

Seminar über Energie und Gesellschaft

Thema: Kernenergie

Von : Florian Grenz



Gliederung

- ▶ • **1.0 Warum Atomkraft**
- ▶ • **2.0 Kernspaltung**
- ▶ • **3.0 Kernkraftwerkstypen**
 - **3.1 Kernkraftwerksstandorte in Deutschland**
 - **3.2 Siedewasserreaktor**
 - **3.3 Druckwasserreaktor**
 - **3.4 Brutreaktor**
 - **3.5 Kugelhaufenreaktor**
 - **3.6 Druckröhrenreaktor**
 - **3.7 CANDU-Reaktor**
- ▶ • **4.0 Uran**
 - **4.1 Uranverbrauch und -Produktion**
 - **4.2 Zukunftsprognosen**
 - **4.3 Uranabbau**
 - **4.4 Urananreicherung**
- ▶ • **5.0 Entsorgung**
- ▶ • **6.0 Castortransporte**
 - **6.1 Behälter**
- ▶ • **7.0 Umweltfreundlichkeit**
 - **7.1 CO₂-Emissionen**
 - **7.2 Strahlenbelastung**
- ▶ • **8.0 Betriebssicherheit**
- ▶ • **9.0 Subventionen**

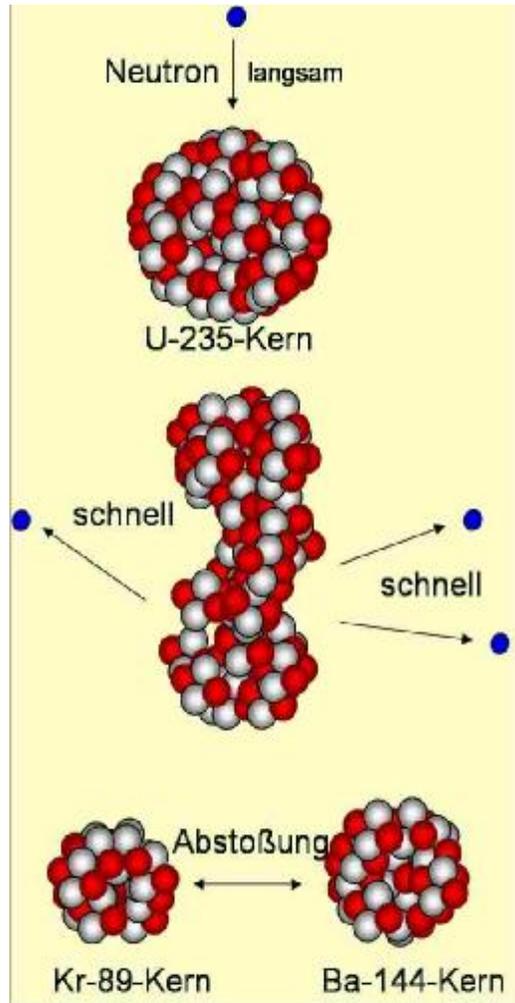
Anhang : Unfallhergang Tschernobyl

1.0 Warum Kernkraft?

Fossile Brennstoffe im Vergleich :

	Natururan	Steinkohle	Braunkohle	Erdöl	Erdgas
Energieinhalt	2,20E+07 KWh/kg	8,1 KWh/kg	2 bis 6 KWh/kg	12 KWh/kg	9 KWh/m ³
Äquivalent	1 t	18900 t	56700 t	12600 m ³	14000100 m ³
Reichweite	37/2220 a	150 a	544 a	44 a	64 a

2.0 Kernspaltung (Fission)



Um eine stabile Kettenreaktion ablaufen zu lassen muss dafür gesorgt werden, dass im Mittel eines der bei einer Spaltung entstandenen Neutronen einen weiteren Atomkern spaltet. Zugehörige Parameter :

1. Form und Menge des spaltbaren Materials

- Die Form des Materials bestimmt wie viele freigesetzte Neutronen überhaupt weiteres spaltbares Material treffen
- Bei kugelförmiger Verteilung und ohne Kompression des Materials liegen die kritischen Massen bei :
 - U-235 : 50 kg
 - Pu-239 : 10 kg

2. Geschwindigkeit der Neutronen

- Wirkungsquerschnitt für die Kernspaltung ist abhängig von der Neutronengeschwindigkeit
- Höchste Spaltwahrscheinlichkeit $v = 2 \text{ km/s}$: thermische Neutronen

3. Materialien im Reaktionsbereich

- Moderatoren zwischen Brennelementen zur Abbremsung der Neutronen (von 20.000 km/s auf 2 km/s), z.B. Wasser, Deuterium, Graphit
- Neutronenabsorbierende Materialien, z.B. Steuerstäbe aus Bor oder Cadmium
- Neutronenreflektoren um die Brennelemente, z.B. Beryllium

3.0 Kernkraftwerkstypen

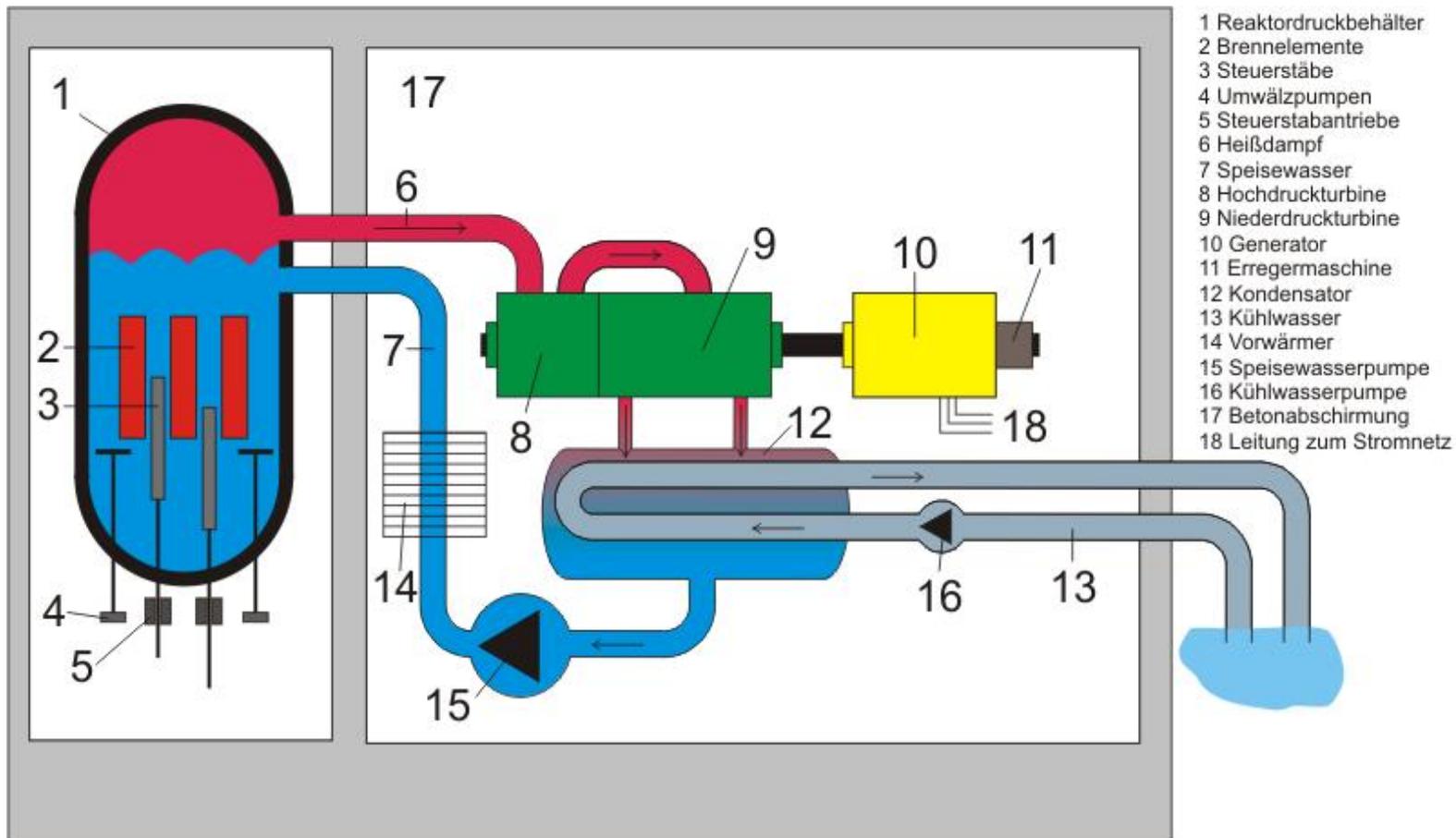
3.1 Kernkraftwerksstandorte in Deutschland



3.2 Siedewasserreaktor (SWR)

Technische Daten am Beispiel KKW Krümmel :

Kühlmittel	Wasser	Anreicherung an U-235	3,49 % und 3,31 %
Druck	67 bar	Kernbrennstoffmenge	151 t
Temperatur	215°C-283°C	Wirkungsgrad	34,1 %
Moderator	Wasser	Elektrische Nettoleistung	1260 MW
Brennstoff	UO ₂	Thermale Leistung	3690 MW



