

RC-09



4. Radiochemie und Kerntechnik

4.1 Reaktoren

- Kernenergieerzeugung in D

Abschaltung von Kernreaktoren

Fukushima Daiichi Reaktoren
(Spiegel.de)



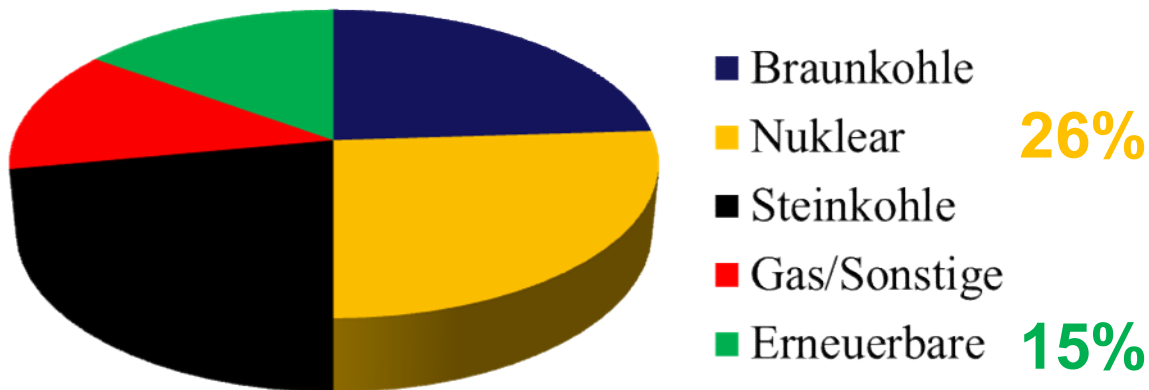
- Kein Reaktorneubau durch Energieversorger in letzten Jahrzehnten
- Konsequenz aus Reaktorkatastrophe in Fukushima:
 - Beschlüsse des Bundeskabinetts
 - * 2011 Änderung des Atomgesetzes
 - * 2012 Ausstieg aus der Kernenergie beschlossen.
- Sofortmaßnahmen:
 - * 7 ältesten Kernkraftwerke und das Kernkraftwerk Krümmel dürfen seit 6. August 2011 nicht mehr betrieben werden.
 - * Übrige Kernkraftwerke gehen, zeitlich gestaffelt, bis spätestens 2022 vom Netz

(Bundesgesetzblatt Nr. 43 vom 05.08.2011, Seite 1704)

Bruttostromerzeugung D. im Wandel

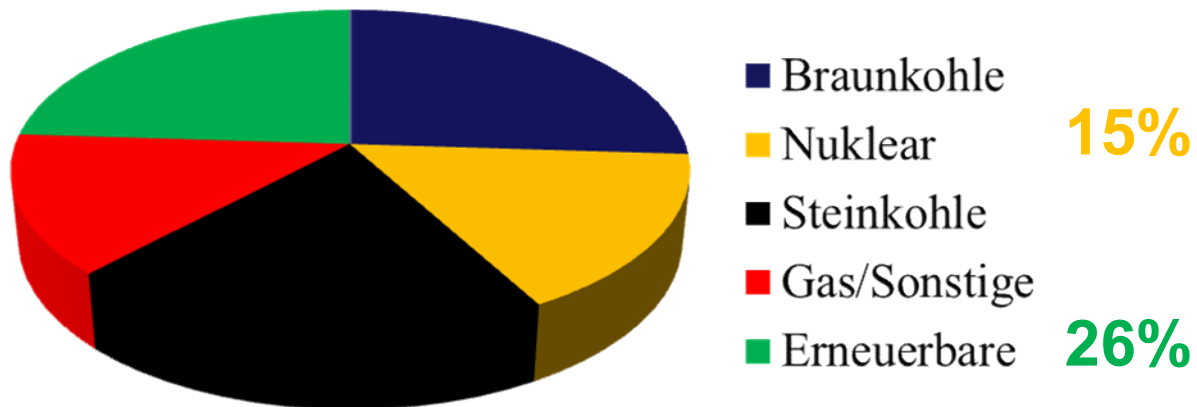
2006

637 TWh



2014

614 TWh

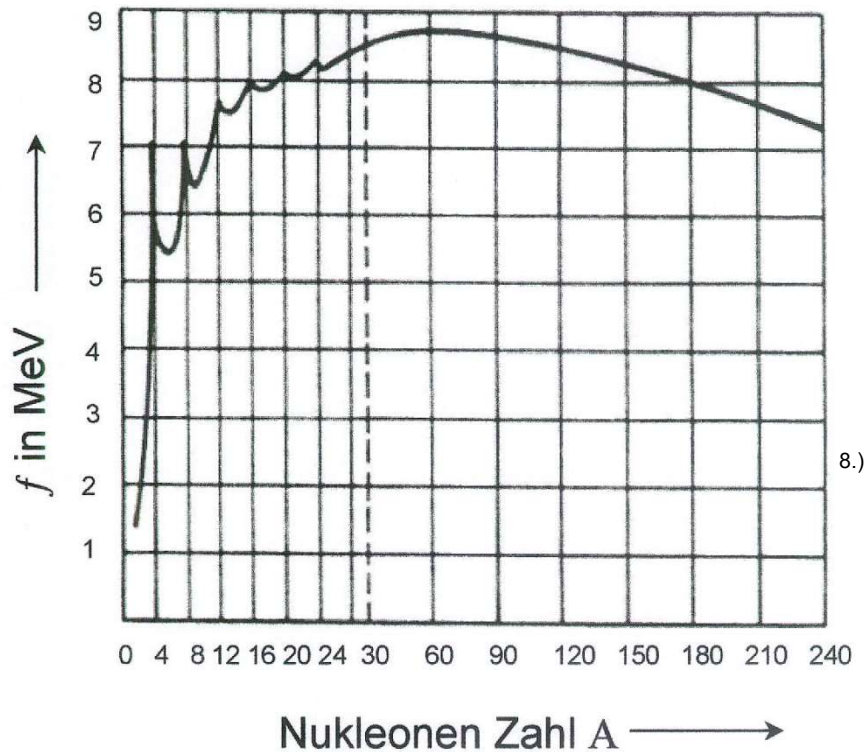


Reaktorstrategie, weltweit

- D. bleibt auch nach Abschaltung von Reaktoren umgeben,
- Reaktorsicherheitsforschung wird auch in D. weiter benötigt,
- Neubau von Reaktoren auch in Europa (Finnland, Frankreich z.B.),
- International Erarbeitung neuer Reaktorkonzepte (Generation IV),
- Weltweit: 429 KKW in Betrieb, 59 KKW geplant/im Bau (China: 26; Europa: 16).



- Grundlagen Kernspaltung (Wdh.)



Bindungsenergiekurve

Bindungsenergie f je Nukleon als Funktion der Nukleonenzahl A für stabile Atomkerne

Maßstabsänderung bei $A = 30$

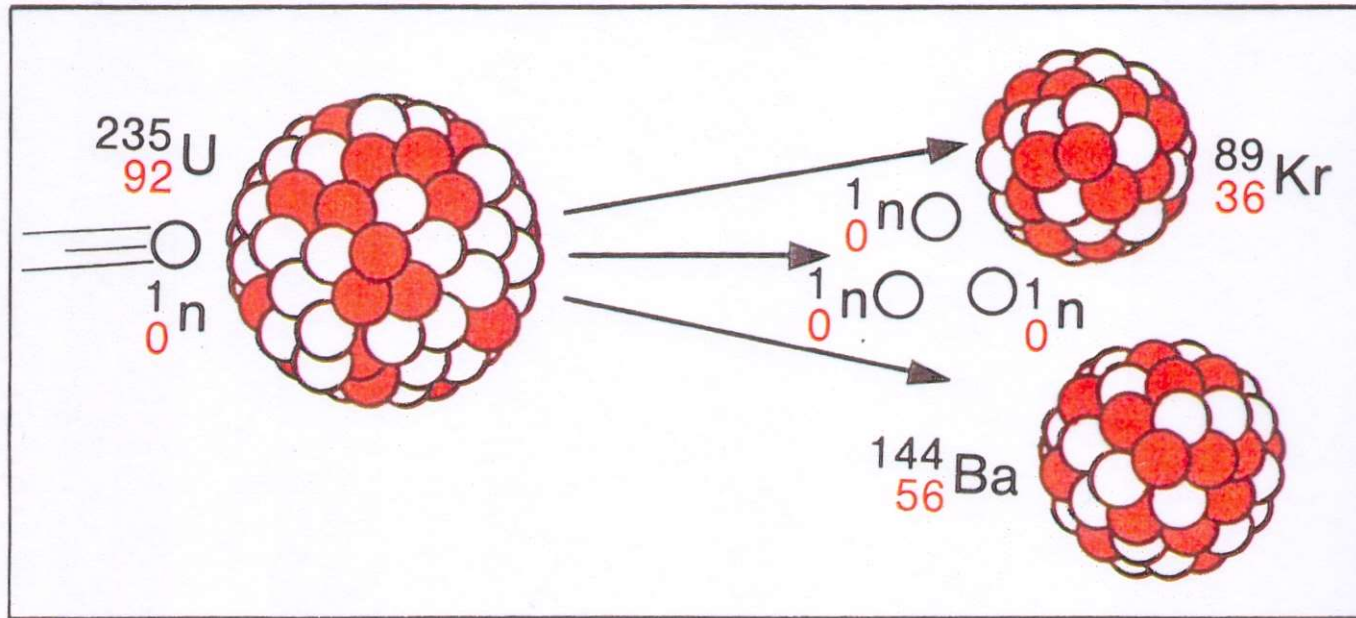
- Für alle Atomkerne mit Nukleonenzahlen zwischen 30 und 150 beträgt die mittlere Bindungsenergie je Nukleon ca. 8,5 MeV die halbempirische Bethe-Weizsäcker-Formel spiegelt gut den Kurvenverlauf wieder
- Abfall zu leichten und schweren Kernen hin lässt Schluss z, dass Kernbindungsenergie auf zwei Wegen freigesetzt werden kann, exotherme Vorgänge:

