

Kernreaktoren*

Martin Faessler, Department für Physik, LMU

Inhalt

1. Einleitung (Energieformen im Vergleich, Energiekonsum)
2. Kernspaltung (Kernbindung, Kettenreaktion, Spaltmaterial)
3. Kernreaktor (Funktionsprinzip, Typen, Einsatz weltweit)
4. Material - Versorgung und Entsorgung
5. Sicherheit und Risiken
6. Ausblick

*Vortrag am 23.10.06 im Rahmen der Ringvorlesungen "Das Energieproblem"

1. Einleitung (Energieformen im Vergleich)



Energieverwandlungskünstler(in)

Beobachtung: Hin-und Rückflug,
für einen einzigen Kern!
(Vermutlich sicherheitsmotiviert)

Ein Energieproblem?

Futterplatz, 5m tiefer





Zum Sicherheitsaspekt:

GAU wurde vermieden, **dank Wachsamkeit und Flügel**

GAU = Grösster Anzunehmender Unfall

→ Lohnt sich der Flug (energetisch) für 1 Kern?

Meise verwandelt
**chemische Energie des
Futterkerns** in Wärme u.
mechanische Energie*

Futter**Kern**,
ca 10 Milligramm Fett,
**enthält Energie von
390 Joule!!**

**Kern einer Sonnenblume
ist Energiebombe!**

Mechanische Energie für
Flug von 5 Höhenmeter:
 $0.020 \text{ kg} \cdot 5 \text{ m} \cdot g = 1 \text{ Joule}$

Der Flug lohnt sich 300mal

*Genauerer s. Vortrag Prof.Walter Neupert

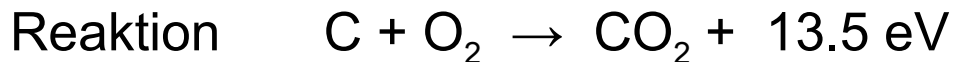
→ Chemische Energie

Ursprung chemischer Energie: Veränderung von **Bindungen zwischen Atome**, den Molekülbausteinen.

Energie wird frei bei **Übergang** in Zustand mit **stärkerer Bindung**.

1g Fett oder Öl – Verbrennung: 39 kiloJoule (=kJ)

1g Kohlenstoff -Verbrennung mit 3g Sauerstoff 110 kJ



Chemische Energie ist **Atomenergie** im wahren Sinn des Wortes, während Begriff oft **physikalisch falsch für Kernenergie** verwendet wird

→ Vergleich von Energieformen

Referenz: 1 Gramm Fett => 39 kJ chemische Energie

Wärmeenergie

39 kJ können 1 Liter Wasser um 9° Celsius erwärmen
($W = \text{Wärmekapazität} \cdot \text{Temperaturänderung}$)

Elektrische Energie

39 kJ können 100 Watt Lampe 6½ Minuten lang leuchten lassen
($W = \text{Leistung} \cdot \text{Zeit}$)

Mechanische Energie (Arbeit)

39 kJ können 70kg Masse 57 Meter hoch heben
($W = \text{Masse} \cdot \text{Erdbeschleunigung} \cdot \text{Höhe}$)
(57 Bergtouren, mit 1000 Höhenmeter, um 1 kg Fett zu verbrennen!!)

→ Energiekonsument Mensch in Deutschland, Zahlen

Angaben in **Leistung (Watt)** = Energie /Zeit (Joule/sec)
pro Kopf, im Jahresmittel

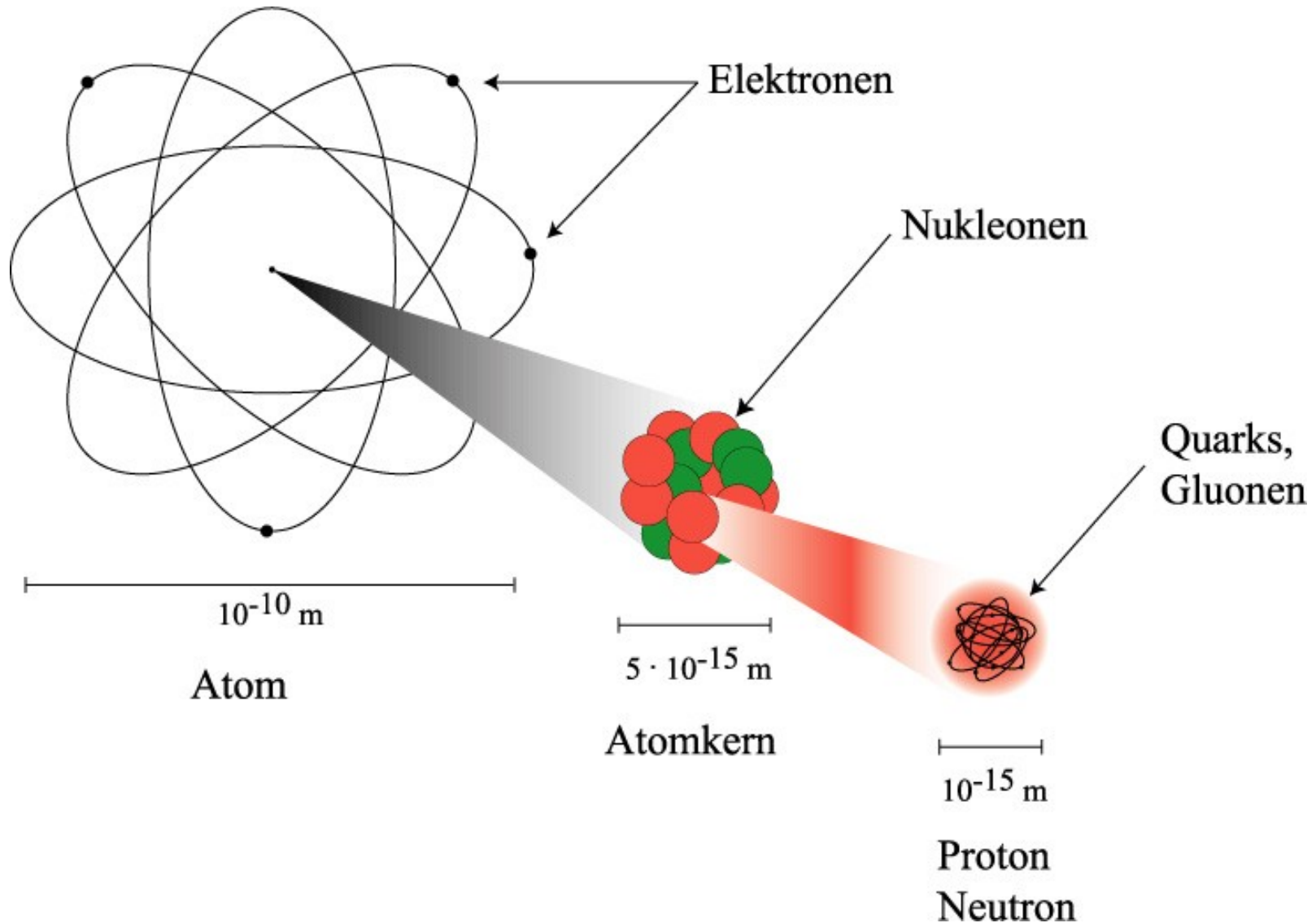
Umsatz des Körpers (Nahrung Wärme) **100 Watt**
(wie eine 100 Watt-Lampe!!)

Gesamtverbrauch an Primärenergie **5000 Watt**
(Zivilisation erhöht Verbrauch um Faktor 50 !!!!)