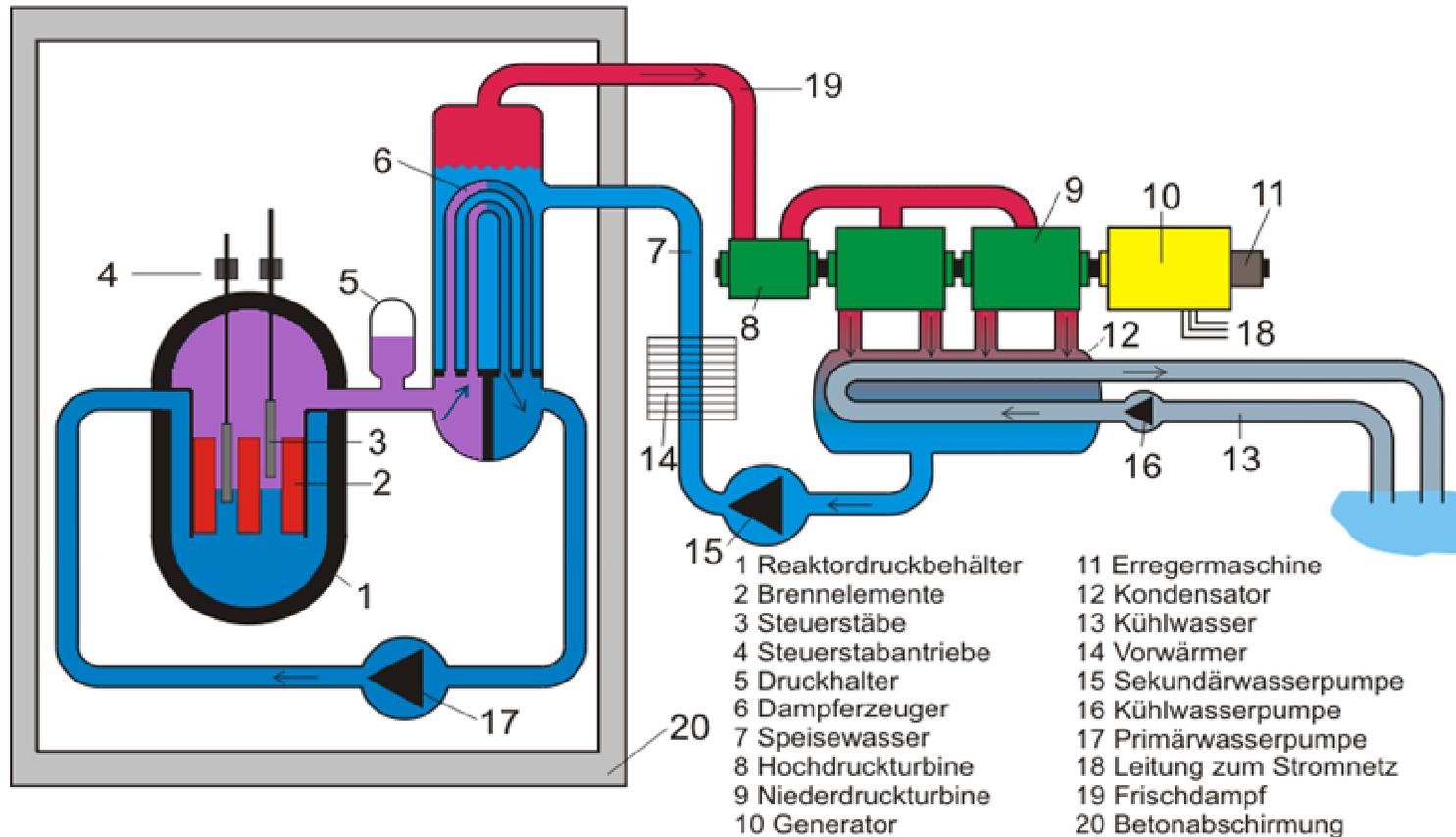
Siedewasserreaktor (SWR)

Vorteile	Nachteile
<ol style="list-style-type: none">1. Einfache Konstruktion2. Billiger, nicht brennbarer Moderator3. Negativer Temperaturkoeffizient	<ol style="list-style-type: none">1. Kernschmelze möglich2. Turbine durch radioaktiven Dampf angetrieben3. Mehr radioaktiver Müll4. Komplizierte Regelung

3.3 Druckwasserreaktor (DWR)

Technische Daten am Beispiel KKW Brokdorf :

Kühlmittel	Wasser	Anreicherung an U-235	1,9% , 2,5% , 3,5%
Druck (primär/sekundär)	157 bar / 66 bar	Kernbrennstoffmenge	103 t
Temperatur (primär/sekundär)	291,3°C-326,1°C / 285°C	Wirkungsgrad	35,5%
Moderator	Wasser	Elektrische Nettoleistung	1326 MW
Brennstoff	UO ₂	Thermale Leistung	3765 MW



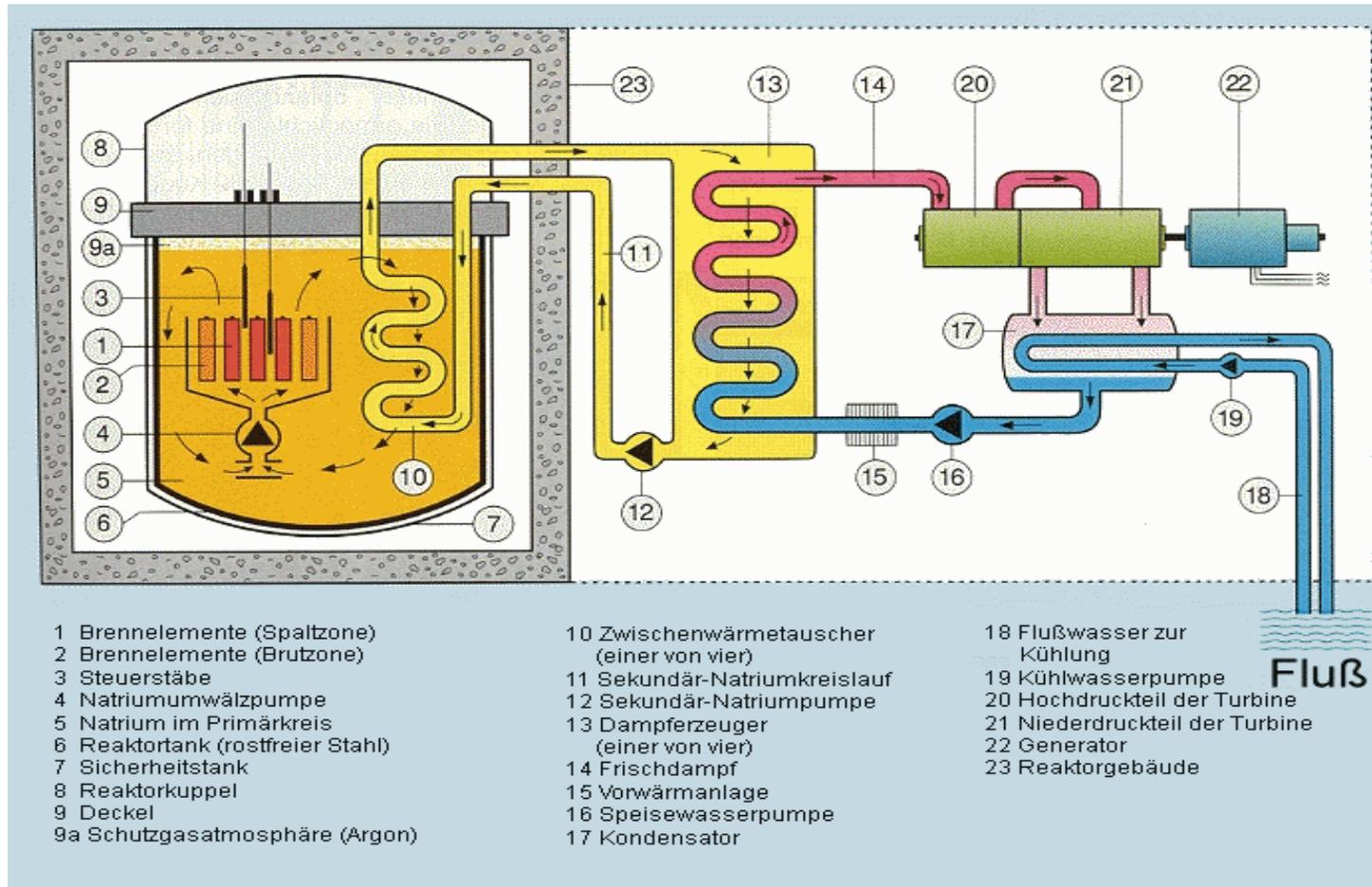
Druckwasserreaktor (DWR)

Vorteile	Nachteile
<ol style="list-style-type: none">1. 2.Kühlkreislauf beschränkt die Radioaktivität auf die unmittelbare Reaktorumgebung2. Billiger, nicht brennbarer Moderator3. Negativer Temperaturkoeffizient	<ol style="list-style-type: none">1. Kernschmelze möglich2. Dampferzeuger als mögliche Schwachstelle im Kühlkreislauf3. Aufgrund des hohen Drucks anfällig für Lecks

3.4 Brutreaktor (SNR)

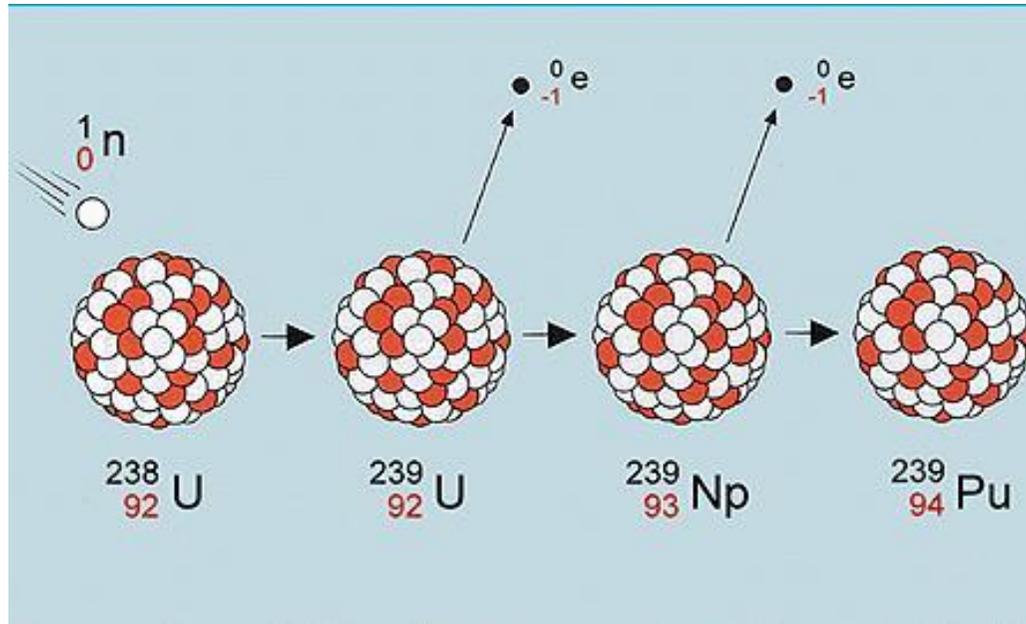
Technische Daten am Beispiel: Superphénix I