*** Verschmelzung leichter Atomkerne**

*** Spaltung schwerster Atomkerne**

Bildung Spaltprodukte

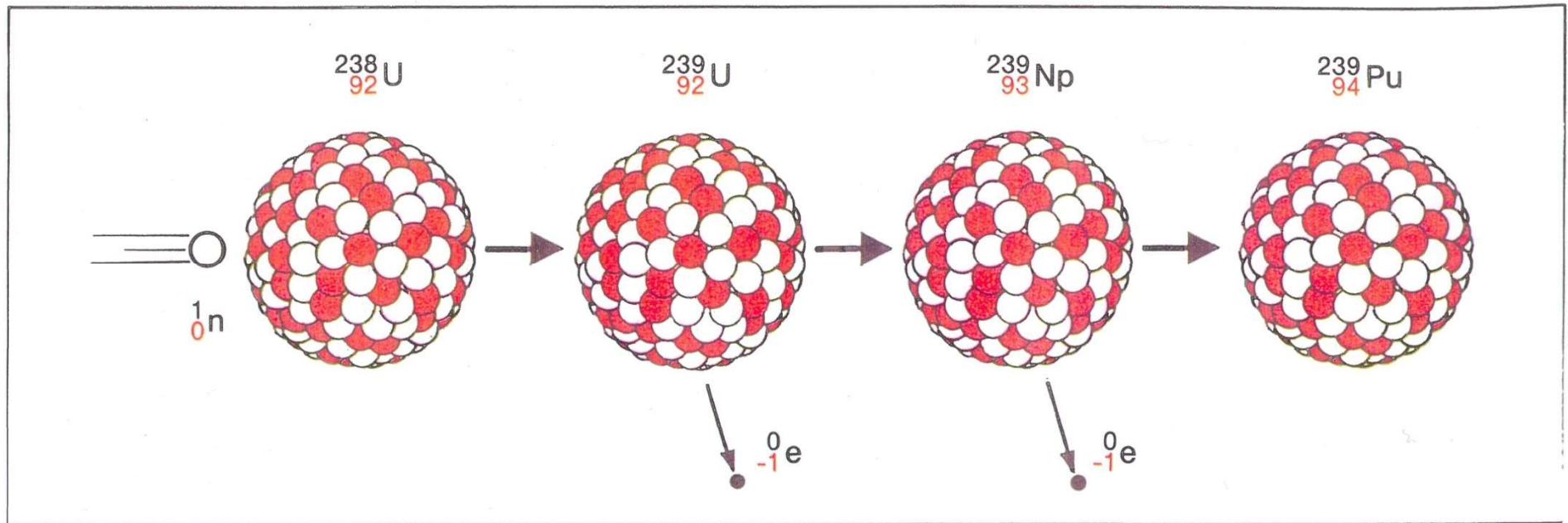
Uranisotop: $^{235}_{92}\text{U}$



10.)

Bildung Aufbauprodukte

Uranisotop: $^{238}_{92}\text{U}$



Neutroneneinfang + β^- Umwandlung

10.)

Energiegewinn bei der Kernspaltung

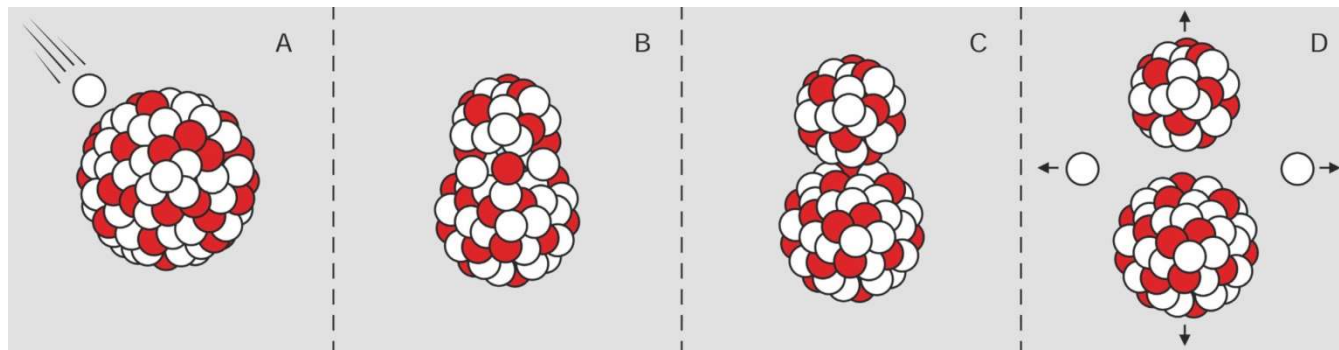
Eine mögliche Spaltungsreaktion ist:



Die Kernspaltung ist stark exotherm:

Freigesetzte Reaktionsenergie von ca. 200 MeV teilt sich wie folgt auf:

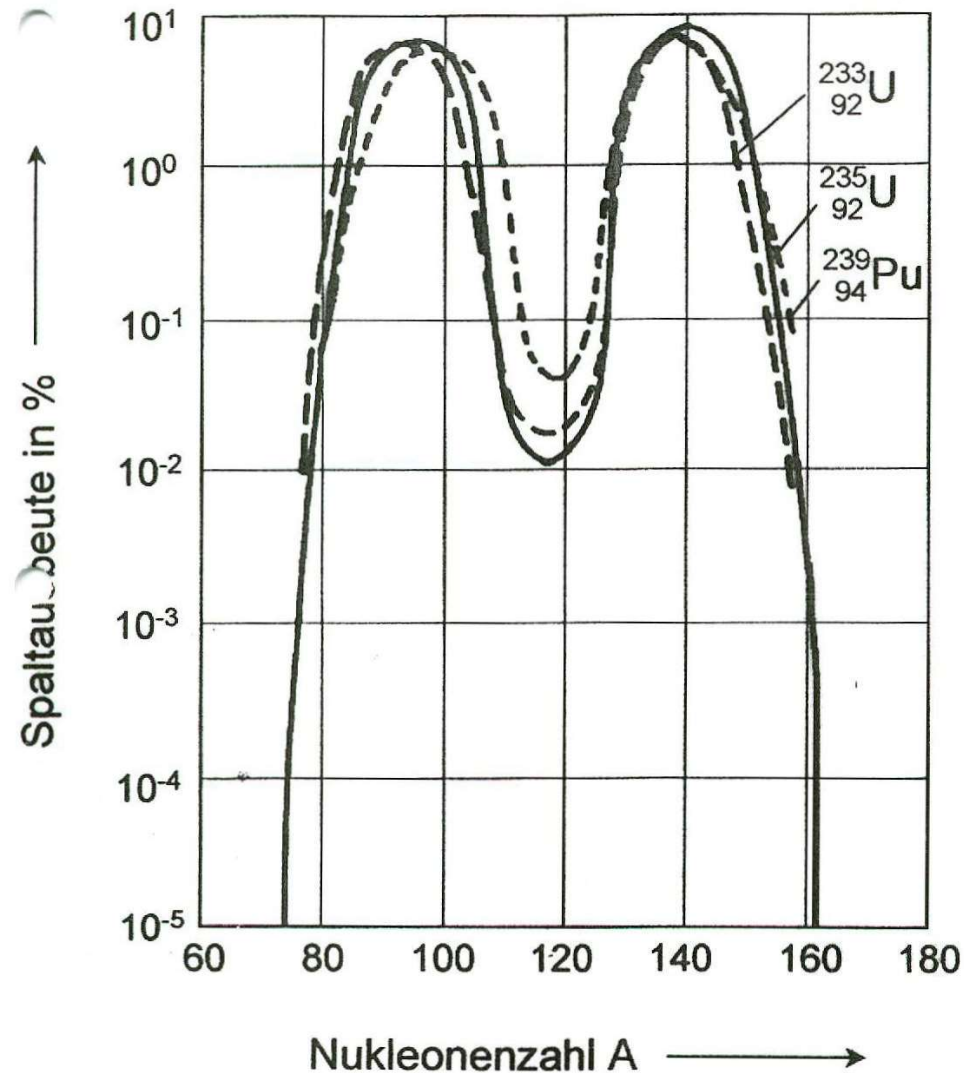
kinetische Energie der Spaltprodukte	167 MeV
kinetische Energie der Spaltneutronen	5 MeV
Energie der prompten γ -Strahlung	18 MeV
Energie der β - und γ -Strahlung der Spaltprodukte	11 MeV
Energie der Antineutrino-Strahlung der Spaltprodukte	10 MeV
Summe	201 MeV



4-Phasen-Modell

11.)