Gesamtverbrauch an Endenergie (2005) **3700 Watt**
Elektrischer Stromverbrauch (inkl. Industrie) **750 Watt**
Private Haushalte Raum- u. Wasserwärme **1000 Watt**

2. Kernspaltung

Das Innere von Atomen und Kernen:



→ Kernbindung und **Isotope**

→ **Kernbausteine** = “**Nukleonen**” = **Protonen** und **Neutronen** durch “**Starke Kraft**” zu **Kernen** gebunden

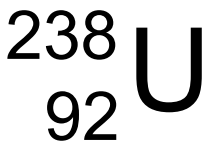
Wir unterscheiden 3 oder 4 Kräfte in der Natur: 1.) **Gravitation (=Schwerkraft)**, 2a) **elektromagnetische** + 2b) **schwache = Elektroschwache** und 3.) **Starke Kraft**.

→ **Bestimmte Kerne (**Isotope**)** charakterisiert durch

- Z** = **Zahl der Protonen** und
- A** = **Gesamtzahl aller Nukleonen**
- (**A-Z** = **Zahl der Neutronen**)

Chemische Eigenschaften (und Name des Isotops =Name des Atoms) werden durch **Z =Zahl der Protonen = Zahl der Hüllenelektronen** bestimmt

Beispiel:



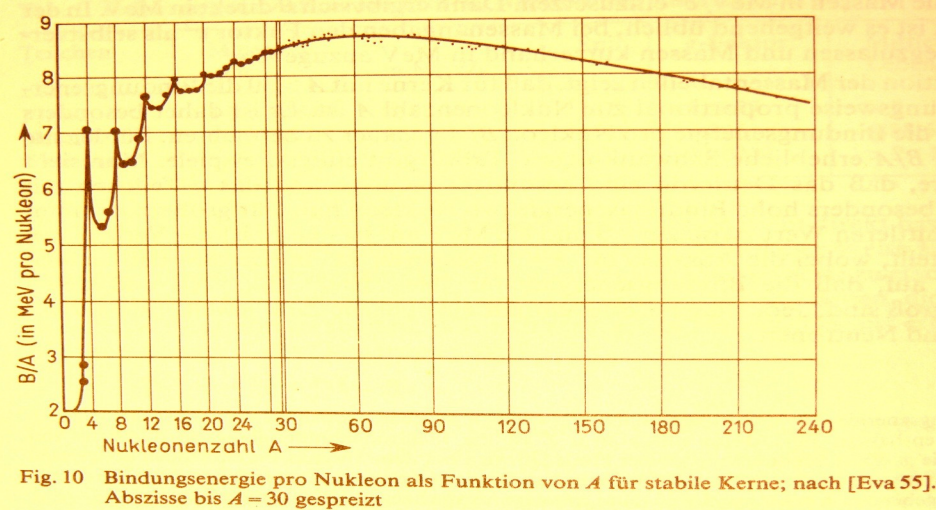
das häufigste natürliche Uran-Isotop hat
A = 238 Nukleonen
Z = 92 Protonen und **A-Z=142** Neutronen

Abkürzung U-238

→ Kernbindungsenergie pro Nukleon

als Funktion der Zahl A von Nukleonen, siehe Bild, maximal bei $A=60$ (Eisen

(Kleiner Fehler: Be-Kern $A=8$ ist instabil! →)



- **Eisen ($A=60$) und Nachbarn am stärksten gebunden.**

Daraus folgt:

- Energie wird frei bei **Fusion** von leichten Kernen zu schwereren Kernen bis hin zum Eisen. (Sonnenenergie rührt daher.)
- Energie wird frei bei Zerfall und **Spaltung (=Fission)** von schweren Kernen in Bruchstücke.
(Größter Beitrag zur Geothermie, siehe Vortrag M.Reuß)

(Warum sind schwere Kerne überhaupt stabil? Antwort: Coulomb-Barriere – analog zu Staudamm von Bergsee)

Ursprung der → **Kernenergie** ist also analog zu dem chemischer Energie: Energie wird frei bei Übergang in Zustand mit stärkerer Bindung der Kernbausteine.

Weil Kernbindung Millionen mal stärker ist als atomare, wird Millionen mal mehr Energie pro Übergang frei als bei chemischen Reaktionen!

Kernreaktion, z.B. Spaltung: U → X+Y+ Z+ 200MeV

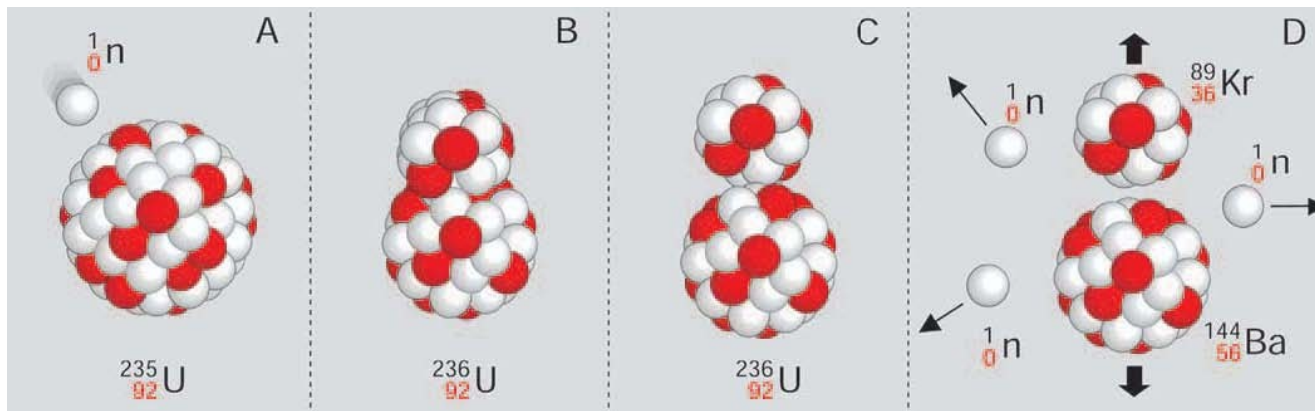
1g Uran → Spaltprodukte

82 Millionen kJ

Bei Spaltung von 1g Uran wird so viel Energie frei wie bei Verbrennung von 740000 g Kohlenstoff zu 3 Millionen g Kohlendioxid!!!! (Zur Erinnerung: Verbrennung von 1g C liefert **110 kJ**).

→ Neutronen, Auslöser und Produkt von Spaltung

- Jeder schwere Kern kann - unter Energiegewinn- gespalten werden durch Beschuss mit Teilchen.
- (Uran spaltet übrigens mit kleiner Wahrscheinlichkeit 1 zu 1 Million auch ohne Beschuss, "spontan".)
- Bei der Spaltung entstehen neben den 2 grossen Bruchstücken noch 2-3 Neutronen.
- Durch Neutronenbeschuss kann Spaltung von Uran "induziert" werden.