Kühlmittel (primär/sekundär)	Flüssiges Natrium / Wasser	Anreicherung an U-235	0,7 % (natürlicher Anteil)
Druck (primär/sekundär)	10 bar / 218 bar	Kernbrennstoffmenge	5 t Plutonium / 28 t Uran
Temperatur	395°C-545°C / 525 °C	Wirkungsgrad	39,3 %
Moderator	Nicht vorhanden	Elektrische Nettoleistung	1180 MW
Brennstoff / Brutmaterial	Pu-239 / U-238	Thermale Leistung	3000 MW



Brutreaktor

Brutvorgang

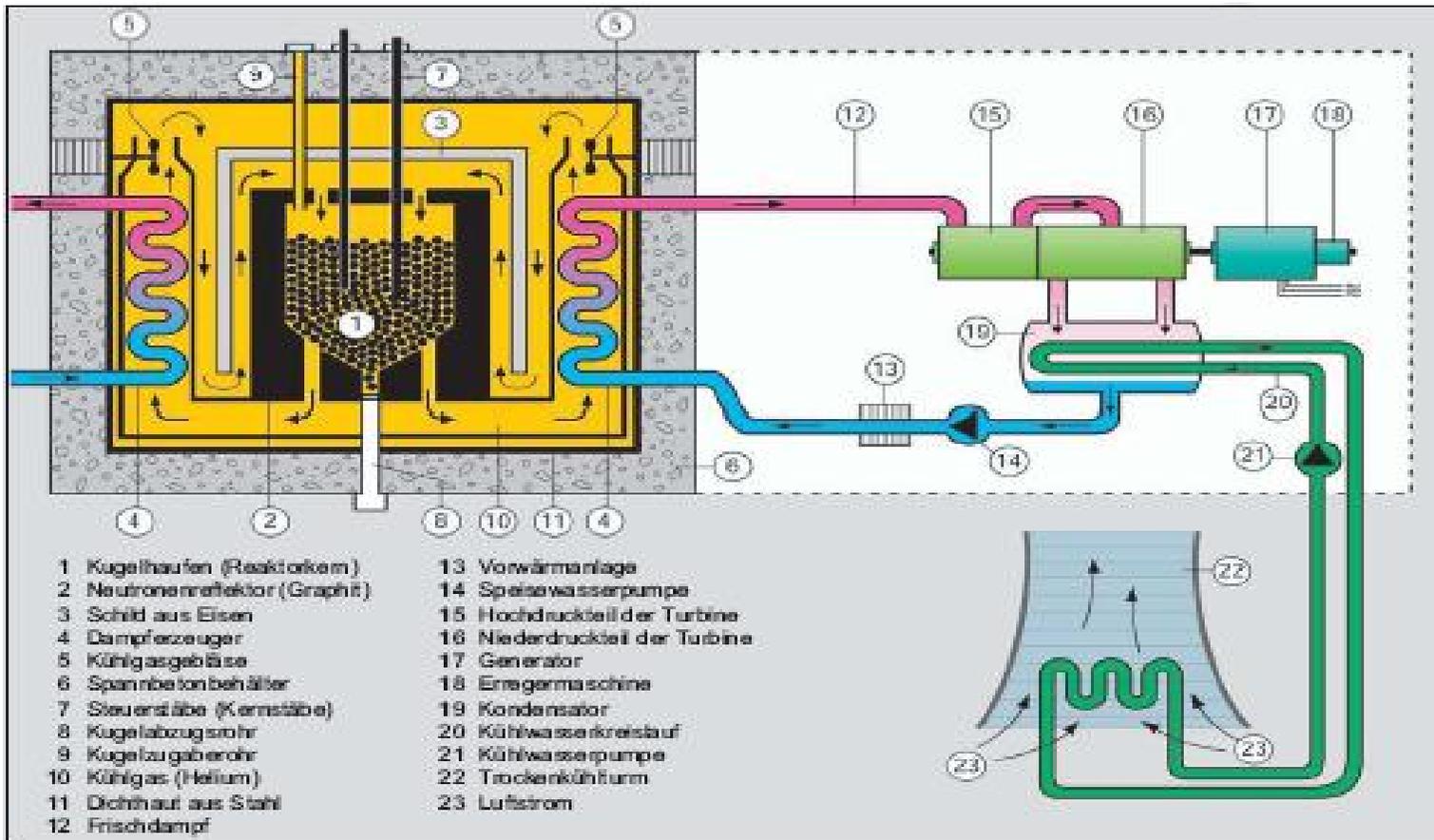


Vorteile	Nachteile
<ol style="list-style-type: none">1. Erbrütet Spaltstoff aus nicht Spaltbarem Uran → 60-fach bessere Uranausnutzung	<ol style="list-style-type: none">1. Durch Natriumkühlung sehr Wartungsintensiv2. Natrium ist an Luft Brennbar und reagiert heftig in Kontakt mit Wasser3. Erfordert Handhabung mit giftigem Plutonium

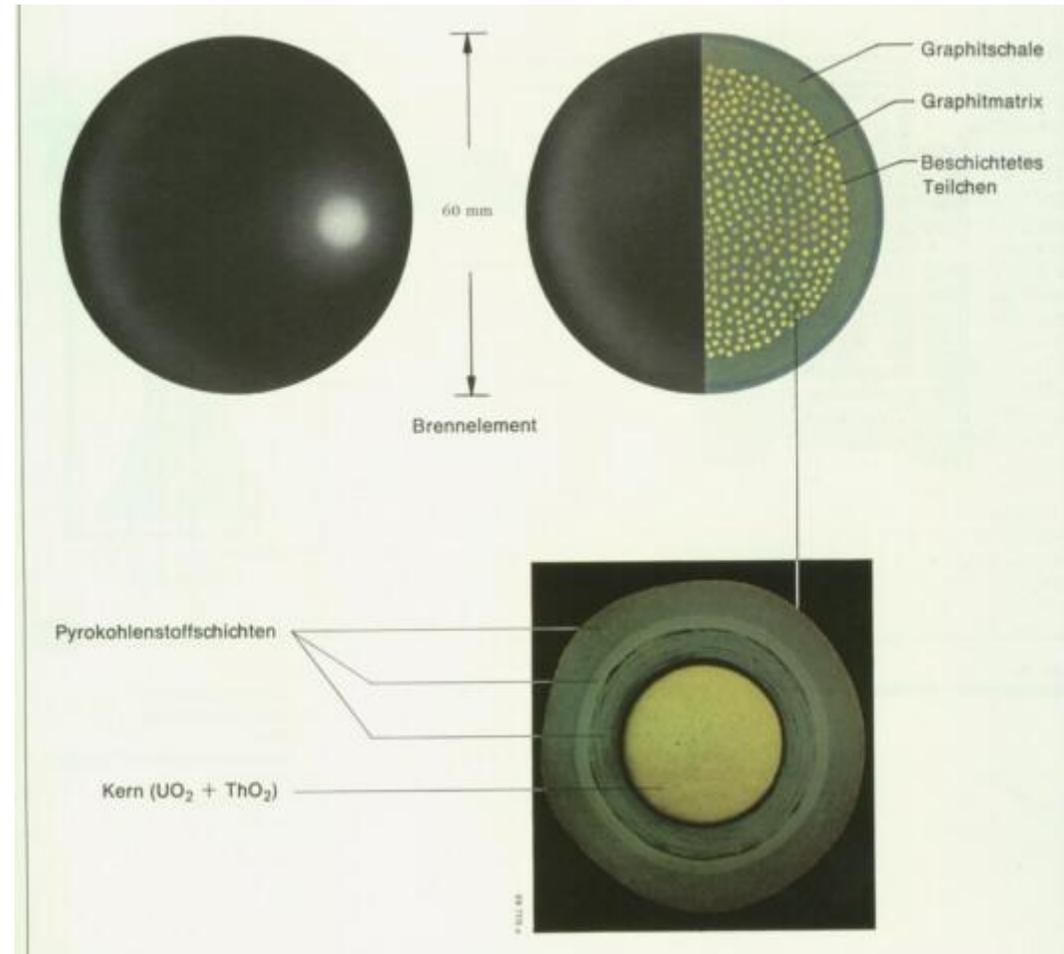
3.5 Hochtemperatur-/Kugelhaufenreaktor

Technische Daten am Beispiel: THTR-300 in Hamm-Üntrop

Kühlmittel (primär/sekundär)	Helium / Wasser	Anreicherung an U-235	93 %
Druck (primär/sekundär)	40 bar / 180 bar	Kernbrennstoffmenge	675000 Kugeln
Temperatur (primär/sekundär)	250°C-750°C / 530 °C	Wirkungsgrad	39,5 %
Moderator	Graphit	Elektrische Nettoleistung	296 MW
Brennstoff / Brutmaterial	U-253 , U-233 / Th-232	Thermale Leistung	750 MW