Spalttausbeute für die Spaltung von $^{233}_{92}\text{U}$, $^{235}_{92}\text{U}$ und $^{239}_{94}\text{Pu}$ mit thermischen Neutronen



5.)

Kritische Masse U-235, Pu-239

kleinste kritische Masse in Kugelform,
wässrige Lösung bei optimaler Moderation

kleinste kritische Masse in Kugelform für Metall
(schnelle unmoderierte Systeme)

unreflektiert

Wasser-reflektiert

unreflektiert

Stahl-reflektiert

U-235

1,42 kg

0,748 kg

46,7 kg

16,8 kg

Pu-239

0,877 kg

0,494 kg

10,0 kg

4,7 kg

*Bezeichnet die kleinste Spaltstoffmasse, die unter festgelegten Bedingungen
(Art des Spaltstoffs, Geometrie, moderiertes/unmoderiertes System etc.)
eine sich selbsterhaltende Kettenreaktion in Gang setzt.*

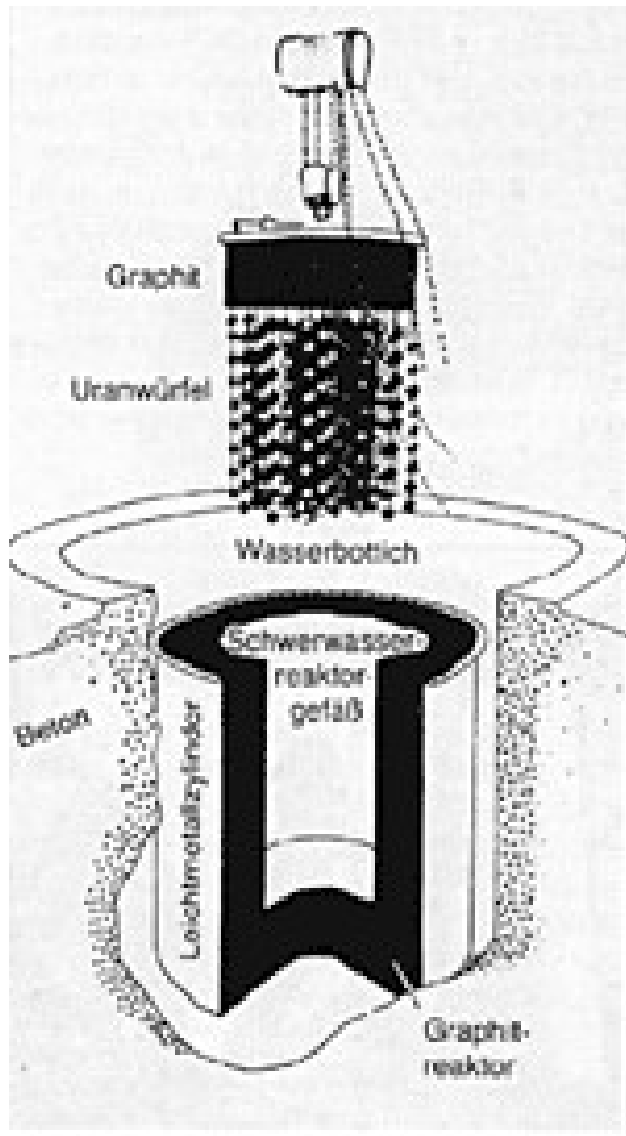
Kritische Bedingungen (Beispiele)

Kritische Masse

Isotop	unreflektiert	reflektiert (20cm H ₂ O)	reflektiert (30cm Stahl)	Link
Thorium -229	2839 kg	2262 kg	994 kg	
Protactinium-31	580–930 kg ?	?	?	
Uran-233	16,5 kg	7,3 kg	6,1 kg	[1]
Uran-236	145 kg	134 kg	83 kg	
Uran-235	49,0 kg	22,8 kg	17,2 kg	[2]
Neptunium-235	66,2 kg	60 kg	38,8 kg	
Neptunium-236	6,79 kg	3,21 kg	3,3 kg	
Neptunium-237	63,6-68,6 kg	57,5-64,6 kg	38,6 kg	[3]
Plutonium- 36	ca. 8,04-8,42 kg	5,0 kg	3,74-4,01 kg	
Plutonium-237	ca. 3,1 kg	1,71 kg	1,62 kg	
Plutonium-238	ca. 9,04 -10,31 kg	7,35 kg	4,7 kg	[4]
Plutonium-239	10,0 kg	5,42 - 5,45 kg	4,49 kg	[5]
Plutonium-240	35,7-39,03 kg	32,1-34,95 kg	18,3-22,6 kg	
Plutonium-241	12,27 - 13,04 kg	5,87-6,68 kg	5,05-5,49 kg	
Plutonium-242	85,6 kg	78,2 kg	36,2-48,1 kg	
Americium- 241	57,6-75,6kg	52,5-67,6 kg	33,8-44,0 kg	
Americium-242m	9–18 kg	3,2-6,4 kg	3-4,6 kg	[6]
Americium-243	50-209 kg	195 kg	88-138 kg	[7]

- Technik des Kernreaktors

Historie: Atomkeller-Museum Haigerloch



Ziel:

- Kritikalität mit der Anordnung erreichen

*Eine Versuchsanordnung im Atomkeller Haigerloch
(März/April 1945)*

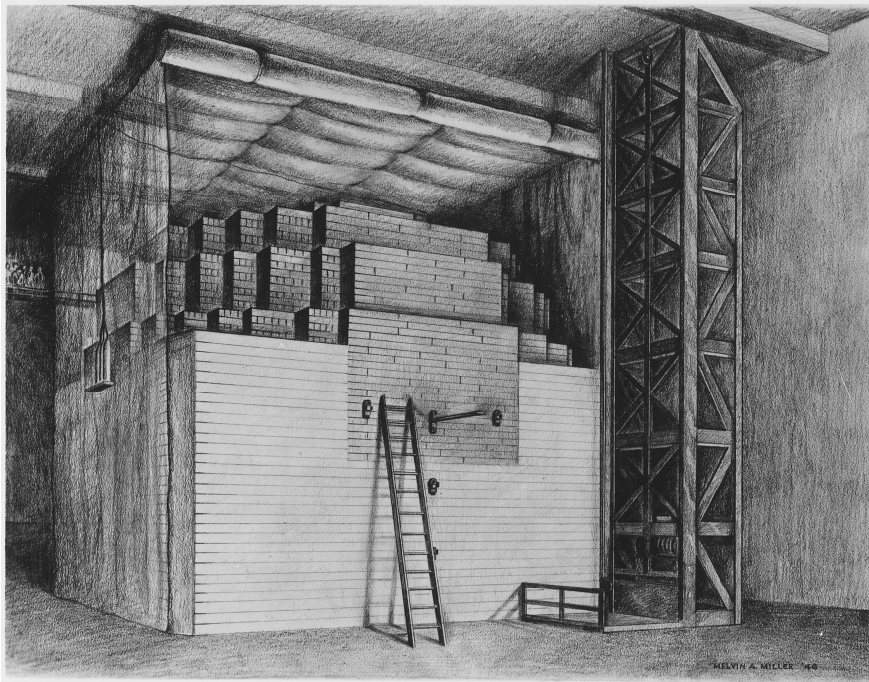
*664 Uran-Würfel (Kantenlänge 5 cm, Abstand
der Würfel 14 cm, an Ketten befestigt
Gesamt 1,5 t Uran, 2 t Schweres Wasser*

Ergebnis:

- Neutronenvermehrungsfaktor ca. 7 erhalten
- Keine Kritikalität der Anordnung erreicht