Schematische Darstellung der durch Neutronen induzierten Kernspaltung

→ **Kettenreaktion**

- Wenn im Mittel mindestens eines der bei einer Spaltung produzierten Neutronen eine weitere Spaltung induziert, d.h. wenn $k = \text{Neutronen-Vermehrungsfaktor} \geq 1$, kommt es zur **Kettenreaktion**.
 $k = 1 \rightarrow$ “kritisch”; $k > 1 \rightarrow$ überkritisch (gefährlich)
- Viele Voraussetzungen müssen stimmen, damit die dazu nötige “kritische” Dichte u. Masse erreicht werden kann.
- Isotope, die sich zur Kettenreaktion eignen, nennt man **Spaltmaterial**, verwendbar in Bomben und Kernreaktoren

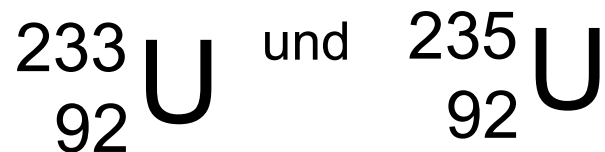
→ Spaltmaterialien

- **U-235** = ${}_{92}^{235}\text{U}$ zu 0.7% in Natururan enthalten
(99.3% U-238), beide Isotope instabil,
Halbwertszeiten $T_{1/2} = 700 \text{ Ma}$ und 4500 Ma
Anreicherung
- **Pu-239** = ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ (**Plutonium**), aus U-238 durch Neutron-
absorption herstellbar **schneller Brüter**
Halbwertszeit $T_{1/2} = 24000\text{a}$
- **U-233** aus Thorium-232 herstellbar **thermischer Brüter**
- **Pu-241** aus Pu-239 herstellbar **schneller Brüter**

→ Voraussetzungen für Eignung als Spaltmaterial:

- **Kritische Masse und Dichte des Materials für Kettenreaktion muss erreichbar sein. Dazu müssen**
 - a) Verluste von Neutronen aus dem Behälters heraus und durch Absorption über andere Prozesse als Spaltung im Inneren des Spaltmaterial-Behälters klein genug und muss
 - b) die **Spaltwahrscheinlichkeit** bei gegebener Neutronenenergie gross genug sein.

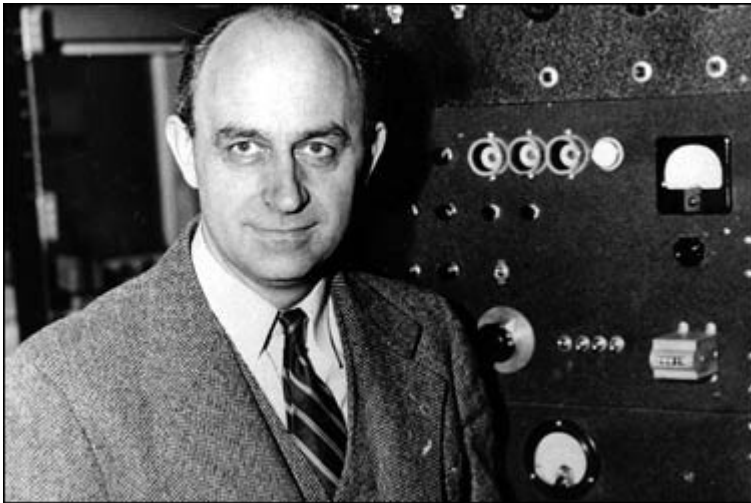
Durch Abbremsung der Neutronen in **Moderatoren** kann **Spaltwahrscheinlichkeit** drastisch (Faktor 100 und mehr) erhöht werden für die Uran- Isotope



→ Entdeckung der Kernspaltung u Kettenreaktion

1932 Entdeckung des Kernbausteins Neutron durch Chadwick
(Nobelpreis 1935)

1933 ff Fermi beschießt systematisch Kerne mit moderierten
Neutronen, entdeckt induzierte Radioaktivität
(Nobelpreis 1938 und Emigration)



Enrico Fermi (1901-1954)
Theoretiker u Experimentator
Fermistatistik, schwache
Wechselwirkung, erster
Kernreaktor u vieles andere

1938 Nachweis der Kernspaltung durch Hahn, Meitner,
Strassmann über chemischen Nachweis von Barium.
Nobelpreis 1944 (ohne L.M.) Fermipreis 1966

1939 Nachweis von Spaltungsneutronen, damit Potential zur
Kettenreaktion bewiesen (Szilard sah dies 1933 voraus)



Otto Hahn (1879-1968)
Lise Meitner (1878-1968)
(Emigration 1938)
Fritz Strassmann (1902-80)

1942 Beginn des Manhattan Projektes, Initiator Szilard
(Brief 1939 von Szilard, Einstein, Wigner an Roosevelt)

1942 Fermi baut Kernreaktor und erreicht erste kontrollierte
Kernpaltung

1945 Atombomben (Spaltung von U-235 und Pu-239) über
Hiroshima und Nagasaki



Leo Szilard (1898-1964)

Physiker und Molekularbiologe. Unglaubliche
Biographie, u.a. 7 Jahre Kollaboration mit Einstein:
Entwicklung eines Haushalt-Kühlschranks)

Versuchte ab 1939 die Physikerkollegen
zur Geheimhaltung der Entdeckungen
zu überreden, nachzulesen im Buch von
Robert Jungk: “Heller als tausend Sonnen”
Vehement gegen Einsatz der Kernbomben.

3. Kernreaktor (Funktionsprinzip)

(Typischer Druckwasserreaktor in Deutschland)

→ Reaktorkern enthält

→ **Brennstoff** angereichertes Uran mit ca 3% U-235

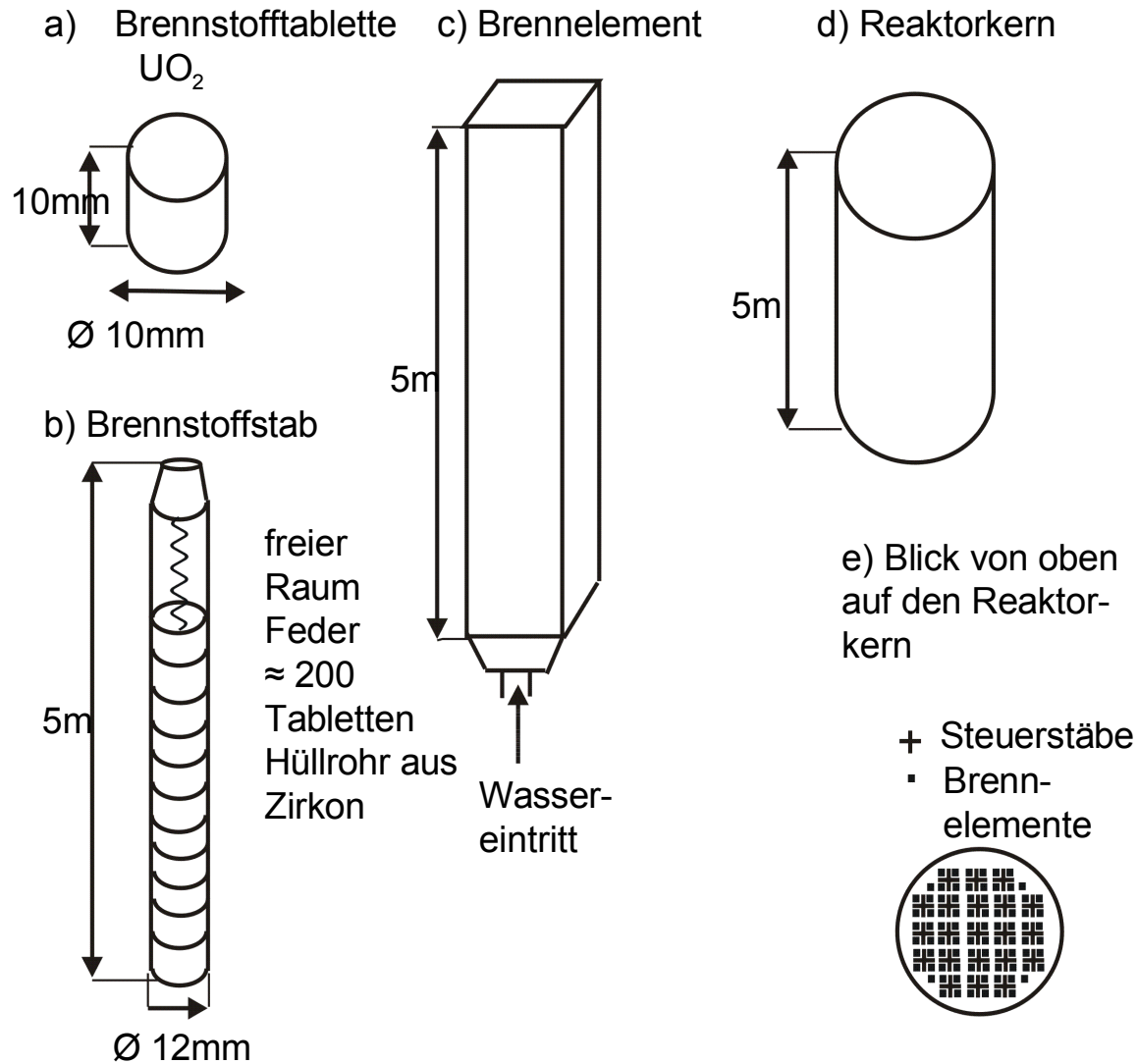
(Vergleich: Anreicherung bei Bombe: 80% U-235)

