kohlekraftwerks mit gleicher Leistung.**

Kohle hat aufgrund eines sehr geringen Urangehalts eine Aktivität von 10 bis 100 Bq/kg. Der Flugstaub eines Kohlekraftwerks hat Aktivitäten zwischen 0,015 und 0,24 Bq/g. (Wesentlich Ra 226 ) - Wenn 1,5% des Flugstaubs sich in der Umgebung verteilen, dann ist die radioaktive Belastung zwischen 2 bis 10mal höher als rings um ein KKW. - Diese Berechnung wurde ohne Berücksichtigung einer Rauchgaswäsche zur Abscheidung von Schwefeldioxid vorgenommen. In solchen modernen Anlagen dürfte eher ein Faktor 1 anzusetzen sein. (Erdgas und Erdöl-Produkte sind praktisch frei von Uran).

**In Südindien (Kerala) und Nordost-Brasilien werden auf bestimmten Böden Strahlendosen von bis zu 2000 Millirem/Jahr gemessen. Es wurden keine Schäden bei der einheimischen Bevölkerung gemessen.**

Das ist richtig, aber: Es handelt sich um Uran und Thorium, das fest in Kristallen eingeschlossen ist (Monazitsande, bzw. Brannerit im anstehenden Gestein) Eine Inkorporation kann höchstens durch geringe austretende Radonmengen erfolgen. In den tropischen Gebieten werden Gebäude meist nur als Regen- und Wind-Schutz benutzt, offene Türen und Fenster, keine Anreicherung. - Die statistischen Erhebungen sind nicht sehr zuverlässig, in Kerala deuten sie immerhin auf verminderte Fruchtbarkeit hin.

### **Finanzielle Aspekte**

#### **Aus Sicht des Steuerzahlers**

Die Summe der staatlichen Subventionen für die Kernenergienutzung seit den 50er Jahren wird auf mehr als **40 Milliarden DM** geschätzt.

Mitte der 90er Jahre förderte das BMFT pro Jahr entsprechende Projekte mit

etwa **80 Millionen DM** pro Jahr. Mehr als 75% dieser Summe entfielen auf technische Projekte, also Entwicklungen für die eigentlich die Betreiber der Kernkraftwerke allein zuständig wären.

### **Aus Sicht der Energieversorgungsunternehmen (1998)**

1998 produzierten die Kernkraftwerke in Deutschland etwa 135 Milliarden KWh. Legt man Selbstkosten von 0,1DM/KWh und einen Abgabepreis von 0,2DM/KWh zugrunde, so ergibt sich ein Gewinn vor Steuern in der Größenordnung von **13 Milliarden DM/a.**

Jährlich fallen etwa 1,3 Milliarden DM Rückstellungen für Zwischen- und Tieflagerung, sowie den Rückbau von ausgedienten Kraftwerken an. Die bis 1998 angesammelte Summe an solchen Rückstellungen wurde auf 55 Milliarden DM geschätzt. (2003: 31,4 Milliarden €)

Demgegenüber stehen Schätzungen der zu erwartenden Kosten für Bergbau 11 Milliarden DM und Rückbau ca. 30 Milliarden DM. Um im Stromgeschäft zu bleiben, müssen abgeschaltete Kernkraftwerke mindestens zu etwa 80% der Kapazität durch andere Kraftwerke ersetzt werden. Hierfür sind etwa 20 Milliarden DM zu veranschlagen: **11 + 30 + 20 = 61 Milliarden DM !**

Das heißt, daß 1998 etwa 6 Milliarden DM an Rücklagen fehlten! Dabei sind bisher nicht erwartete Kosten und Kostensteigerungen noch nicht berücksichtigt. Da die Bundesregierung Schröder im Atomgesetz die Förderungswürdigkeit gestrichen hat, drohen die Kosten der technischen Entwicklung außerdem zukünftig voll zu Lasten der EVU zu gehen. - Zusätzlich ist zu bedenken, daß die Rückstellungen zu erheblichen Teilen in Firmen der Abfallwirtschaft investiert oder am Kapitalmarkt angelegt wurden; eine Aktivierung des Kapitals könnte zu Verlusten oder mindestens zu einer Gewinnminderung führen.

**Schlußfolgerung: Um eine zukünftige empfindliche Gewinnminderung zu vermeiden, mussten Restlaufzeiten in der Größenordnung von 10 bis 25 Jahren ausgehandelt werden.**

### **Diverse Angaben**

#### Kernenergieanteil an der Stromversorgung im Sommer 2003:

Gesamt-EU 34% - Frankreich 78% /Belgien 58% / Schweden 46% /Schweiz 40%  
Finnland 30% / Deutschland 29% / Spanien 26% / Grossbritannien 23%

#### Herbst 2003 Irak:

Zerstörte irakische Nuklearanlage Tuweitha, 18 km südöstlich von Bagdad. Bevölkerung aus umliegenden Dörfern hat nach Irakkrieg 2003 geplündert und vieles mitgenommen, insbesondere Fässer, Rohre, Kabel. Folge: Stark erhöhte Strahlenbelastung in vielen Fällen. Keine Kontrolle durch UN-Inspektoren wegen fehlender Erlaubnis der US-Militärbehörden!

#### Erster Kernwaffentest Nordkorea 2006:

Die Deutung der seismischen Registrierungen lassen auf eine Plutoniumbombe schliessen, die wegen unvollkommener Kompression nur teilweise zur Kettenreaktion führte!

#### **fission track**

Alpha-teilchen verursachen in Festkörpern Störungen der Struktur. Durch Anlösen, bzw. Ätzung können diese Störungen sichtbar gemacht und ausgezählt werden. Wird benutzt um die Radon-Konzentration in der Luft zu bestimmen. - Kann zuweilen auch zur Altersbestimmung in der Archäologie benutzt werden

#### Energiedispersive Wellenlängen-Bestimmung:

**energy dispersive analysis of X-rays = EDAX**

Gammastrahlen erzeugen in dotierten Halbleitern Ladungen (Elektronen + Elektronenlöcher). Die Zahl der Ladungen ist proportional zur Energie des Gammaquants. Benutzt wird meist ein mit Li dotierter Germaniumkristall.

#### **Neutronenaktivierungsanalyse**

Durch Bestrahlung mit Neutronen werden viele Elemente in kurzlebige radioaktive Elemente umgewandelt, die intensive Gammastrahlen emittieren. Durch anschliessende EDAX können die Gehalte in der Probe ermittelt werden. Sehr billig, da kein Aufschluss erforderlich ist! Es können insbesondere auch sehr geringe Gehalte und Spurenelemente bestimmt werden. -Wird routinemässig zur Bestimmung der Seltenen Erden in Gesteinen benutzt.