Historie: Zeichnung des Chicago Pile 1

(eine Fotografie existiert nicht)



de.wikipedia.org

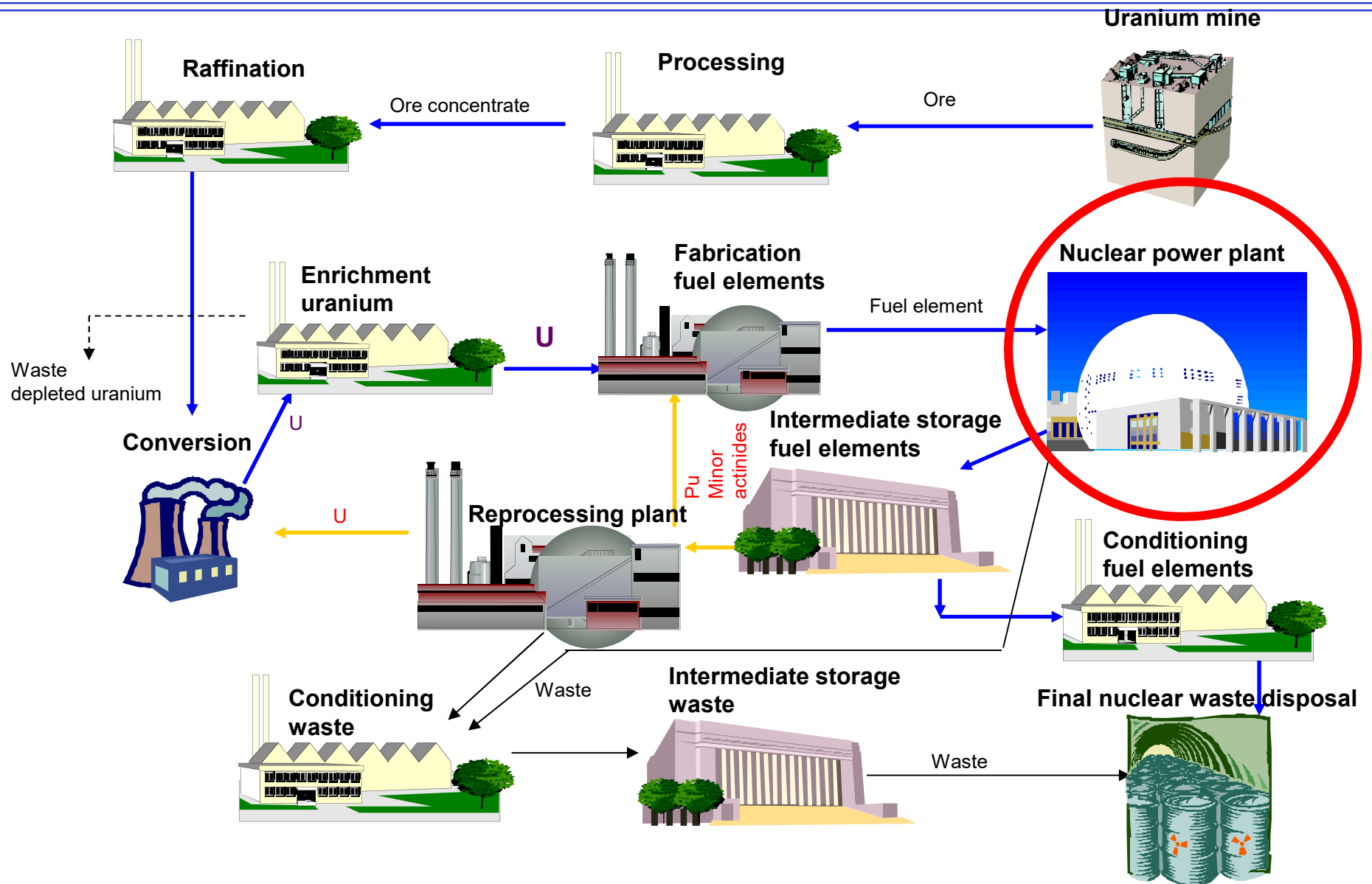
- Versuchsanordnung:
6 t Uranmetall + 50 t Uranoxid + 400 t Graphit

Ziel:

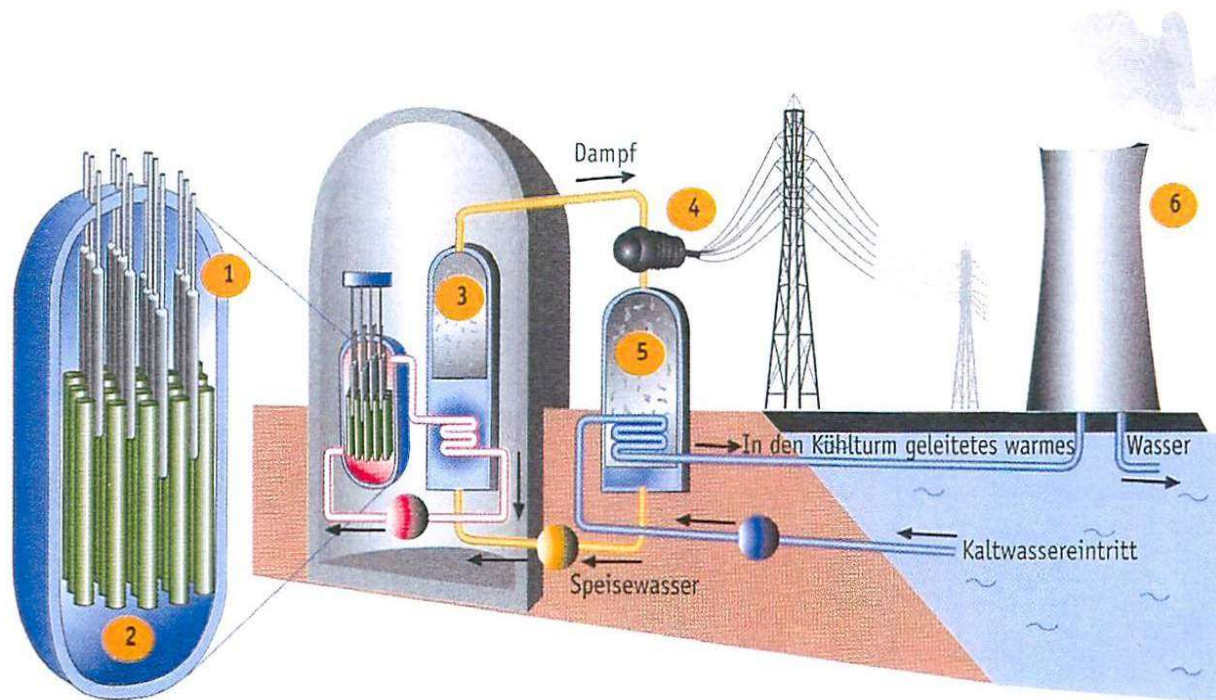
- selbsterhaltende Spaltungs-Kettenreaktion

Erste technische Kernreaktion...Kernreaktor

Reaktor im Kernbrennstoffzyklus



Basiskomponenten eines Kernkraftwerks mit Druckwasserreaktor



Quelle: New Scientist.

- 1: Reaktordruckbehälter
- 2: Brennelementcore
- 3: Wärmetauscher (primärer Kreislauf)
- 4: Turbine, Generator
- 5: Kühlkreislauf (sekundärer Kreislauf)
- 6: Kühlturm

Quelle: Kernenergie heute, AEN NEA, 2006

Reaktorbetrieb

Steuerung der Kernreaktion:

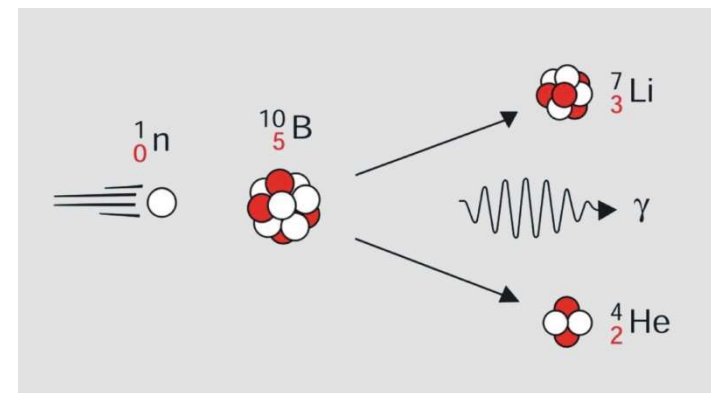
- Neutronenanzahl

Moderator:

schnelle Neutronen auf thermische Energie
abzubremsen (Graphit, schweres, normales Wasser)

Steuerstab/Regelstab:

Bor, Cadmium...Neutroneneinfang



Neutroneneinfang mittels Bor
(Kernreaktion)

Quelle:  Informationskreis
KernEnergie

Kernreaktoren

- **Leistungsreaktoren zur Energieerzeugung**
- **Forschungsreaktoren für kernphysikalische, Materialwissenschaftliche Untersuchungen, zur Erzeugung radioaktiver Isotope und für Unterrichtszwecke**

Grundtypen:

- **Leichtwasserreaktoren (LWR)**

Kühlmittel und Moderator ist normales Wasser

*Druckwasserreaktor

*Siedewasserreaktor

- **Schneller Brüter**

Core aus zwei Zonen	innere Zone:	80% $\text{UO}_{2\text{nat.}}$ / 20% PuO_2
	äußere Zone:	abgereichertes $\text{UO}_2 \Rightarrow \text{Pu-239}$