→ **Moderator** Wasser unter hohem Druck (150 bar), zur **Abbremsung** der Neutronen (erhöht Spaltwahrscheinlichkeit) und zur **Kühlung**.

(Spaltenergie geht in kinetische Energie der Spaltprodukte, die den Brennstoff erwärmt)

→ **Absorber** Bewegliche Kontrollstäbe (B, Cd, Gd) zur gesteuerten Absorption von Neutronen, so dass $k = 1$ (kritisch) zur Aufrechterhaltung der Kettenreaktion

Brennstoff in Form von **Brennelementen**, ca. 200 davon, jedes individuell wassermoderiert u. ~gekühlt; Jedes Element enthält 20-30 **Brennstäbe**, jeder Brennstab enthält 200 **Uranoxidtabletten**. Grösse einer Tablette: 1 cm hoch, 1 cm Durchmesser.



→ Erzeugung elektrischer Energie im Kernkraftwerk (im Prinzip wie bei konventionellem Kraftwerk)

Primärkreislauf (Moderator und Kühlwasser) unter hohem Druck von 150 bar, durch Brennelemente auf Temperatur 330°C erhitzt, gibt Wärme über Wärmetauscher an Wasser des Sekundärkreislaufs weiter, zur Verdampfung bei 70 bar.
Dampf treibt Turbine, Turbine treibt Stromgenerator.

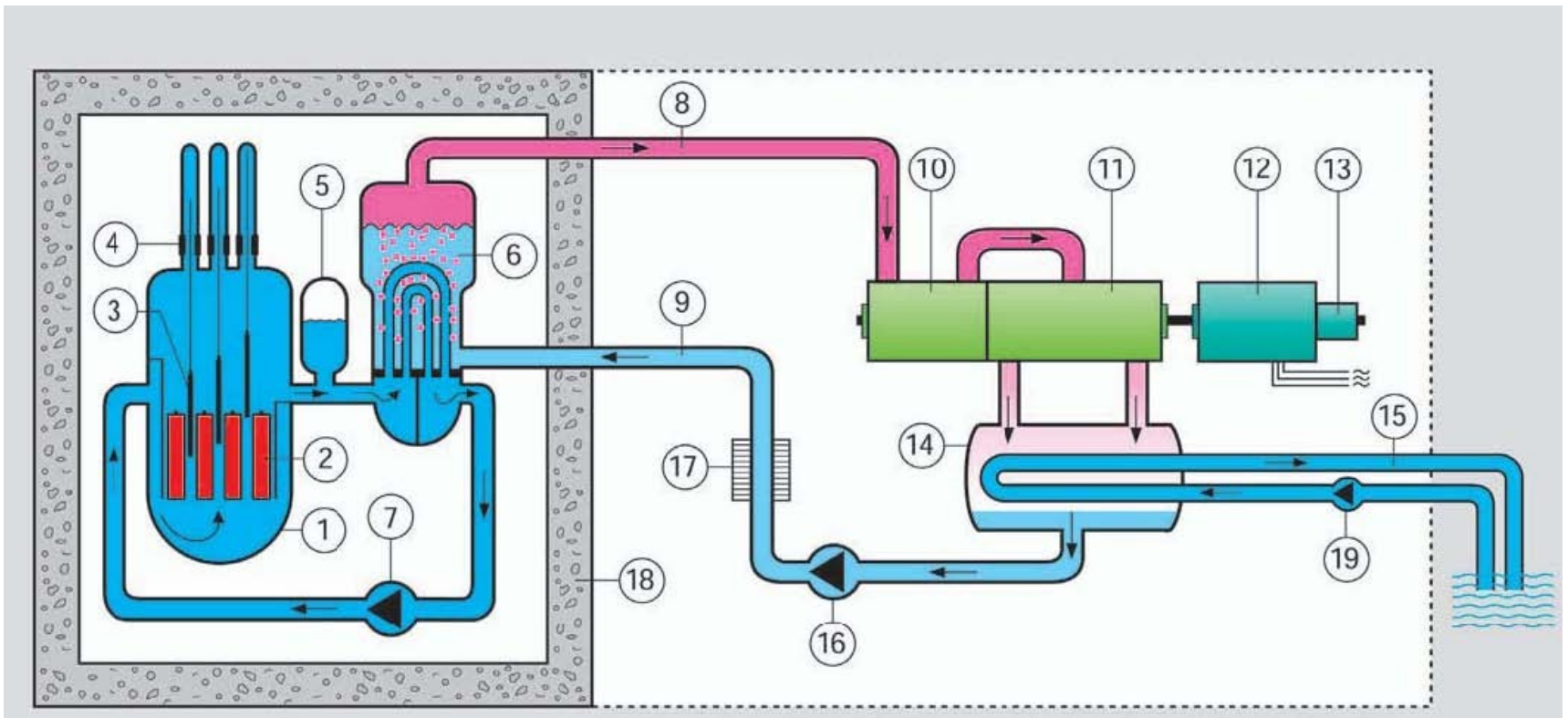
Bilanz: Spaltungsenergie wird in Wärme, Wärme in elektrische Energie verwandelt. Wirkungsgrad umso höher je höher die Temperaturdifferenz (daher Druck hoch). Typisch 35%.



Kernkraftwerk in
Leibstadt, Schweiz.
Seit 1984

Reaktor unter
dem runden Dach.