Hochtemperatur-/Kugelhaufenreaktor



Brennstoffgehalt : 0,96g U-235 und 10,2g Th-232 pro Kugel

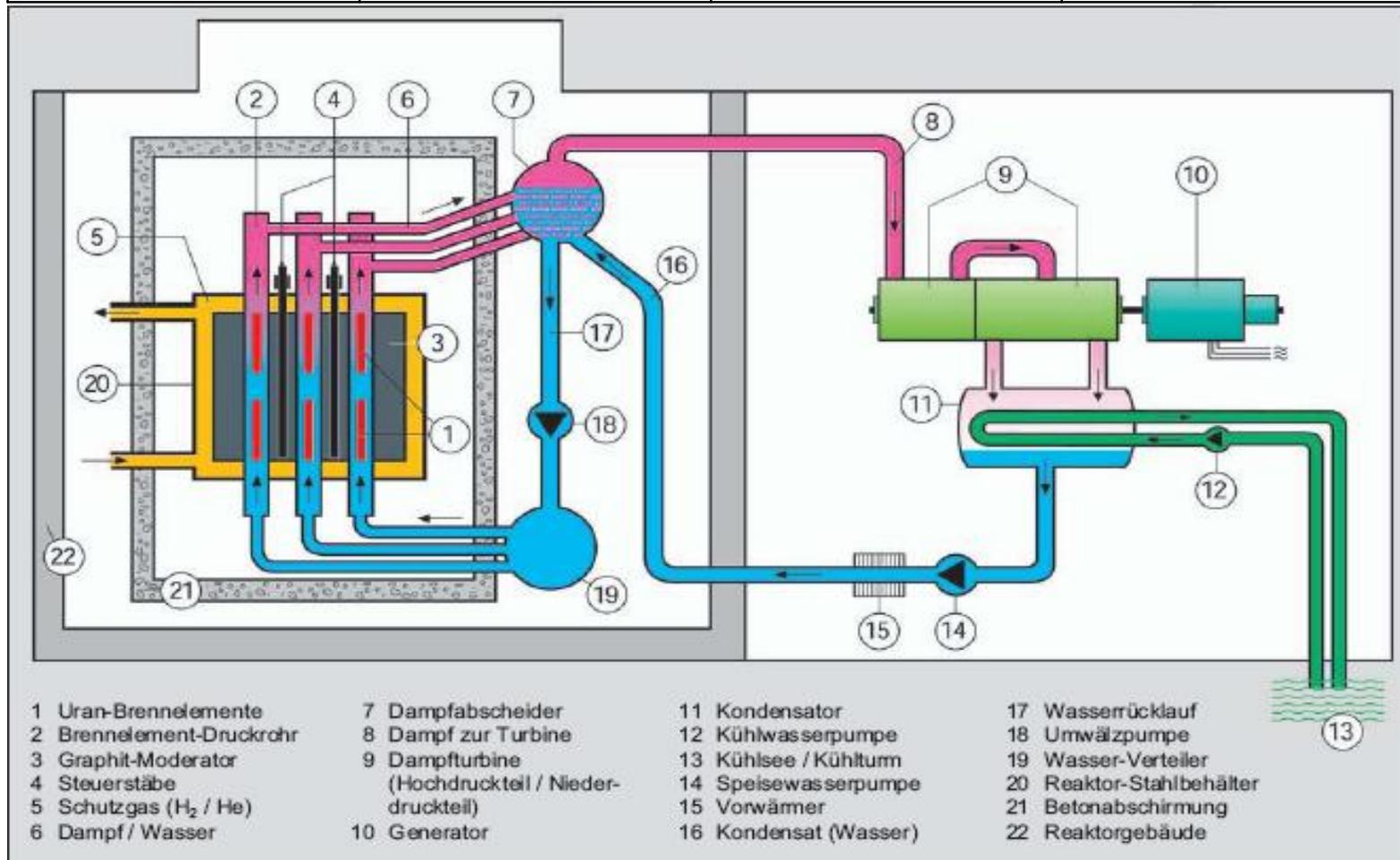
Hochtemperatur-/Kugelhaufenreaktor

Vorteile	Nachteile
<ol style="list-style-type: none">1. Gilt als inhärent sicher wegen maximaler Reaktortemperatur2. Modulare Bauweise erlaubt bedarfsgerechte Energieversorgung3. Brennelemente können leicht während des Betriebs ausgetauscht werden	<ol style="list-style-type: none">1. Brandgefahr bei Lufteinbruch2. Gilt wegen geringerer Leistung als weniger wirtschaftlich3. Aufwendige Brennstoffherstellung

3.6 Druckröhrenreaktor

Technische Daten am Beispiel RBMK 1000:

Kühlmittel	Wasser	Anreicherung an U-235	2 %
Druck	70 bar	Kernbrennstoffmenge	190 t
Temperatur	270°C-284°C	Wirkungsgrad	31 %
Moderator	Graphit	Elektrische Nettoleistung	1000 MW
Brennstoff	U-235	Thermale Leistung	3200 MW



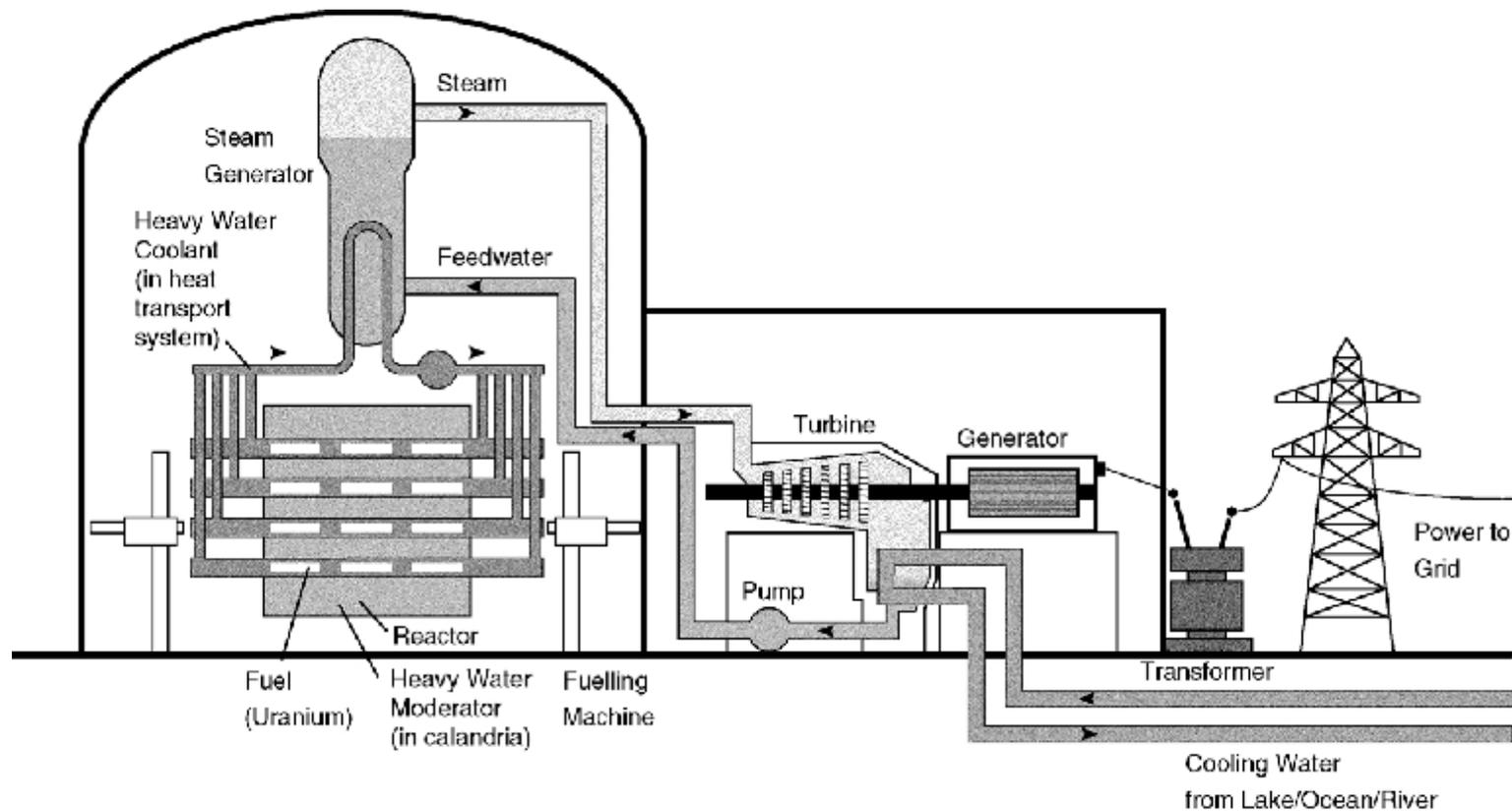
Druckröhrenreaktor

Vorteile	Nachteile
<ol style="list-style-type: none">1. Die technische Fertigung von Druckröhren ist wesentlich einfacher als die von Druckbehältern2. Die Entwicklung von Reaktoren größerer Leistung ist leicht möglich, da gleiche Komponenten lediglich in ihrer Anzahl vermehrt werden müssen3. Brennelementwechsel sind während des Betriebes möglich	<ol style="list-style-type: none">1. Mehr als 10-mal größeres Volumen als bei Leichtwasserreaktoren2. Fast 2000 Druckröhren müssen überwacht werden3. Ein Sicherheitsbehälter fehlt4. Positiver Temperaturkoeffizient5. Brennbares Graphit im Reaktorkern

3.6 CANDU-Reaktor (Canadian Deuterium Uranium)

Technische Daten am Beispiel: Darlington 1

Kühlmittel (primär/sekundär)	Deuterium/Wasser	Anreicherung an U-235	0,7 %, 2 %
Druck	k.A.	Kernbrennstoffmenge	k.A.
Moderator-Temperatur	70 °C	Wirkungsgrad	k.A.
Moderator	Deuterium	Elektrische Nettoleistung	881 MW
Brennstoff	U-235	Thermale Leistung	k.A.



CANDU-Reaktor (Canadian Deuterium Uranium)

Vorteile	Nachteile
<ol style="list-style-type: none">1. Keine Urananreicherung nötig2. Negativer Temperaturkoeffizient3. Brennelemente können während des Betriebes ausgetauscht werden	<ol style="list-style-type: none">1. Schweres Wasser ist sehr teuer2. Hohe Tritium-Emissionen