- **Hochtemperaturreaktor**

kugelförmigen Brennelemente bestehen aus 192 g Kohlenstoff, 0,8928 g Uran 235, 0,0672 g Uran-233 und 10,2 g Thorium 232 (Thorium-232 \Rightarrow Uran-233)
Graphit Moderator, Kühlmittel He-Gas, Temperaturen 300 bis 950 °C

Technische Daten KKW

Druckwasserreaktor KKW Stade

Siedewasserreaktor KKW Brunsbüttel

Kernbrennstoff	Urandioxid (UO_2)	Urandioxid (UO_2)
Kernbrennstoffmenge	63,5 t	98 t
Anreicherung an Uran-235	3,2 %	2,66 %
Zahl der Brennelemente	157	532
Zahl der Brennstäbe je Element	205	63
Brennstablänge	ca. 3,3 m	ca. 4 m
Brennstabdurchmesser	ca. 1 cm	1,25 cm
Zahl der Regelstäbe	49	129
Absorbermaterial	Ag in Cd	Borcarbid (B_4C)
Kühlmittel und Moderator	H_2O (voll entsalzt)	H_2O (voll entsalzt)

Brennstab/Brennelement (BE)

Daten (Druckwasserreaktor):

193 Brennelemente

ca. 225 Brennstäbe/BE, \varnothing 1,0 cm, Länge 3,3 m

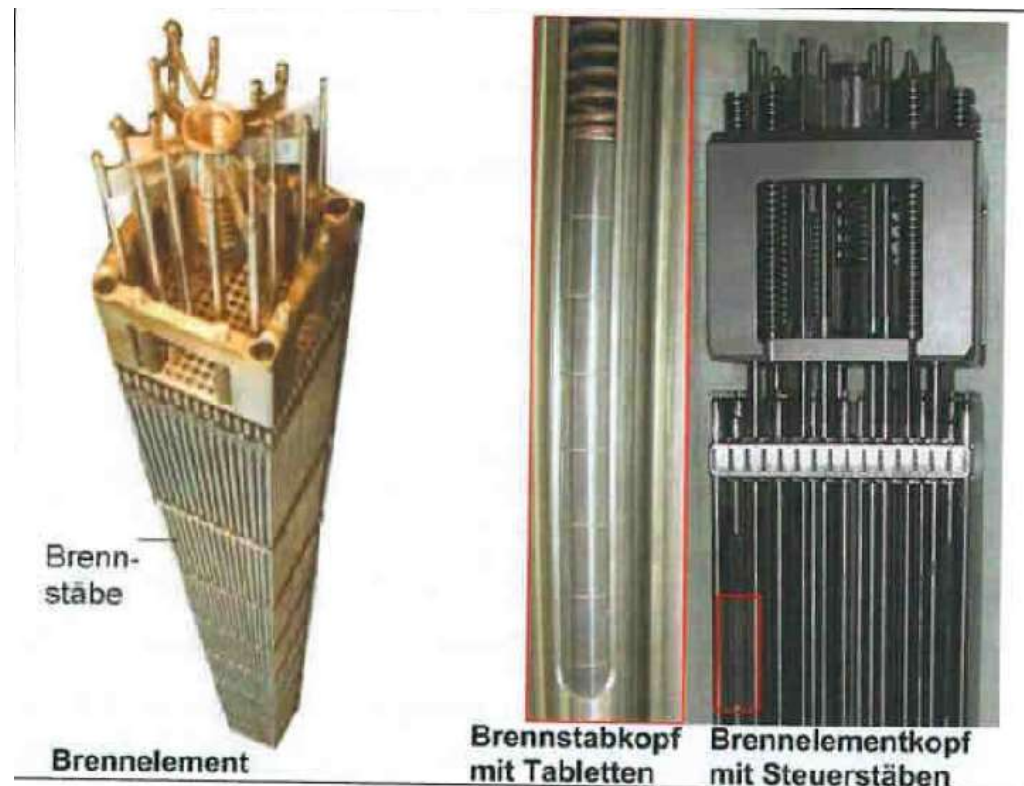
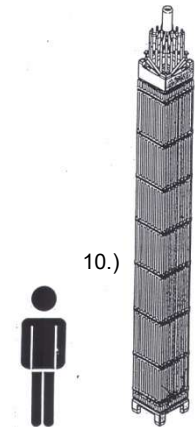
ca. 100 t Urandioxid Beladung

pro Jahr Entladung 1/3 der BE:

ca. 32,7 t Urandioxid

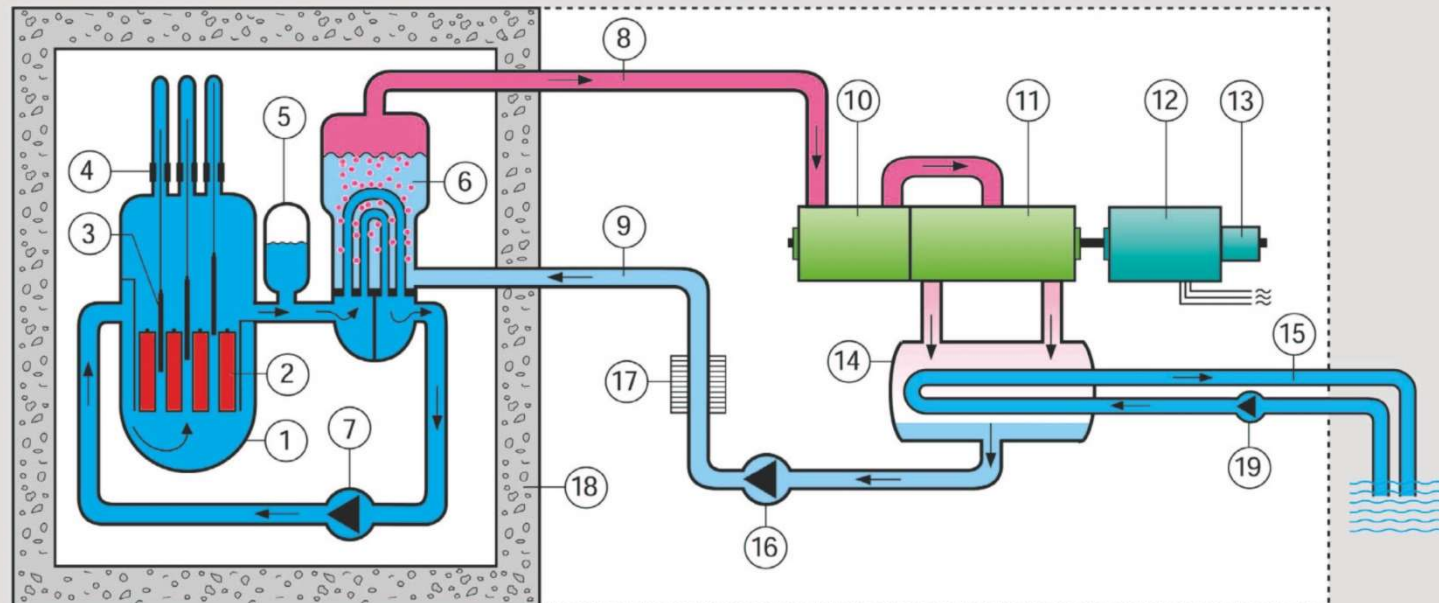
ca. 1,2 t Spaltprodukte

ca. 0,3 t Plutonium



Verschiedene Reaktortypen mit unterschiedlichen technologischen Prinzipien sind im praktischen Einsatz.