Siedewasserreaktor,
Druck 73 bar,
Temperatur
222 → 286 Grad
Celsius
3.6 GigaWatt (GW)
thermisch,
1.2 GW elektrisch



1 Reaktordruckbehälter
 2 Uranbrennelemente
 3 Steuerstäbe
 4 Steuerstabsantriebe
 5 Druckhalter
 6 Dampferzeuger
 7 Kühlmittelpumpe
 8 Frischdampf
 9 Speisewasser

10 Hochdruckteil der Turbine
 11 Niederdruckteil der Turbine
 12 Generator
 13 Erregermaschine
 14 Kondensator
 15 Flußwasser
 16 Speisewasserpumpe
 17 Vorwärmanlage
 18 Betonabschirmung

19 Kühlwasserpumpe

Technische Daten des Druckwasserreaktors Brokdorf

- Kernbrennstoff : Urandioxid
- Anreicherung von U-235: 1.9%, 2.5%, 3.5%
- Brennstoffmenge: 103 t (t = Tonnen)
- Thermische Leistung: 3.8 GigaWatt
- Elektr.Leistung (netto): 1.3 GigaWatt
- Nettowirkungsgrad: 35.5%
- Leistungsdichte: 92 kW / Liter Volumen
- Uranverbrauch: 50 t pro Jahr

Kraftwerk liefert elektrische Leistung für ca 1-2 Millionen Menschen in D
(1.3 GigaWatt / 750 Watt = 1.768.000)

Beispiele für weitere Reaktortypen

Mit Heliumgas gekühlter **Hochtemperatur-Thorium-Reaktor** alias “**Kugelhaufenreaktor**”

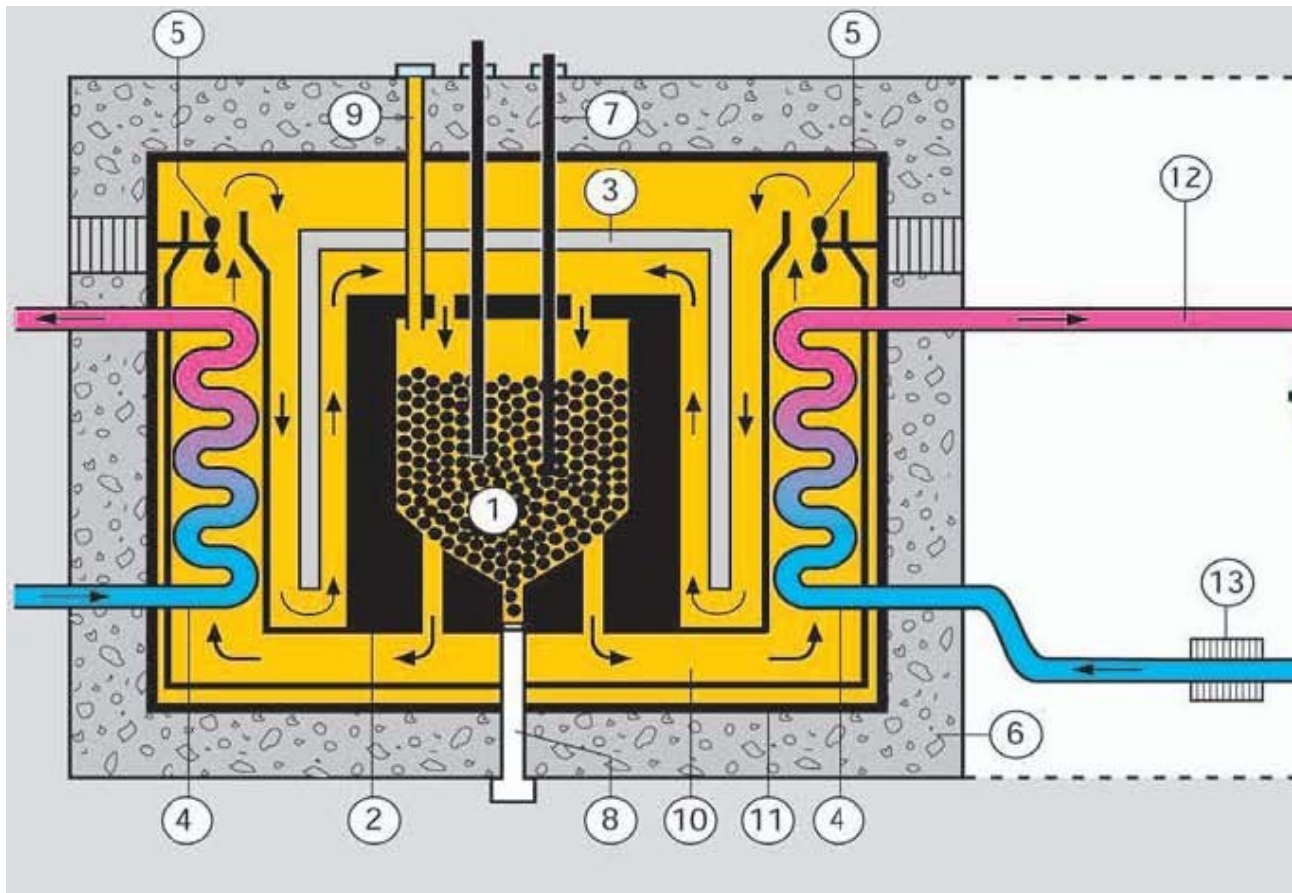
Graphitkugeln, 6 cm Durchmesser, 3 verschiedene Sorten, homogen gemischt:

360000 Kugeln, die 1 Gramm Uran-235 als Brennstoff und 10 Gramm Thorium-232 als Brutstoff enthalten, (in Form von Minikügelchen, 35000 pro Graphitkugel).
Aus Th-232 entsteht Uran-233 als neuer Brennstoff.

280000 Kugeln Graphit pur, nur zur Moderation

35000 Kugeln, die Bor enthalten zur Absorption von Neutronen

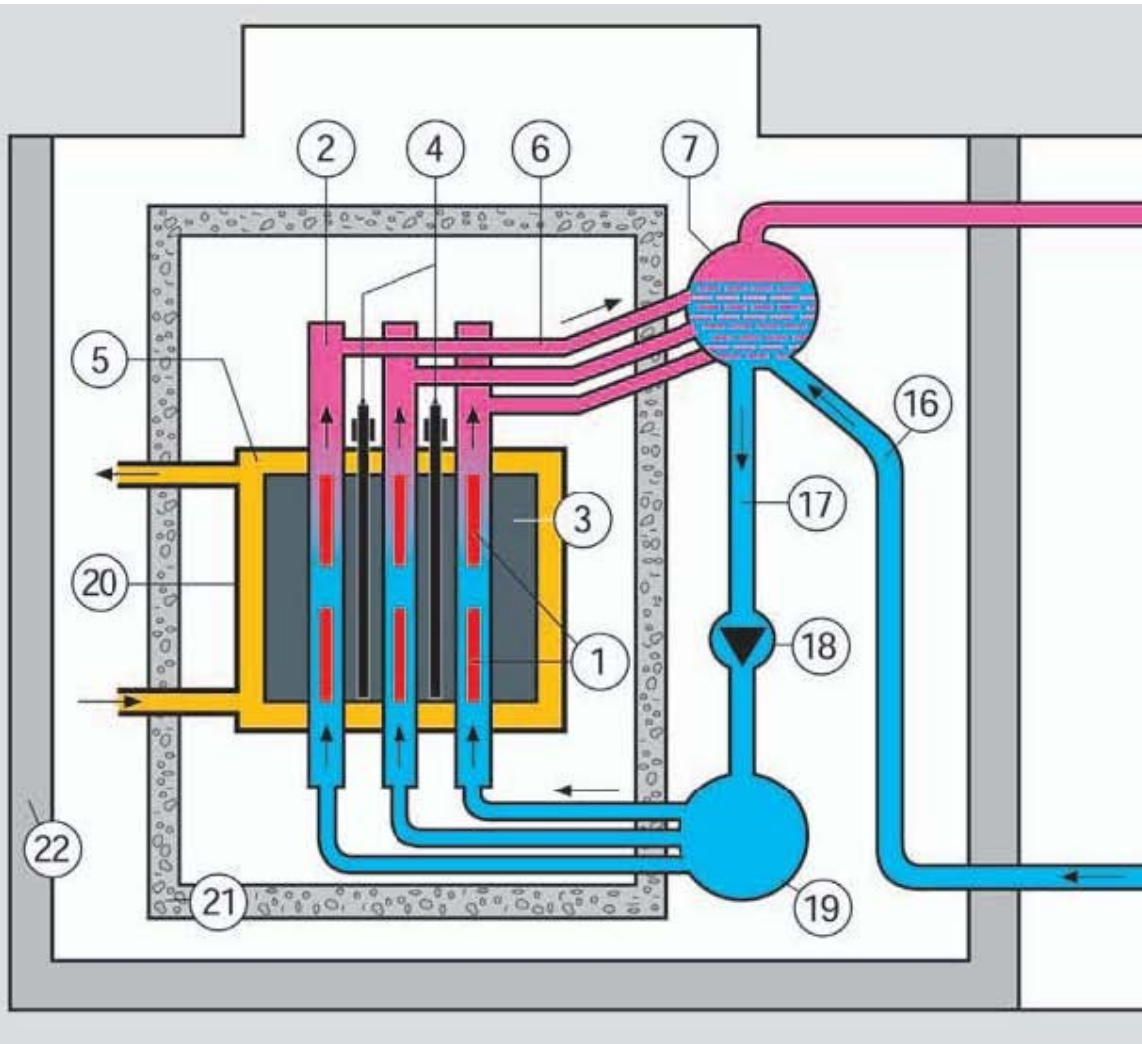
Durch hohe Temperatur des Kühlmittels kann hoher thermodynamischer Wirkungsgrad von 60% erreicht werden