4.0 Uran

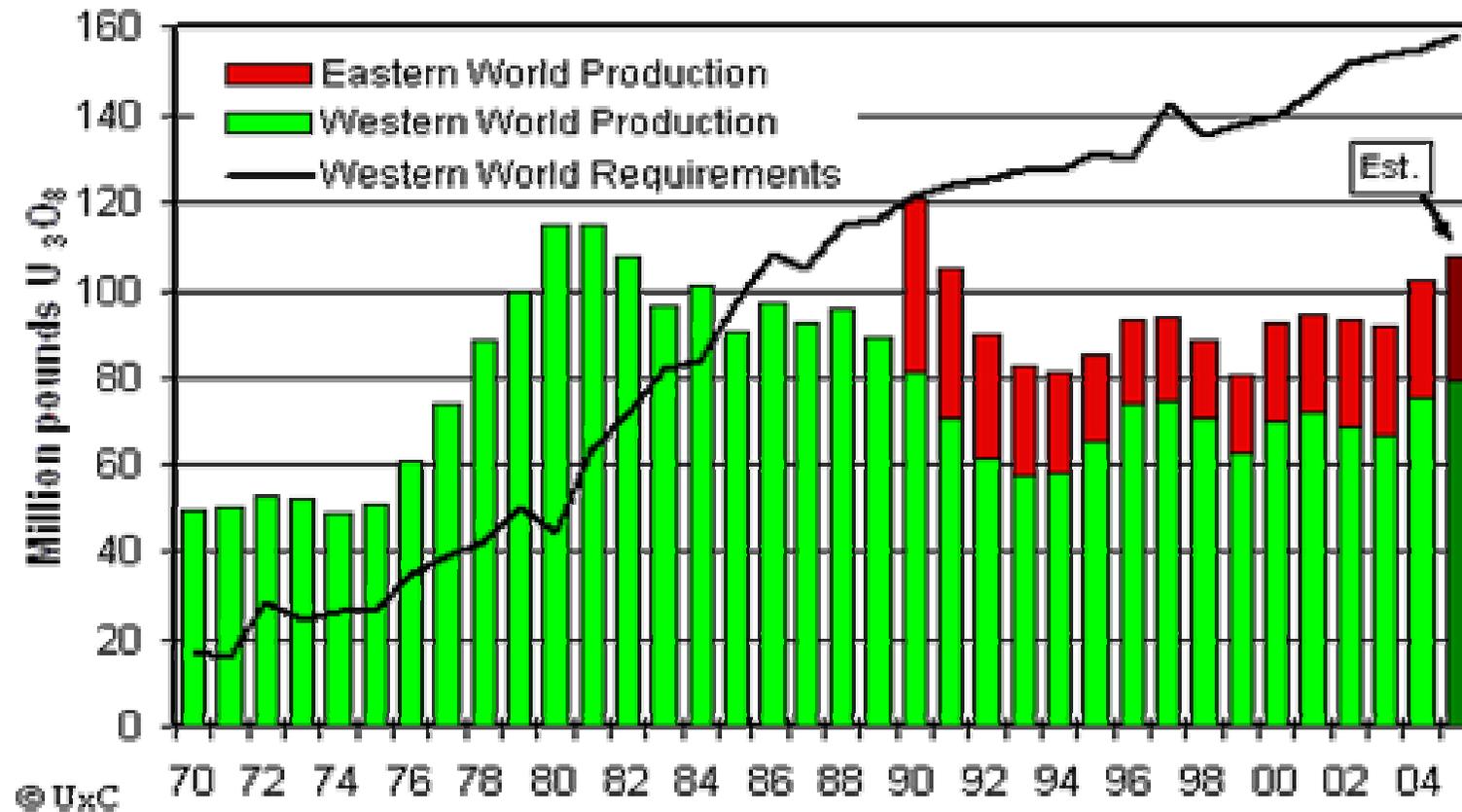


Uran kommt in der Natur nicht als reines Metall vor sondern in Form von über 200 Uranmineralien.

Isotopengemisch mit :

- 99,275 % U-238
 - 0,72 % U-235
 - 0,005 % U-234
- Konzentration in der Erdkruste : 4 mg/kg
- Konzentration im Meerwasser : 3,3 µg/l

4.1 Uranverbrauch und -Produktion



4.2 Zukunftsprognosen

Angaben vom BGR 2003 (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe)

Bisher gewonnene Uranmengen	2,1 Mt
Gewinnbare Reserven (bis 40\$/kg)	1,57 Mt
Weltweiter Verbrauch (2002)	64400 t
→ statistische Reichweite	24 Jahre
Nachgewiesene Ressourcen (40-130\$/kg)	1,4 Mt
Unentdeckte geschätzte Ressourcen	1,8 Mt
→ max. statistische Reichweite	Ca. 80 Jahre

4.3 Uranabbau

Tage- und Untertagebau

- **Anschließend chemische Abtrennung des Urans vom restlichen Gestein**
 - **Auslaugen (90 % des Urans lassen sich so gewinnen)**
 - **Filtern, Dekantieren, Extrahieren**
 - **Ausfällen durch Zugabe von Ammoniak → Yellowcake**
- **Kalzinierung (Umwandlung in Uranoxid)**

Gefahren :

- **Nach dem Abbau verbleiben mehr als 80% der Radioaktivität in den Abraumhalden**
- **Wind verweht radioaktive Partikel in alle Richtungen**
- **Kontaminiertes Wasser gelangt ins Grundwasser und in Flüsse**
- **Das gefährliche Edelgas Radon, welches durch den Zerfall von Uran entsteht erhöht nachweislich das Lungenkrebsrisiko an den Abbaustädten**

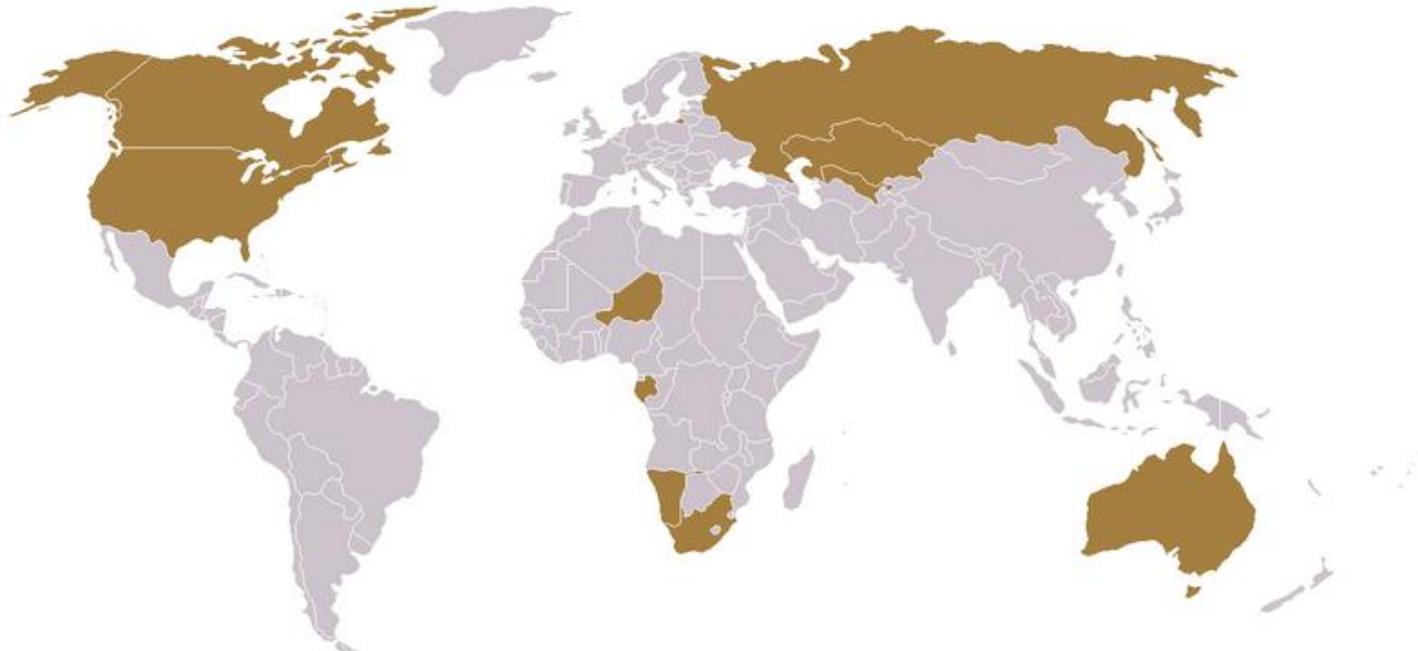
In-situ-Methode (Bei Erzen mit geringem Urangehalt)

- **Es werden 2 Schächte gebohrt**
- **In einen wird eine Uranlösende chemische Flüssigkeit gegeben**
- **Im anderen Schacht, der in Grundwasserfließrichtung liegt, wird das kontaminierte Wasser hochgepumpt**

Gefahren :

Es kann nicht garantiert werden, dass das stark kontaminierte Grundwasser vollständig hochgepumpt wird. Deswegen ist in Siedlungsgebieten und solchen wo das Grundwasser nicht versickern kann ist diese Abbaumethode verboten

10 Staaten fördern 94 % der weltweiten Urangewinnung



4.4 Urananreicherung

Gaszentrifugenverfahren

- international am häufigsten verwendetes Verfahren
- 50 kWh pro kg Trennarbeit
- Gasförmiges Uranhexafluorid (UF₆) wird in das Innere eines schnell rotierenden Zylinders geleitet
- das schwerere U-238 sammelt sich außen, während das wertvolle und leichtere Isotop U-235 weiter innen bleibt
- Durch Erzeugen einer Temperaturdifferenz zwischen Zylinderdeckel und –Boden wird das Konzentrationsgefälle hauptsächlich axial
- Somit können Endprodukte (Product) und Anfangsprodukte (Tails) durch Boden und Deckel der Zentrifuge entnommen werden

Diffusionsmethode

- UF₆-Gas diffundiert durch eine poröse Membran
- U-235 ist leichter und diffundiert somit schneller als U-238
- Trennfaktor : 1,004 (Verhältnis U-235 Anteil in Product und Tail)
- Kaskadierung erhöht den Trennfaktor und somit den Grad der Anreicherung
- 2300 – 2500 kWh pro kg Urantrennarbeit

Elektromagnetische Anreicherung

- Prinzip des Massen-Spektrometers
- Wird nur in Forschung verwendet, da nur einzelne Atome gewonnen werden

Laser-Anreicherung

- Absorptionslinien der Isotope überlappen sich wenig
- Laser geeigneter Wellenlänge sorgt für eine Isotopenselektive Anregung
- die selektiv ionisierten Atome des einen Isotops werden dann durch ein E-Feld rausgefiltert
- technische Probleme verhindern industrielle Nutzung

5.0 Entsorgung

Abklingbecken

- Jährlich werden in einem Kraftwerk ca. $\frac{1}{4}$ der Brennelemente durch neue ersetzt
- Entnommene Brennelemente geben noch Wärme ab und kühlen deshalb etwa 5 Jahre im Abklingbecken des Kraftwerks ab
- Nach dieser Abklingzeit haben die Behälter immer noch eine Oberflächentemperatur von 50-70 °C

Standort-Zwischenlager

- Seit dem 01.07.05 sind von der Bundesregierung die Transporte zu Wiederaufbereitungsanlagen eingestellt worden
- Geplant ist Standortzwischenlager auf den Kraftwerksgeländen zu errichten, wo die Brennelemente 40 Jahre lang lagern
- Bis zur Fertigstellung dieser Zwischenlager werden sogenannte Interimslager benutzt
- Erst dann hat die Wärmeentwicklung so weit nachgelassen, sodass die Brennelemente in anderen Behältern unterirdisch gelagert werden können