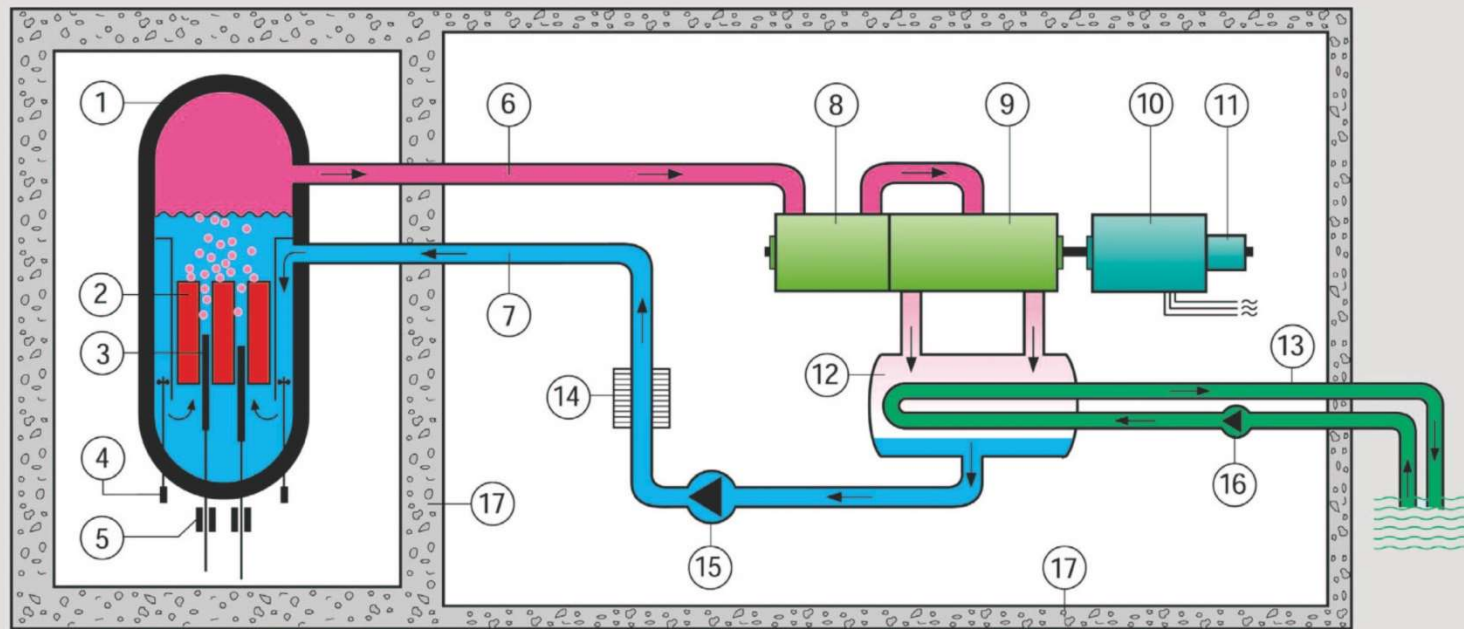
Prinzip - Druckwasserreaktor



11.)

- | | | | |
|------------------------|------------------------------|--------------------------------|----------------------|
| 1 Reaktordruckbehälter | 6 Dampferzeuger | 11 Niederdruckteil der Turbine | 15 Flusswasser |
| 2 Uranbrennelemente | 7 Kühlmittelpumpe | 12 Generator | 16 Speisewasserpumpe |
| 3 Steuerstäbe | 8 Frischdampf | 13 Erregermaschine | 17 Vorwärmanlage |
| 4 Steuerstabantriebe | 9 Speisewasser | 14 Kondensator | 18 Betonabschirmung |
| 5 Druckhalter | 10 Hochdruckteil der Turbine | 19 Kühlwasserpumpe | |

Prinzip – Siedewasserreaktor



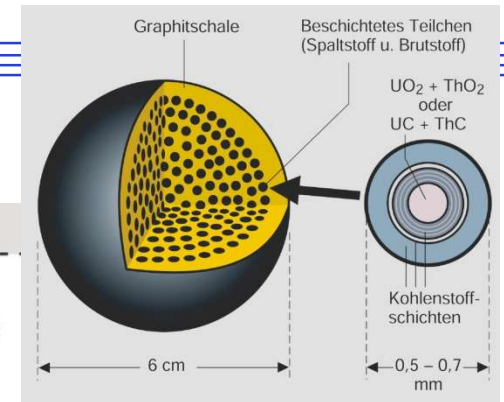
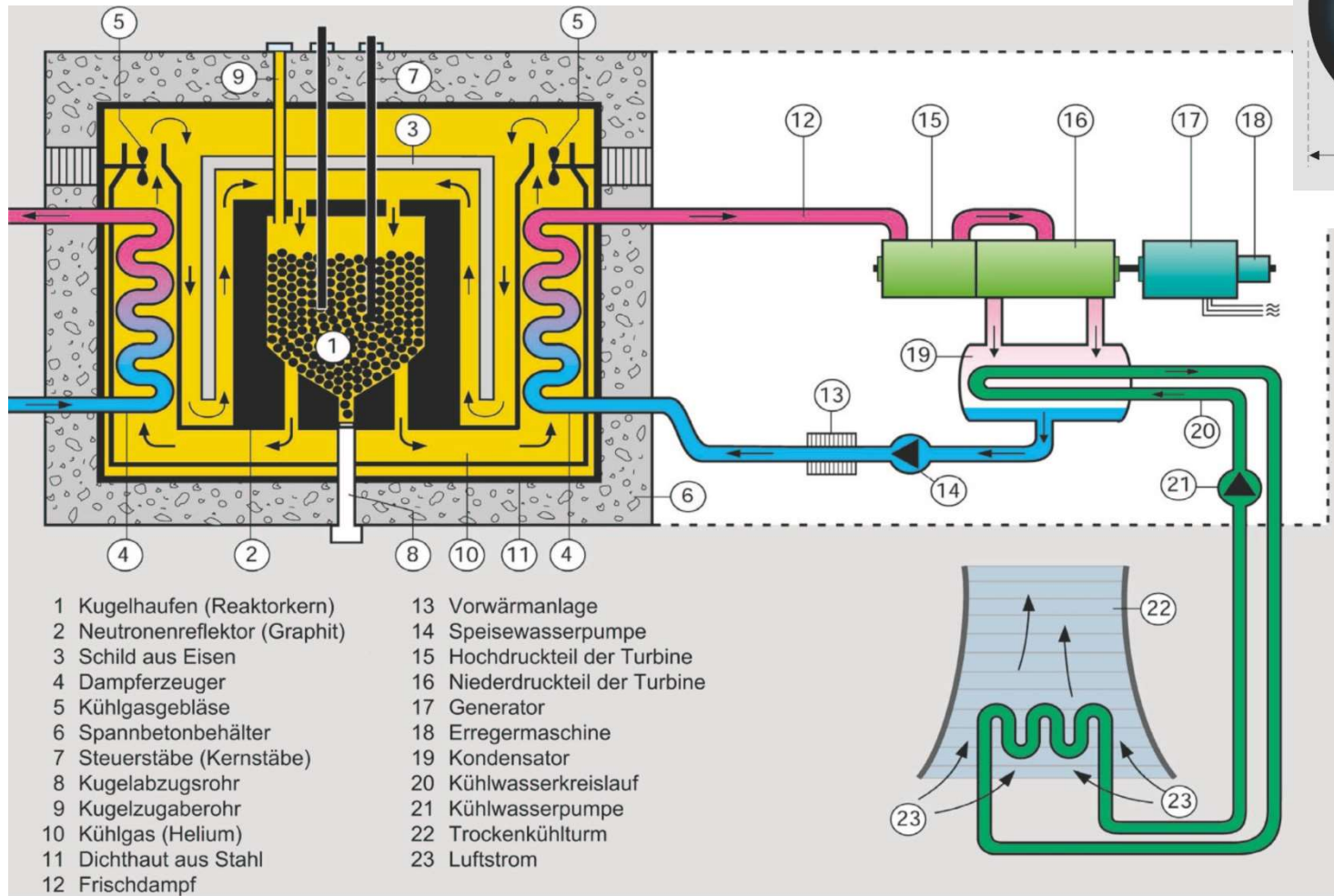
11.)

1 Reaktordruckbehälter
2 Brennelemente
3 Steuerstäbe
4 Umwälzpumpen
5 Steuerstabantriebe

6 Frischdampf
7 Speisewasser
8 Hochdruckteil der Turbine
9 Niederdruckteil der Turbine
10 Generator
11 Erregermaschine
12 Kondensator
13 Flusswasser
14 Vorwärmanlage
15 Speisewasserpumpe
16 Kühlwasserpumpe
17 Betonabschirmung