- 1 Kugelhaufen (Reaktorkern)
- 2 Neutronenreflektor (Graphit)
- 3 Schild aus Eisen
- 4 Dampferzeuger
- 5 Kühlgasgebläse
- 6 Spannbehälter
- 7 Steuerstäbe (Kernstäbe)
- 8 Kugelabzugsrohr
- 9 Kugelzugaberohr
- 10 Kühlgas (Helium)
- 11 Dichthaut aus Stahl
- 12 Frischdampf
- 13

Der nach Expertenmeinung beste u sicherste Reaktortyp. Versuchsmodell in Hamm-Uentrop wurde 1989 aus politischen u ökon. Gründen abgeschaltet.

Der mit Graphit moderierte Siedewasser-Druckröhrenreaktor von **Tschernobyl**. (Kann natürliches Uran verwenden). Brennelemente hängen in ca 1660 Druckröhren in senkrechten Bohrungen im Graphit, 210 Steuer- und Absorberstäbe.



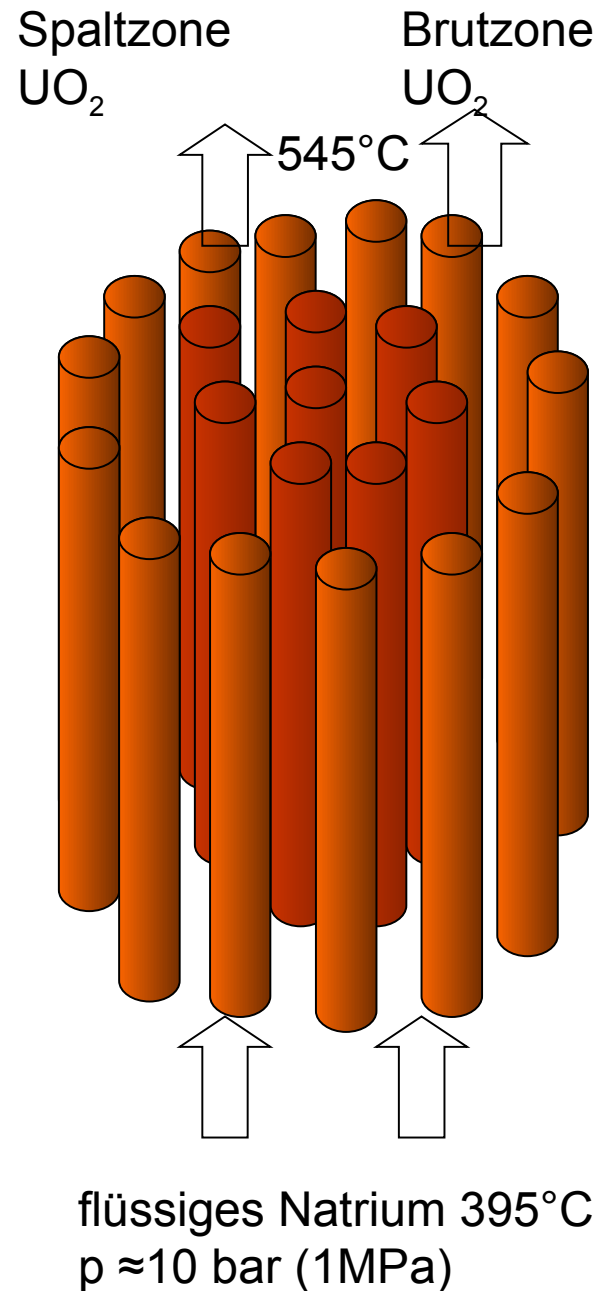
- 1 Uran-Brennelemente
- 2 Brennelement-Druckrohr
- 3 Graphit-Moderator
- 4 Steuerstäbe
- 5 Schutzgas (N_2 / He)
- 6 Dampf / Wasser
- 7 Dampfabscheider
- 8 Dampf zur Turbine
- 9 Wasser-Kondensat
- 10 Wasser-Rücklauf
- 11 Umwälzpumpe
- 12 Wasser-Verteiler
- 13 Betonabschirmung
- 14 Reaktor-Stahlbehälter
- 15 Reaktorgebäude
- 16 Abnehmbarer Teil zum Wechseln der Brennelemente

Schneller Brüter

Keine Moderatoren;
Kühlung mit flüssigem
Natrium

In Kalkar aus Sicherheits-
und Kostengründen nicht
in Betrieb genommen.

Superphenix in Frankreich
seit 1986 in Betrieb



Zu nennen:

- Kanadischer Reaktortyp **CANDU**, der **natürliches Uran** als Brennstoff verwendet.

Benötigt dafür **schweres Wasser** D_2O (D für Deuterium) als Moderator. Schweres Wasser absorbiert weniger Neutronen als normales Wasser. Daher muss Uran nicht angereichert werden. (U-235 – Anteil im Natur-Uran heute 0.7%).

- **Natürlicher Reaktor in Oklo, Afrika**,
war aktiv vor ca 2 Milliarden Jahren .
Damals war U-235 -Anteil noch ca 3%
("angereichert"), Wasser als Moderator vorhanden. Reaktor brannte
ca 150000 a, ca 5 Tonnen U-235 wurden gespalten.

Kernkraftwerke weltweit (insgesamt 440 in 2005)

(decken ca 17% des Weltbedarfs an elektrischer Energie)

Zahl und Anteil an Stromerzeugung in einigen Ländern

Deutschland: 17 Werke an 12 Standorten liefern 31% der elektr. Leistung

China:	3 + 1 im Bau	1%
Frankreich:	19 Standorte meist 2-4 Reaktoren	78%
Iran:	1 im Bau 1 geplant	
Israel:	1	
Italien:	kein aktiver Reaktor mehr	0
Russland	31 Werke	15%
Schweden	10 Werke	52%
USA	60 Standorte	20%





4. Material – Versorgung und Entsorgung

→ **Versorgung:**

Aus uranhaltigem Gestein wird Uran chemisch getrennt, Verwandlung in gasförmiges **Uranhexafluorid**.