Endlager

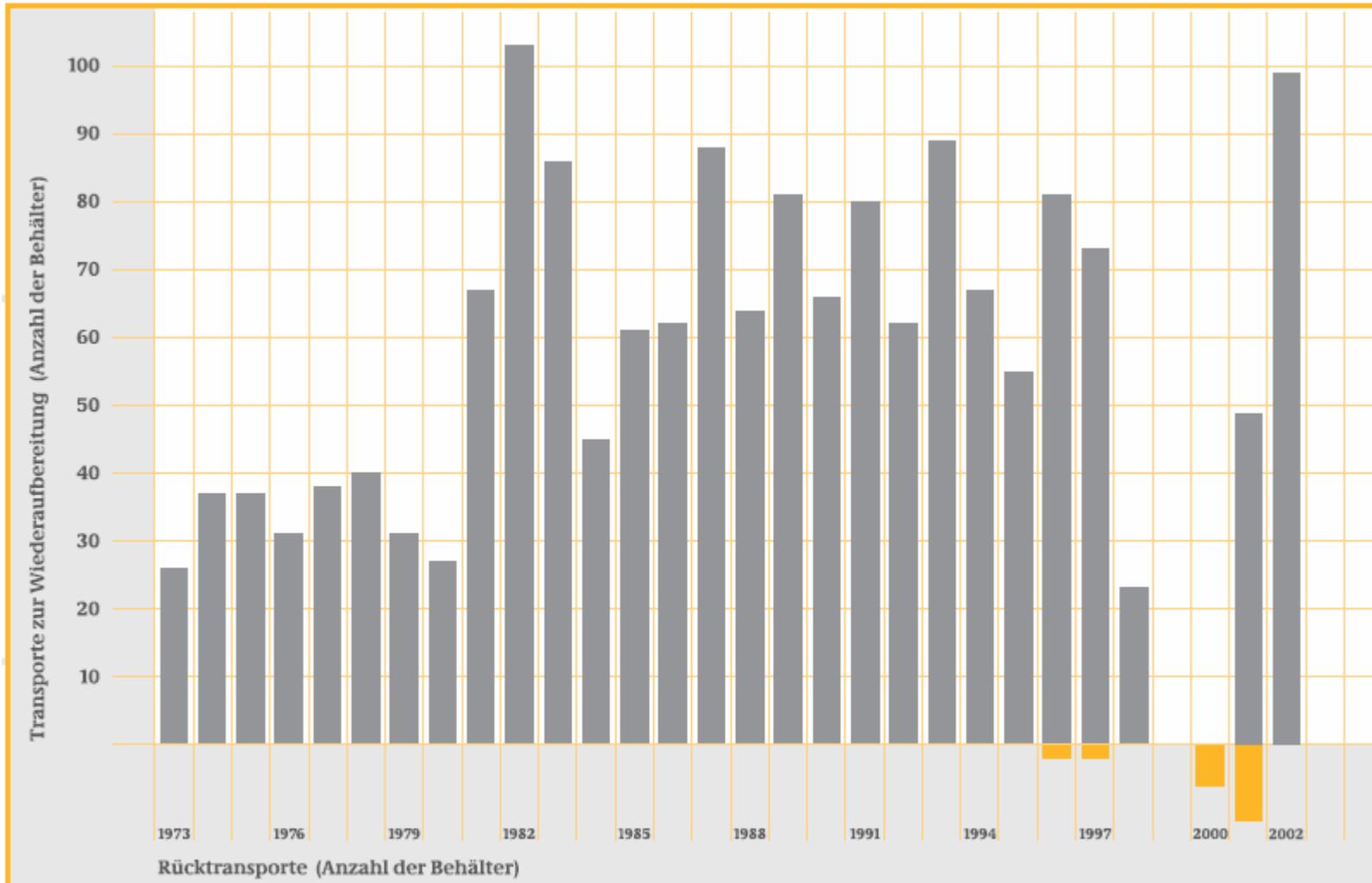
- Nach 1000 Jahren ist die Aktivität abgebrannter Brennelemente auf die von natürlichem Uranerz abgefallen
- Bereits früh wurde sich in Deutschland auf Steinsalz als Wirtsgestein für die Endlagerung entschieden, Gründe :
 - Salz ist beständig gegen Rissentwicklungen (plastisch)
 - Ermöglicht schnelle Ausgrabung von Hohlräumen
 - Sehr gute Wärmeleiteigenschaften
 - Trotz Wasserlöslichkeit sind Steinsalz-Lagerstädten über Millionen von Jahren beständig
 - In Deutschland sind Steinsalz-Lagerstädten in großer Zahl vorhanden



Geschichtliche Entwicklung der Endlagerungsproblematik

- 1965 wurde das frühere **Salzbergwerk Asse** als „Forschungsendlager“ in Betrieb genommen
 - 1995-2003 wurde das Bergwerk, in dem nun ca 42.000 m³ schwach- und mittelradioaktives Material lagern mit Salz aufgeschüttet
 - Bis 2013 soll die Anlage komplett versiegelt werden
 - Ca **120 Mio €** wurden vom Steuerzahler für die Teilverfüllung aufgebracht
- 1971 wurde in der DDR das **Steinsalzbergwerk Morsleben** als Endlager in Betrieb genommen
 - Ab 1994 wurde aus allen Bundesländern eingelagert
 - Insgesamt 36.754 m³ radioaktives Material
 - 2001 wurde die Einlagerung eingestellt
 - Stilllegung kostet **2,57 Mrd €**, Instandhaltungskosten, die vom Steuerzahler aufgebracht werden müssen **23 Mio € im Jahr**
- Bereits in den 70ern war **Gorleben** geplanter Endlagerungs-Standort
 - 2000 wurde das bis dahin entwickelte Projekt bis auf weiteres eingestellt
 - Bisher wurden ca. **1,3 Mrd €** in das Projekt Endlager Gorleben investiert
- Schon 1970 wurde die **Eisenbergwerk Konrad** als Endlagerungs-Standort ausgesucht
 - 1982 Planfeststellungsverfahren eingeleitet
 - 2002 Planfeststellungsbeschluss erteilt mit Fassungsvermögen von 300.000 m³
 - Wegen laufender Klagen ist die Umrüstung zu einem Endlager bis zum Abschluss der Gerichtsverhandlungen verschoben worden
 - Bisher wurden ca. **800 Mio €**, im wesentlichen durch die Energieversorgungsunternehmen (93 %) investiert

6.0 Castortransporte



Transporte bestrahlter Brennelemente zu den Wiederaufarbeitungsanlagen in Frankreich und England sowie Rücktransporte hochradioaktiver Glaskokillen (Anzahl der Behälter)

6.1 Behälter

Glaskokillen

- **Der hochradioaktive Abfall wird bei ca. 1.150 Grad Celsius mit einem Spezialgranulat zu einem homogenen Glasprodukt verschmolzen**
- **Die noch flüssige Glasmasse wird in einen Edelstahlbehälter, die sogenannte Kokille, gefüllt**
- **Anschließend wird die Edelstahlkokille mit einem Edelstahldeckel gasdicht verschweißt**
- **Die Kokillen haben einen Durchmesser von 43 cm und sind 1,34 m hoch**



Castorbehälter

Abmessungen in mm
(ohne Stoßdämpfer)(D x H) 2500 x 6058

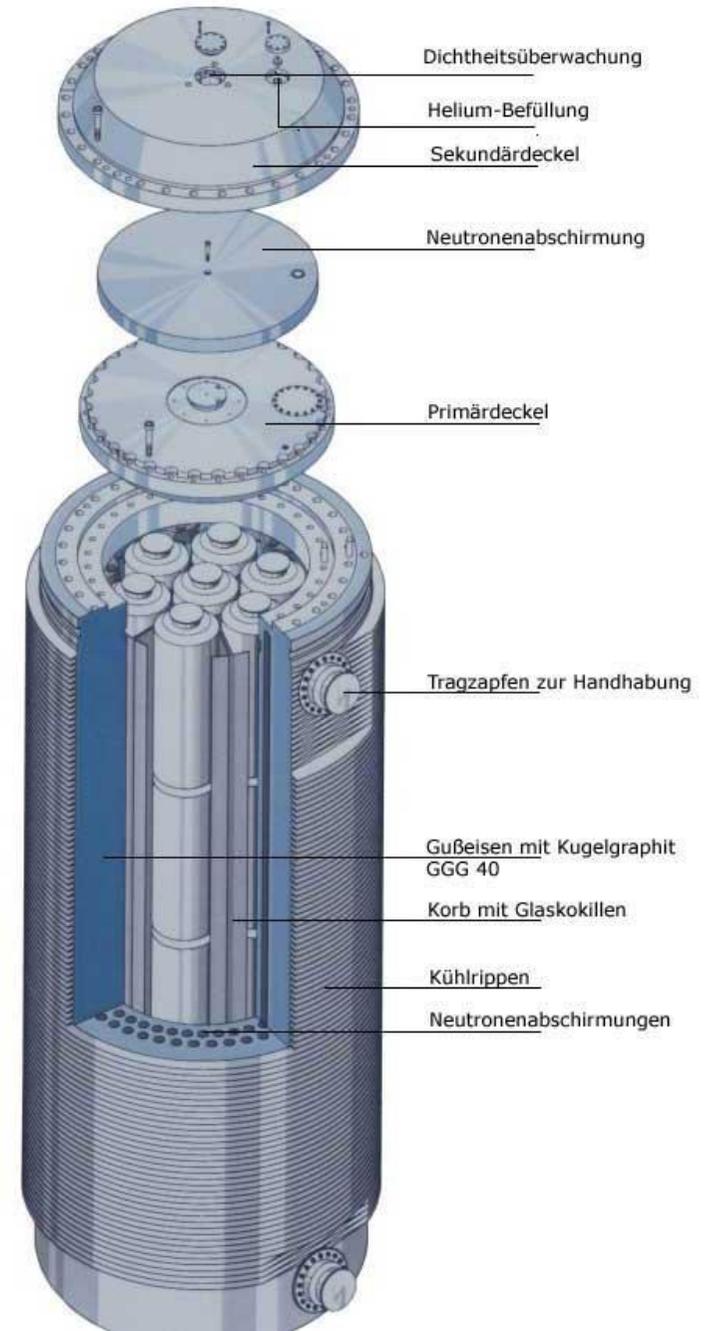
Inventar 20 oder 28 HAW-
Kokillen

Gewicht leer ca. 100 t

Gewicht beladen
(ohne Stoßdämpfer) 112 t

Max. Temperatur an der
Behälteroberfläche ca. 80 - 100 °C

Castor-Behälter



Sicherheitstests (Quelle:BMU)