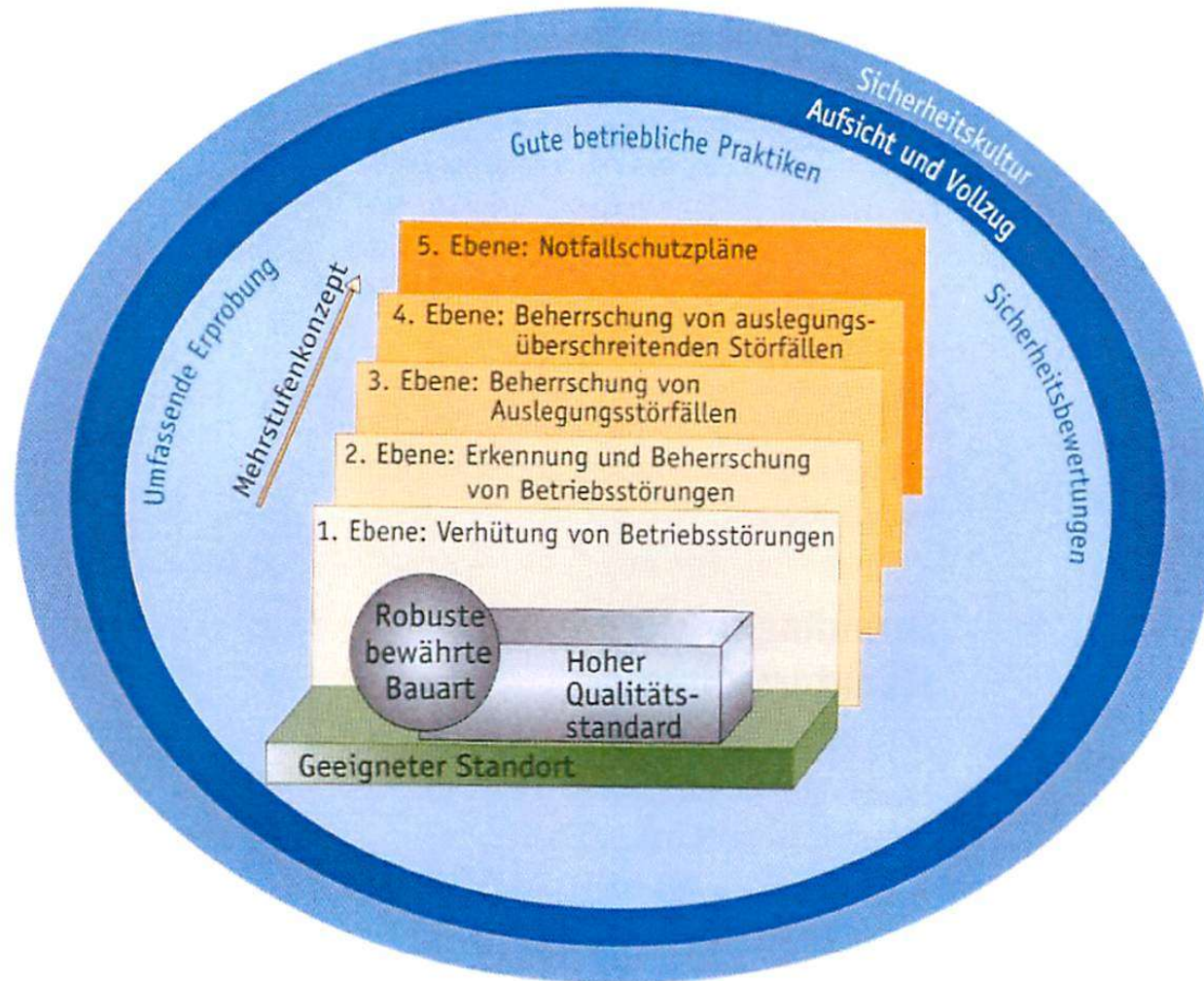
Quelle:

Prinzip - Thorium-Hochtemperatur - Reaktor



11.)

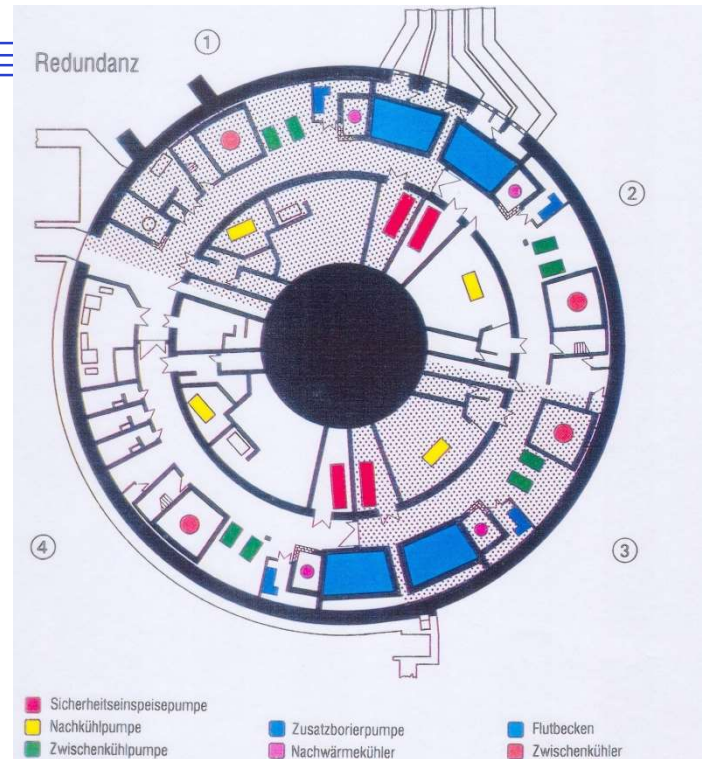
Elemente der Reaktorsicherheit



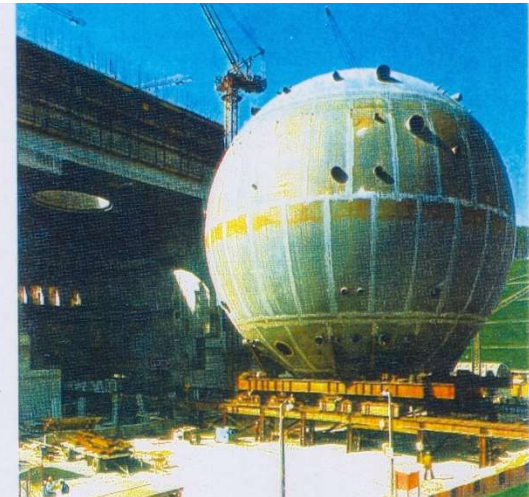
Quelle: Kernenergie heute, AEN NEA, 2006

Sicherheitskonzept (Redundanzen)

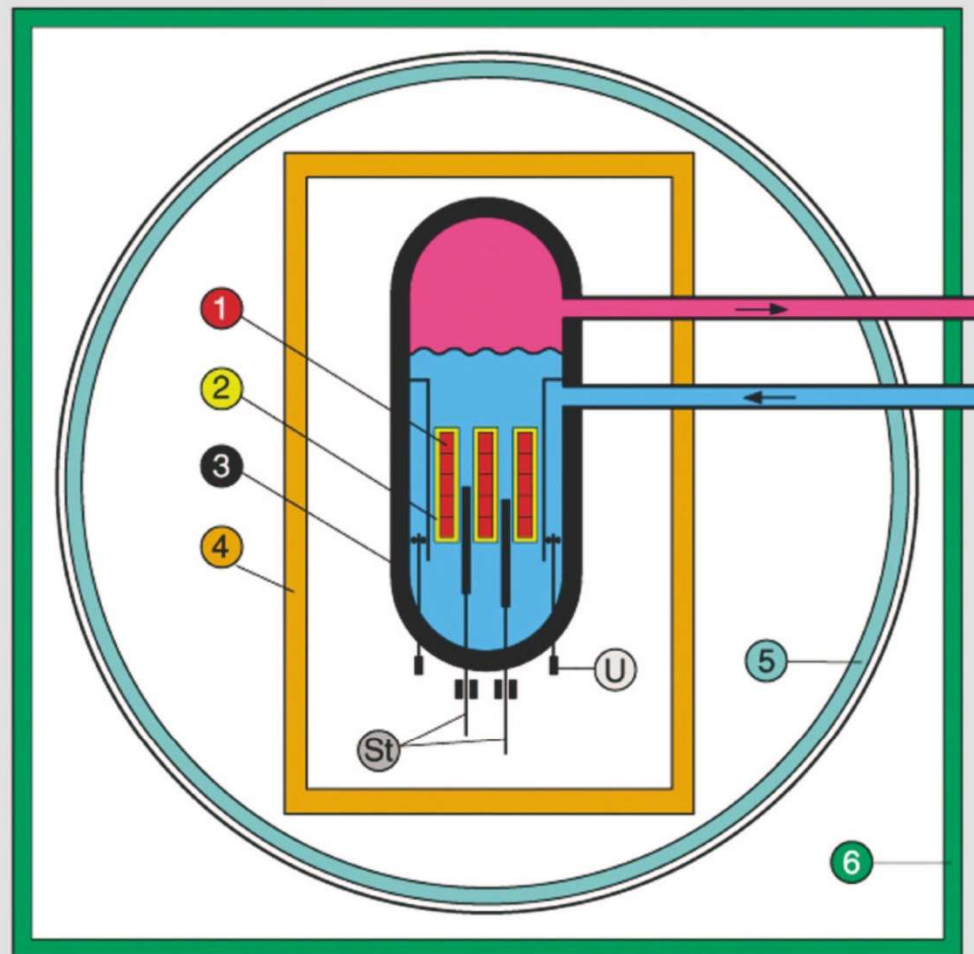
- Sicherer Einschluss (Barrierekonzept)
- Redundanzen
- Hoher technischer Standard
- Kontrollen



10.)