Anreicherung des Isotops U-235 von 0.7% auf 2-4% durch Gaszentrifugen, Diffusionsverfahren, oder Trenndüsenverfahren. Sehr teuer und aufwändig.

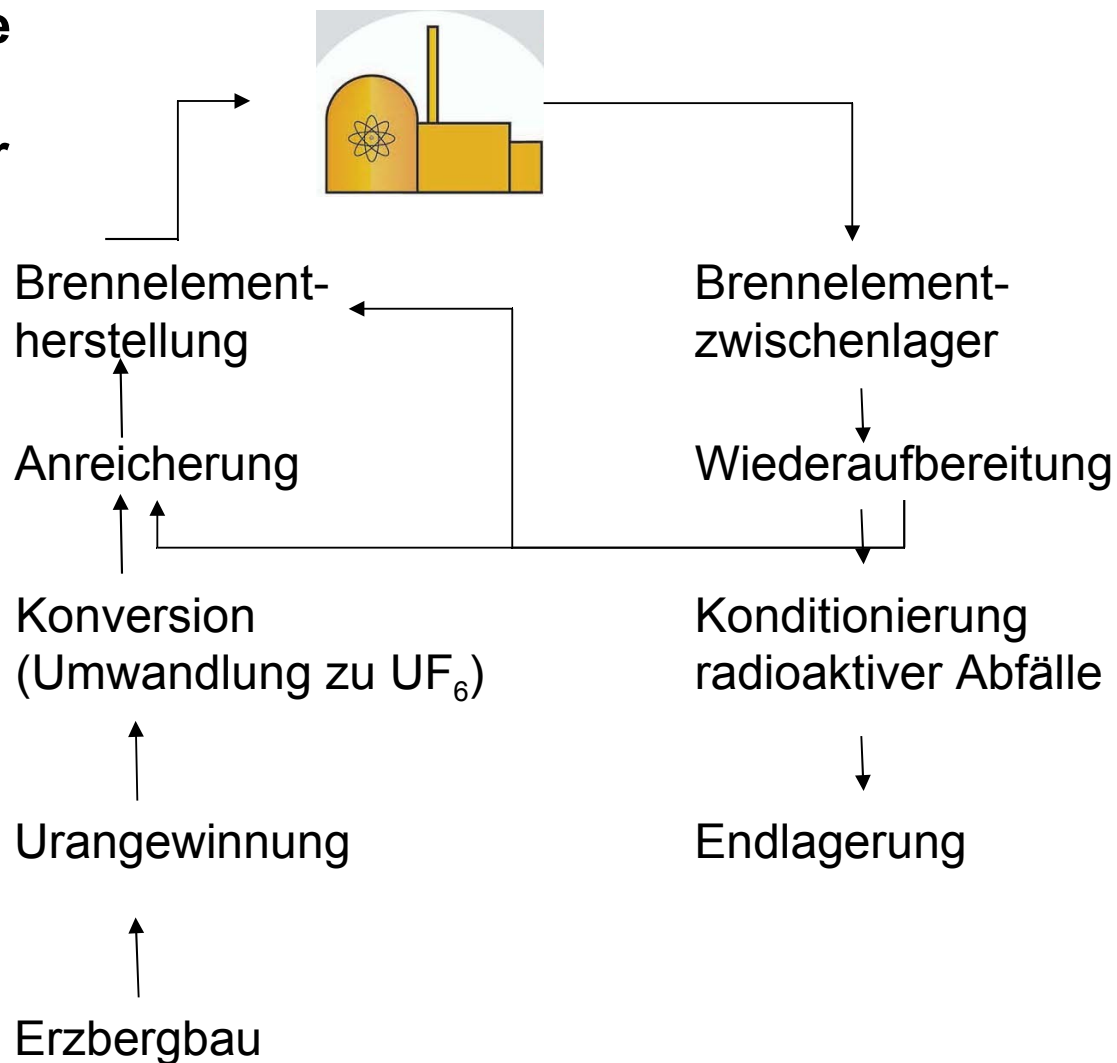
Angereichertes Gas wird chemisch in festes **Urandioxid** (in Form von Tabletten) verwandelt.

Jahresbedarf in Deutschland: 3000 Tonnen.

Abgebrannte Brennelemente in Zwischenlager, von dort zur Wiederaufbereitung oder für Endlager konditioniert.

Radioaktive Abfälle in Glas-Behälter eingeschmolzen oder in Stahlbehälter.

“Castorbehälter” für Aufbewahrung, Transport und Endlagerung der endgültig abgebrannten Brennelemente.



5. Sicherheit und Risiken

- **Kontrolle der Kettenreaktion (Kritikalität).** Multiplikationsfaktor k muss auf kritischen Wert 1 stabilisiert werden
- **Wärmeabfuhr**
Sichere Abfuhr von Wärme und **Nachwärme**
- **Strahlenschutz**
Reaktorkern ist intensive Quelle radioaktiver Strahlung
- **Brennstoff und Abfallprodukte**
Transport und Umgang mit Brennstoff und Abfallprodukten,
Entsorgung und Endlagerung des radioaktiven Mülls

(zu diesem letzten Punkt, siehe Vortrag oder Buch von Prof. Klaus Stierstadt)

→ Kontrolle der Kettenreaktion

k-Faktor (bzw damit definierte **Reaktivität**) muss nach Erreichen des kritischen Wertes ($k=1$) mittels der beweglichen Steuerstäbe (Neutronenabsorber) innerhalb sehr enger Grenzen von ± 0.0001 geregelt werden. Nur möglich dank verzögerter Neutronen, 0.7% bei U-235.

Der Bereich “**verzögert überkritisch**” $k=1.007$ darf **nicht** überschritten werden. Sonst steigen Neutronenfluss und Wärme exponentiell an. Einige Reaktortypen haben inhärente Selbstregelung. (z.B. Wassermoderierete Reaktoren).

Bei anderen führt “prompt überkritisch” zur **Kernschmelze**.

Bei gegebener Stellung der Steuerstäbe hängt Wert von **k** u.a. von Temperatur der Brennelemente, des Moderators und der Vorgeschichte des Reaktorbetriebs ab.

Tschernobyl-Katastrophe (GAU), 26.4.1986

Siehe Wikipedia für ausführliche Beschreibungen, einige Zahlen neu aus Vortrag von Prof. Schreckenbach (FRM2, ehem. techn. Direktor), 19.10.06

Leistung sollte im Rahmen eines Testexperiments auf 1 GigaWatt, 30% der Nennleistung, wurde aber infolge eines Bedienungsfehlers auf 1% heruntergefahren. Nach Vorschrift Werte unter 20% unzulässig, Alarm und automatische Abschaltmechanismen wurden manuell ausgeschaltet.

Dadurch bedingte **Xenonvergiftung** wurde ignoriert. Um auf 30% zu kommen, wurden Regelstäbe weit herausgefahren. Experimente mit Kühlung bei 7% der Nennleistung gestartet. In deren Folge kam es u.a. durch Xenonabbau zur **Leistungsexkursion**: (prompt überkritisch). Plötzlicher Anstieg auf >100 mal Zielleistung, Energie von 100 GigaJoule (GJ) wurde freigesetzt. Danach trat **Kernschmelze** ein. Die führte zur Bildung von **Wasserstoff** (Reaktion von Zirkaloy mit Kühlwasser).