Die Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) prüft jeden Behältertyp, ob er folgenden Belastungen standhält

1. freier Fall aus neun Meter Höhe auf ein unnachgiebiges Aufprallfundament (gehärtete Betonplatte)
2. freier Fall aus einem Meter Höhe auf einen 15 cm dicken Stahldorn
3. allseitiger Feuertest von 800°C über 30 Minuten
4. Druck- und Dichtigkeitstest in Wasser über acht Stunden in 15 Meter Tiefe
5. Eintauchprüfung von Behältern mit abgebrannten Brennstäben in 200 Meter Wassertiefe über eine Stunde

Transportsicherheit

Die atom- und verkehrsrechtliche Aufsicht über die Transporte obliegt den Landesbehörden mit Ausnahme der Transporte im Eisenbahnverkehr, für deren Aufsicht das Eisenbahn-Bundesamt verantwortlich ist und der verkehrsrechtlichen Aufsicht über Transporte im Luftverkehr, die vom Luftfahrt-Bundesamt durchgeführt wird

Strahlung beim Castortransport

- EURATOM :Für Zivilpersonen gilt ein Grenzwert der effektiven Dosis von 1 mSv/a für eine zusätzliche Strahlenexposition
- Zum Vergleich :
 - Natürliche Strahlenbelastung ca 2,1 mSv/a
 - 10-stündiger Flug 0,05 mSv
 - Röntgenuntersuchung 1,5 mSv
- Gemessene Strahlenbelastung in maximal 4 m Entfernung vom Behälter (1150 ausgewertete Dosimeter) blieb unter der Nachweisgrenze von 0,03 mSv

Kosten

Die Personal- und Sachkosten für den BGS-Einsatz bei einem Castortransport belaufen sich, nach Angaben des deutschen Bundestages auf:

Ca 50 Mio €

7.0 Umweltfreundlichkeit

7.1 CO2-Emissionen

CO2-Emissionen bei der Stromerzeugung in verschiedenen Kraftwerken moderner Technik unter Berücksichtigung von Bau, Betrieb und Brennstoffeinsatz:

Kilogramm Kohlendioxid pro Kilowattstunde Strom	
Braunkohle	1,040
Steinkohle	0,830
Erdgas (Gas- und Dampfkraftwerk neuester Technologie)	0,380
Photovoltaikanlage in Deutschland	0,200
Photovoltaikanlage in Äquatornähe	0,100
Kernenergie	0,025
Windenergie	0,020
Wasserkraft	0,004

7.2 Strahlenbelastung

Ursache der Strahlendosis	effektive Dosis in mSv/a	
	Mittelwert für die Bevölkerung	Wertebereich für Einzelpersonen
Natur		
kosmische Strahlung	0,3	0,3 bis 0,5
terrestr. Strahlung	0,4	0,2 bis 3
innere Bestrahlung	1,4	0,5 bis 8
Natur gesamt	2,1	1 bis 10
Zivilisation		
Medizin	2,0	0,01 bis 30
Erhöhung der natürlichen Dosis durch industrielle Tätigkeit	0,01	0,1 bis 2
Tschernobyl-Unfall	0,01	0,005 bis 0,04
Kernwaffentests	0,005	0,002 bis 0,01
Flugreisen	0,005	0,01 bis 5
Beruf	0,002	0,5 bis 5
fossile Energieträger	0,002	0,001 bis 0,01
Kernkraftwerke	0,001	0,001 bis 0,01
Industrieprodukte	0,001	0,1 bis 2
Zivilisation gesamt	2,0	0,1 bis 30
gesamt	4,1	1 bis 30

Tab. 17: Strahlenexposition der Bevölkerung in Deutschland

Untersuchungsart	effektive Dosis in mSv
Computertomographie	
Bauchraum	10 - 25
Brustkorb	6 - 10
Wirbelsäule	3 - 10
Kopf	2 - 4

Tab. 10: Effektive Dosis pro Röntgenuntersuchung

Tätigkeit	normierte kollektive effektive Folgedosis Personen-Sievert pro GWa
Bergbau	0,2
Erzaufbereitung	0,008
Halden	0,04
Brennelementfertigung	0,003
Reaktorbetrieb	0,43
	0,05 deutsche Technik
Wiederaufarbeitung	0,6

Tab. 18: Normierte kollektive effektive Folgedosis für die regionale Bevölkerung durch die Emissionen radioaktiver Stoffe von kerntechnischen Anlagen, bezogen auf eine erzeugte elektrische Energie von 1 GWa

Strahlendosis in der Nähe von KKW'en

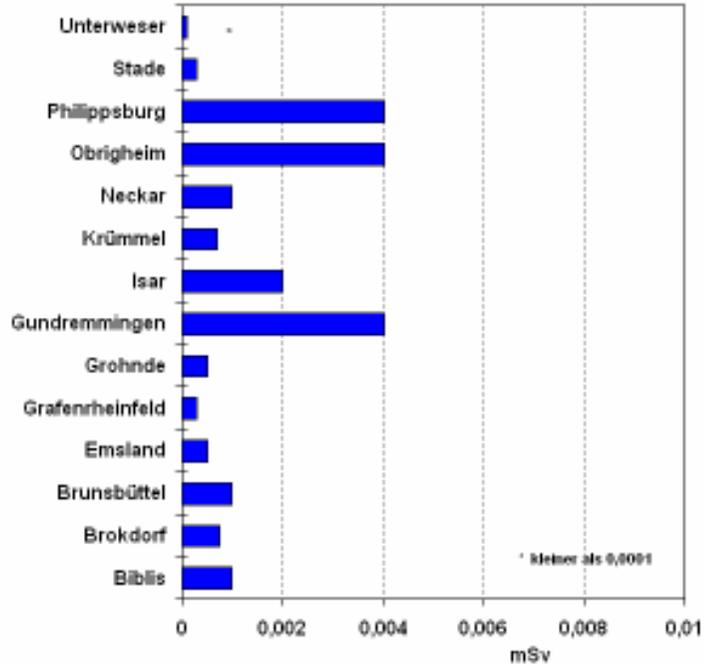


Abb. 10: Strahlendosis an der ungünstigsten Einwirkungsstelle in der Umgebung eines Kernkraftwerks durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit Abluft, 2003

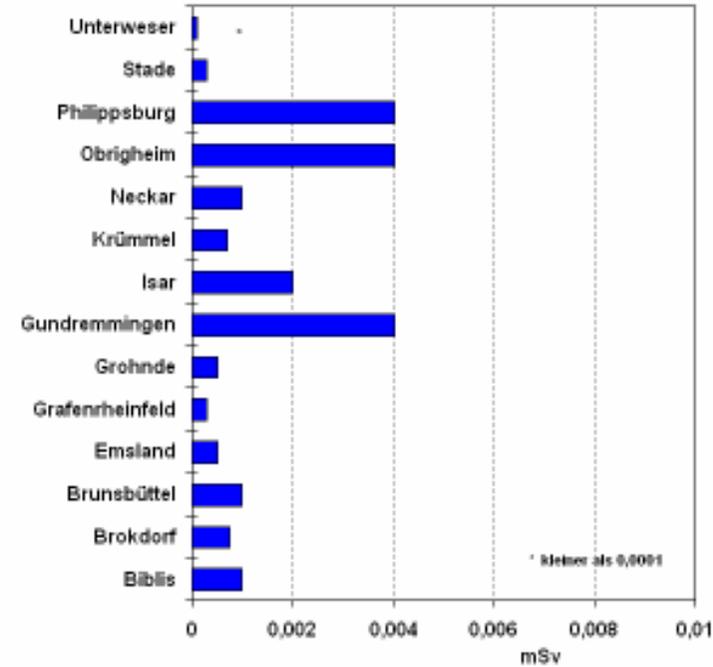


Abb. 11: Strahlendosis an der ungünstigsten Einwirkungsstelle in der Umgebung eines Kernkraftwerks durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit Abwasser, 2003

Berufliche Strahlenbelastung

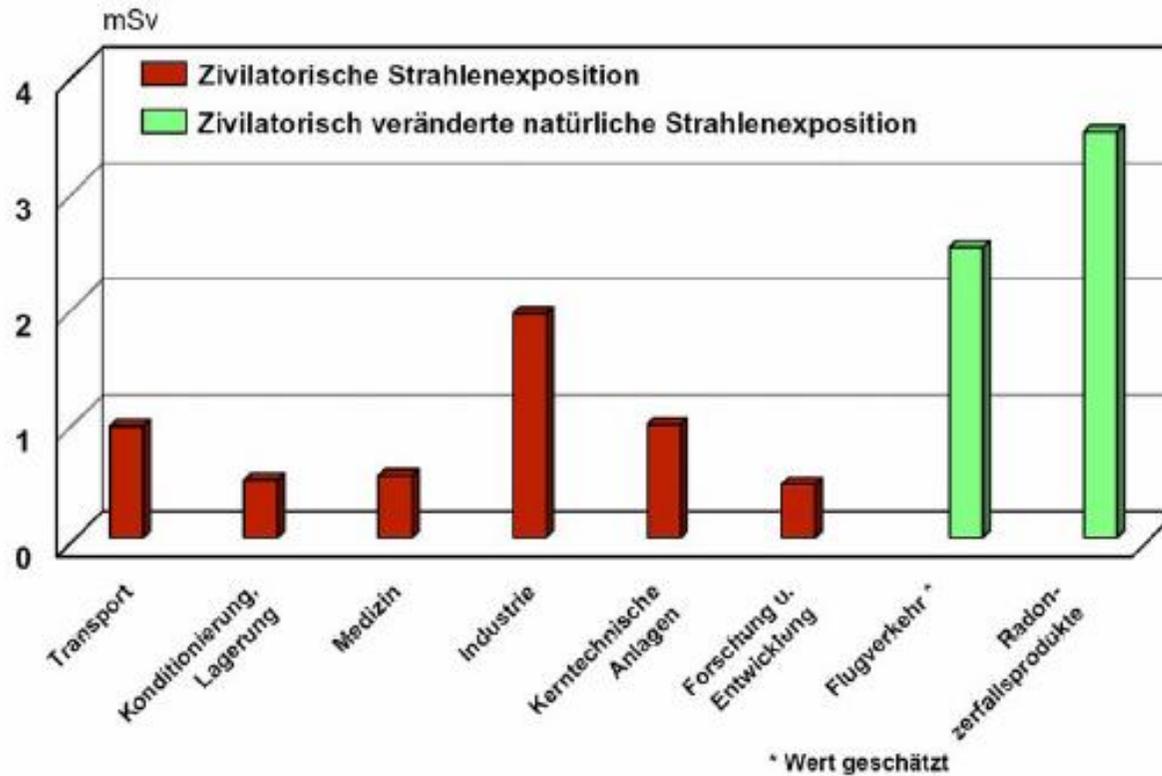


Abb. 7: Mittlere Jahrespersonendosis beruflich strahlenexponierter Personen in Deutschland im Jahr 2003 für verschiedene Bereiche

8.0 Betriebssicherheit

Sicherheitseinrichtungen eines KKWs am Beispiel Krümmel

- **Schnellabschaltsystem (SAS) / Steuerstabsantriebssystem**
 - Einstellung der Reaktorleistung
 - Bei Störfällen im Reaktor wird dieser innerhalb weniger Sekunden in unterkritischen Zustand gefahren
 - Erfolgt durch hydraulisches Einschließen der Steuerstäbe
- **Vergiftungssystem**
 - Unabhängig vom SAS wird durch Hochdruckpumpen ein flüssiger Neutronenabsorber in den RDB gepumpt
- **Druckentlastungssystem**
 - Druckbegrenzung im Reaktor durch öffnen der Entlastungsventile
 - Nicht kompensierbare Dampfmengen werden dadurch in eine Kondensationskammer des Druckabbausystems geleitet
- **Nachspeisesystem**
 - Nur bei Störfällen ohne Kühlmittelverlust
 - Hält bei Ausfall von Turbine und Turbinenkondensator den Kühlmittelfüllstand im RDB konstant
- **Einspeisesystem**
 - Bei Störfällen mit Kühlmittelverlust
 - Bei Lecks im Kühlmittelkreislauf wird dieser vom Einspeisesystem aufrechterhalten
- **Kernflutsystem**
 - Flutet den RDB nach KM-Verlust zusammen mit dem Nachkühlsystem zur Begrenzung der Kerntemperatur
- **Nachkühlsystem**
 - Führt nach Abschalten des Reaktors die Nachzerfalls- und Systemwärme ab
- **Wasserstoff-Abbausystem**
 - Hält nach KM-Verlust die Wasserstoffkonzentration im Sicherheitsbehälter unter 4%
 - Verhindert so Bildung eines zündfähigen Gemisches

9.0 Subventionen für Kernenergie in Deutschland

Subventionen Kernenergie		Quelle/ Erläuterung
Bau von Forschungsreaktoren	ca. 20 Mrd. €	Die Welt online 18.04.2000: „Laufzeiten, Importe, Subventionen - die Eckdaten des deutschen Ausstiegsszenarios“
Stilllegung/Rückbau Kerntechnischer Anlagen (bis 2009)	2,5 Mrd € (laufende Vorhaben, davon am Standort Karlsruhe 2,1 Mrd €)	Forschungszentrum Karlsruhe 2002 Halbjahresbericht über den Stand der BMBF-Stilllegungsprojekte und der vom BMBF geförderten FuE-Arbeiten zu „Stilllegung/Rückbau kerntechnischer Anlagen“ Berichtszeitraum: 01. Januar - 30. Juni 2002 (PTE-S Nr. 4)
Abriss Atomversuchsreaktor Jülich (bis 2020)	ca. 500 Mio. €	Schätzung des Bundesrechnungshofes. In: taz, 15.07.2002.
Betrieb und Stilllegung Morsleben	1,2 Mrd. €	Bundesamt für Strahlenschutz 2003. Mündl. Information am 10.12.03
Öffentlicher Finanzierungsanteil an gescheiterten Projekten (Kalkar, Hamm-Uetrop, Wackersdorf, Hoberg, Nukem, Mox, Mühlheim-Kärlich)	ca. 9 Mrd €	RWE/ Welt am Sonntag. In: Neue Energie 11/96
Castortransporte	3 Mrd.€	BKWK 2002. Vortrag von Johannes van Bergen (Geschäftsführer der Stadtwerke Schwäbisch Hall) auf dem parlamentarischen Abend des BKWK am 4.12.02 in Berlin.
Sanierung Wismut (bis 2005)	6,6 Mrd. €	Wismuth GmbH 2003. www.wismut.de
Abriss/Endlagerung Greifswald (2035)	ca. 3,7 Mrd. €	Energiewerke Nord GmbH (EWN). Kosten für Demontage, 40 jährige Zwischenlagerung, Endlagerung, Gebäuderückbau
Verlust von Steuereinnahmen aufgrund nicht versteuerter Rückstellungen	ca. 20 Mrd. €	Die Welt online 18.04.2000: „Laufzeiten, Importe, Subventionen - die Eckdaten des deutschen Ausstiegsszenarios“. Zu den angegebenen fehlenden Steuereinnahmen von ca. 17,5 Mrd. € sind in den letzten 4 Jahren (2000 –2003) ca. 2,5 Mrd. € dazugekommen (Schätzung des BEE aufgrund von 1,8 ct Rückstellungen/kWh und einen Steuersatz von ca. 50 %)
Staatshaftung oberhalb von 2,5 Mrd € für Kernkraftwerke	??	

Unfallhergang : Tschernobyl

Das fatale Experiment :

Bereits am 25. April 1986 sollte im 4. Block ein Experiment stattfinden, bei dem überprüft werden sollte, ob die Turbinen bei einem kompletten Stromausfall im Kraftwerk noch genügend Strom liefern können, um die Notkühlung des Reaktors zu gewährleisten.

Um das Experiment unter realistischen Bedingungen stattfinden zu lassen, wurde das Notprogramm "Havarieschutz" abgeschaltet, in dem alle wichtigen Sicherheitseinrichtungen wie die Notkühlung und das Einfahren der Bremsstäbe zusammengefasst sind. Doch der Beginn des Experiments wurde verschoben, so dass die unvorbereitete Nachtschicht des 26. April die Durchführung eines Experiments übernahm, dessen Versuchsanordnung den Reaktor praktisch schutzlos gemacht hatte.

Der Unfall Durch einen Bedienungsfehler des unerfahrenen Reaktoroperators Leonid Toptunow fiel kurz vor Beginn des Experiments die Reaktorleistung stark ab.

Um sie wieder anzuheben, entfernten die Operatoren Bremsstäbe (mit denen die atomare Kettenreaktion kontrolliert werden kann) und unterschritten dabei die zulässige Minimalgrenze von 28 Stäben. Damit war der Reaktor noch schwerer zu beherrschen und in einem gefährlichen Sicherheitszustand.

Dennoch befahl der Stellvertretende Chefingenieur des Kraftwerks, Anatolij Djatlow, den Beginn des Experiments.

Dabei schalteten die Operatoren zu viele Kühlpumpen zu, so dass der mit wenig Leistung arbeitende Reaktor das ihn umfließende Wasser nicht mehr verdampfen konnte.

Das Wasser begann aufzukochen, und erste hydraulische Schläge waren zu hören. Akimow, der Schichtleiter, und Toptunow wollten den Test abbrechen, doch Djatlow trieb sie weiter an.

Dabei sprach er die historischen Worte: "Noch ein, zwei Minuten, und alles ist vorbei! Etwas beweglicher, meine Herren!" Es war 1.22:30 Uhr.

Als die Bedienungsmannschaft nun den Strom abschaltete und nur die Auslaufenergie der Turbine die Wasser – pumpen antrieb, wurde wieder weniger Kühlwasser durch den Reaktorkern gepumpt. Das Wasser wurde heißer, erreichte aber nur die Siedetemperatur. Da der Reaktor nur bei verdampfendem Kühlwasser ausreichend gekühlt werden kann, begann seine Leistung anzusteigen. Es war 1.23:04 Uhr.

Spätestens an dieser Stelle wäre der Havarieschutz komplett angelaufen und hätte die Katastrophe verhindert, aber er war ja abgeschaltet. Als Akimow den sprunghaften Leistungsanstieg im Reaktor bemerkte, löste er um 1.23:40 Uhr den Havarieschutz manuell aus.

Sofort wurden alle Bremsstäbe, die sich nicht in der aktiven Zone befanden, eingefahren (über 200 Stück!). Doch genau an diesem Punkt entblöbte der RBMK-Reaktor seinen gravierendsten Konstruktionsfehler:

Die Einfahrtgeschwindigkeit der Bemsstäbe ist viel zu niedrig, deutlich langsamer als in westlichen Kernkraftwerken. Außerdem befinden sich an der unteren Spitze der Bremsstäbe Graphitköpfe, welche die Kettenreaktion nur noch beschleunigen. Das Einfahren der Bremsstäbe soll die Kettenreaktion aber stoppen. Auf diesem Konzept beruht der Sicherheitsmechanismus jedes Kernkraftwerks.

Der Konstruktionsfehler des RBMK führte aber genau zum Gegenteil.

Da die Graphitspitzen zuerst eingeführt wurden, erhöhte sich die Leistung für einen Moment sprunghaft - der letzte Schub, der "Todesstoß" für den außer Kontrolle geratenen Reaktor. Ein simpler Vergleich drängt sich auf: man fährt mit dem Auto auf einer abfallenden Gebirgsstraße und muß plötzlich eine Vollbremsung vornehmen. Beim Tritt auf die Bremse beschleunigt der Wagen jedoch...

Fatalerweise hatten sich durch die ungeheure Hitze im Reaktorkern auch noch die Kanäle der Bremsstäbe verformt, und die Bremsstäbe verklemmten sich unwiderruflich. Es waren beinahe nur die reaktionsbeschleunigenden Graphitköpfe im Reaktor. Die Katastrophe war nicht mehr zu verhindern. In der aktiven Zone begann eine chemische Reaktion zwischen dem Zirkonium, das die mittlerweile geborstenen Brennstoffkammern umhüllt, und dem Dampf. Es bildeten sich Wasserstoff und Sauerstoff - Knallgas!

Um 1.23:58 Uhr zerriß eine mächtige Knallgasexplosion den Reaktor und alles, was ihn umgab. Ein großer Teil des radioaktiven Reaktorinhalts wurde nach draußen geschleudert. Glühende Teile entzündeten die Teerdachpappe der Dächer des Maschinenhauses und des benachbarten 3. Blocks.