Bei **Wasserstoffexplosion** wurden 1000 GJ freigesetzt, danach kam es zu **Graphitbrand** (250000kg), bei dem 30000 GJ freigesetzt wurden.

Dach des Gebäudes wurde schon durch Wasserstoffexplosion weggesprengt. Sehr viele radioaktive Stoffe gelangten dadurch in Atmosphäre.

→ **Wärmeabfuhr**

Sichere Abfuhr von **Wärme bei Betrieb** und von

Nachwärme einige Stunden **nach Abschalten** des Reaktors muss gewährleistet sein, andernfalls kann es zur **Kernschmelze** kommen.

Bei **Störfall Forsmark**, Schweden 2006 kam es nach Kurzschluss ausserhalb des KKW zu automatischer Schnellabschaltung des Reaktors, aber nur Teile der Notstromversorgung für Abfuhr der Nachwärme sprangen an. Auch Teile des Steuerungssystems waren 20 Minuten lang ausser Kontrolle.

Stufe 2 von 0-7 auf der International Nuclear Event Scala.

Reaktor bis auf weiteres abgeschaltet.

→ **Strahlenschutz**

Reaktorkern ist **intensive Quelle radioaktiver Strahlung**.

Zahlreiche radioaktive Isotope werden bei Spaltung, u Beschuss durch Neutronen und andere sekundäre Strahlung produziert.

Bei Gesundheit verhält es sich wie bei Vergleich von chemischer mit Kern-Energie:

Z.B. radioaktives Blei Pb-210 ist 20 Millionen mal so gesundheits-schädlich wie Pb-208 (chemisch).

Zahlreiche **Schutzbarrieren**:

Zirkonhüllen der Urandioxid-Tabletten,

Reaktordruckgefäß, Sicherheitsbehälter mit Dichtehaut etc.

6. Ausblick

Situation der Kernkraftwerke in Deutschland

Seit 1998 Politik des schrittweisen Ausstiegs aus der Kernenergie.

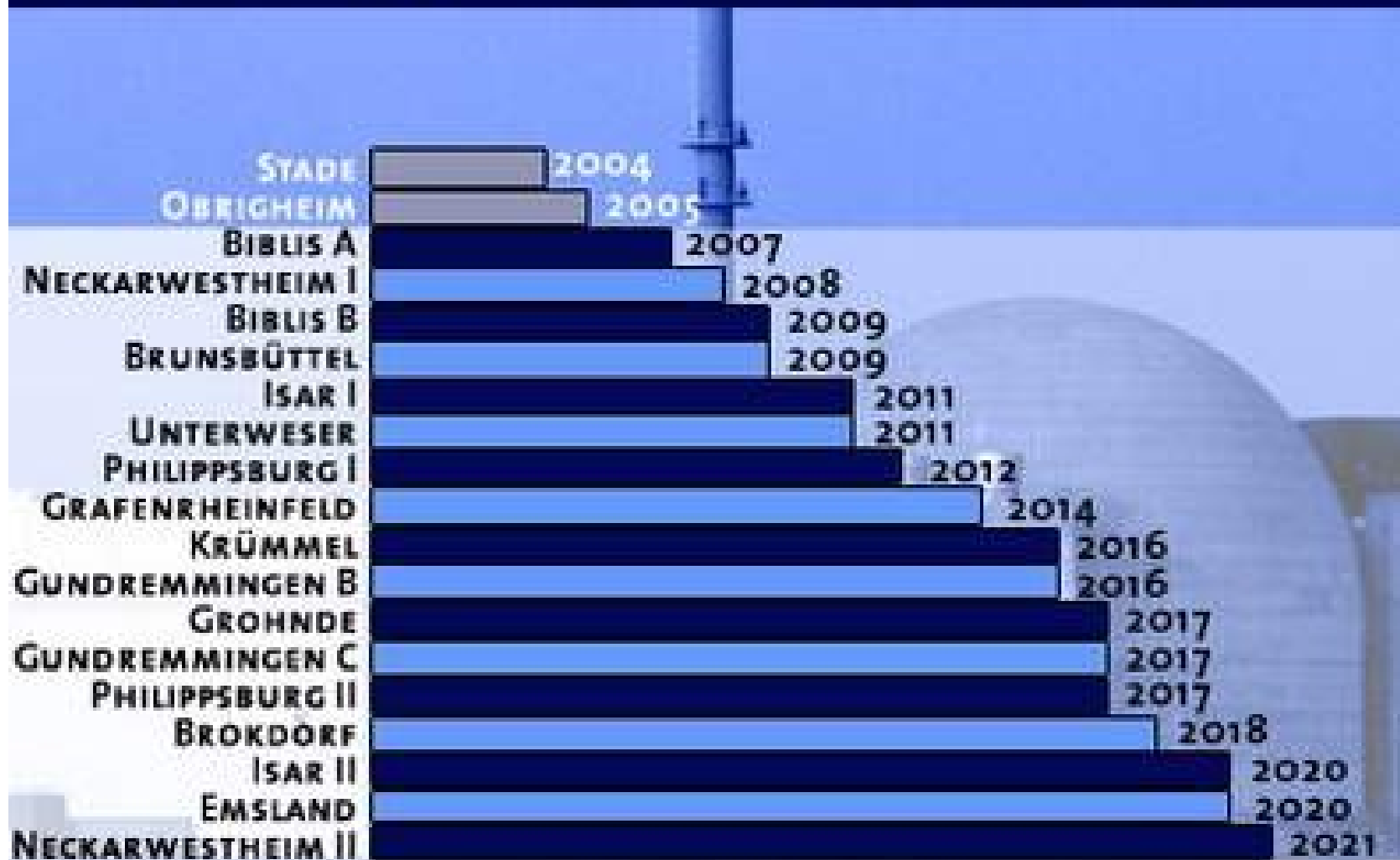
Laufzeitbegrenzung aller bestehenden Kernkraftwerke wurde im Jahr 2000 zwischen Bundesregierung und Stromwirtschaft ausgehandelt.

Reststrommengen wurden auf Basis einer theoretischen, geschätzten Gesamtlebensdauer festgelegt und entsprechende Laufzeiten vereinbart. Festgeschrieben in Novelle zu Atomgesetz 2002.

Bis 2022 werden alle bestehenden KKW abgeschaltet sein, wenn es nicht zu Änderung der jetzigen Begrenzung kommt.

Diskussion nicht abgeschlossen, insbesondere in Folge von abzusehenden Klimakatastrophen und ihrer Verknüpfung mit dem Treibhausgas-Problem (CO₂ etc.)

Restlaufzeiten der Atomkraftwerke in Deutschland



Situation der Kernkraftwerke weltweit

440 Kernkraftwerke weltweit in Betrieb, decken 17% des Bedarfs an elektrischer Energie. 40 neue KKW im Bau.

Nach katastrophalem Unfall in Tschernobyl (GAU mit Kernschmelze und vielen Todesopfern, Spätschäden und weitreichenden Umweltschäden) wurden Risiken weltweit offenkundig.

Zustand vieler Nuklearanlagen in der Welt und Mangel an internationaler Kontrolle gibt Anlass zu weiterer Sorge.

Risiken der Zwischenlagerung vielleicht unterschätzt. Problem der Endlagerung **muss und kann** gelöst werden.

Höchste Sicherheitsstandards **müssen u können** gewährleistet werden, wenn auf dem Weg zu erneuerbaren Energien noch einige Jahrzehnte Kernkraft genutzt wird.

Gegenwärtige Vorteile: technisch ausgereift, kein CO₂ - Ausstoß