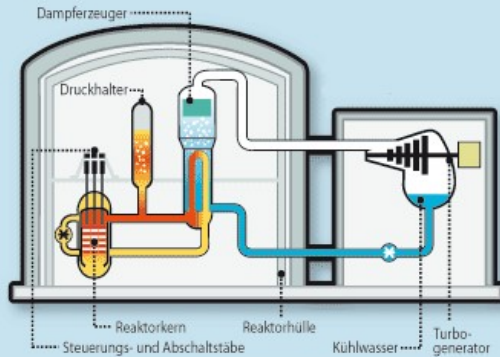


Sicherheitsbarrieren gegen das Austreten radioaktiver Stoffe



- 1 Brennstoff-Kristallgitter
- 2 Brennstabhülle
- 3 Reaktordruckbehälter
- 4 Biologisches Schild
- 5 Sicherheitsbehälter
- 6 Reaktorgebäude
- St Steuerstab
- U Umwälzpumpen

European Pressurized Reactor



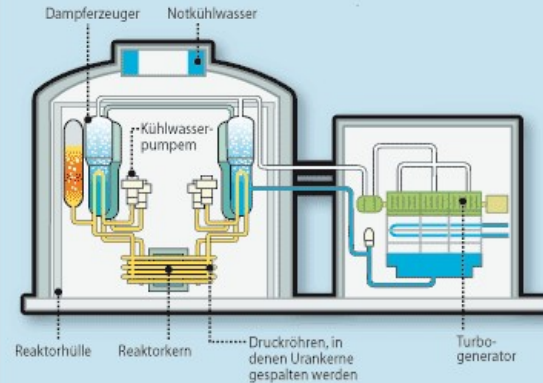
Vorteile: Kernschmelze führt nicht zur Katastrophe; Radioaktivität bleibt auf das Reaktorgebäude beschränkt.

Nachteile: Keine Betriebserfahrung, weil Neuentwicklung.

Reaktortyp: Druckwasser
Leistung*: 1600
Entwickler: Areva (Frankreich/Deutschland)

* = Leistung in Megawatt

Candu



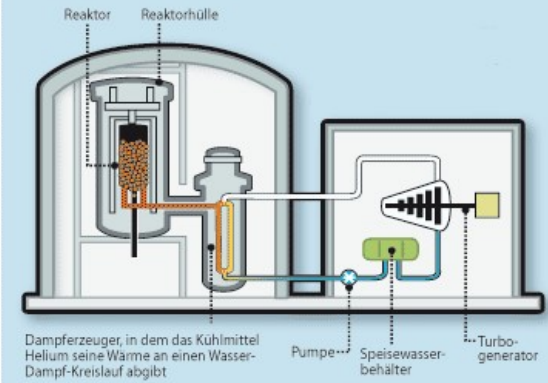
Vorteile: Seit Jahren erprobt; benötigt kein angereichertes Uran.

Nachteile: Benötigt teures, schweres Wasser.

Reaktortyp: Druckwasser
Leistung*: 1000
Entwickler: Atomic Energy of Canada Ltd. (Kanada)

* = Leistung in Megawatt

Kugelhafenreaktor



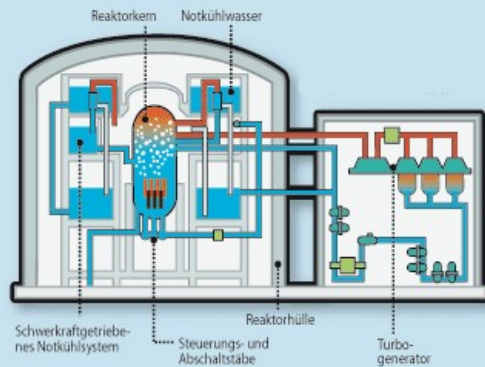
Vorteile: Der Brennstoff steckt in Grafitkugeln, die höhere Temperaturen aushalten als ein solcher Reaktor je erreichen kann - Kernschmelze ausgeschlossen; Brennstoff Thorium kommt fünfmal häufiger vor als Uran.

Nachteile: Mit 200 bis 600 MW erheblich geringere Leistung als bei anderen Reaktortypen.

Leistung*: 200 bis 600

* = Leistung in Megawatt

Advanced Boiling Water Reactor



Vorteile: Kernschmelze führt nicht zur Katastrophe.

Nachteile: Keine Betriebserfahrung, weil Neuentwicklung. Reaktor existiert nur auf dem Papier; Dampf strömt aus dem Reaktor direkt in die Turbine, die daher radioaktiven Belastungen ausgesetzt ist.

Reaktortyp: Siedewasser
Leistung*: 1350 bis 1600
Entwickler: Hitachi / General Electric (Japan / USA)

* = Leistung in Megawatt

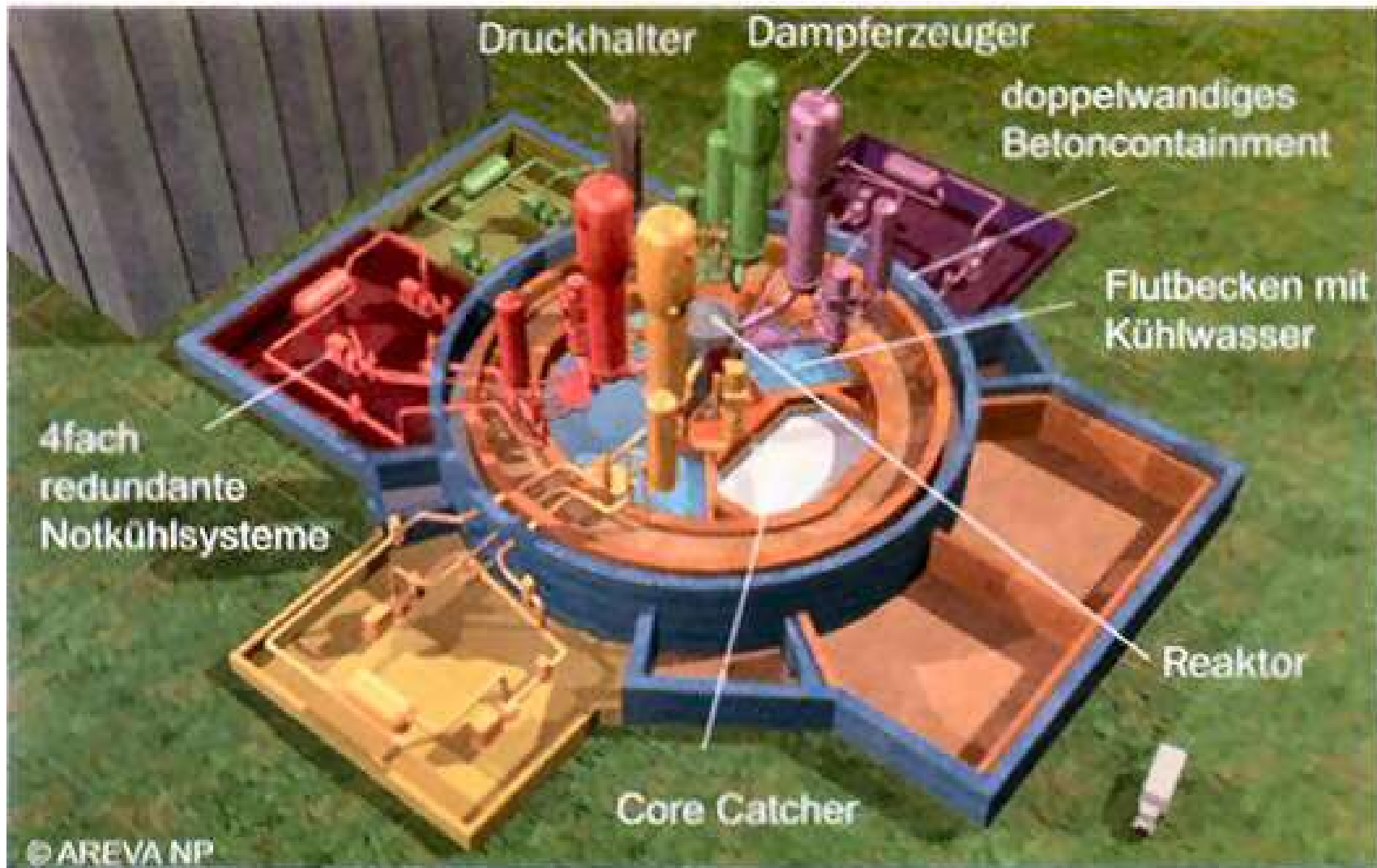
Kernkraftwerke mit verbesserter Sicherheit

Bezeichnung	Reaktortyp	Leistung ¹	Entwickler (Land)
Advanced Boiling Water Reactor	Siedewasser	1350 bis 1600	Hitachi/General Electric (Japan/USA)
Advanced Passive 1000	Druckwasser	1200	Westinghouse (USA)
Advanced Pressurized Water Reactor	Druckwasser	1500 bis 1700	Mitsubishi Heavy Industries (Japan)
Candu	Druckwasser ²	1000	Atomic Energy of Canada Ltd. (Kanada)
Economic Simplified Boiling Water Reactor	Siedewasser	1550	General Electric (USA)
European Pressurized Reactor (EPR)	Druckwasser	1600	Areva (Frankreich/Deutschland)
Pebble Bed Modular Reactor	Kugelhafen ³	250	Eskom/chin. Industrie (Südafrika/China)
SWR1000	Siedewasser	1250	Areva (Frankreich/Deutschland)
WWER-1000	Druckwasser	1200	AtomStroyExport (Russland)

¹ in Megawatt; ² Kühlung mit schwerem Wasser, Einsatz von Natururan; ³ heliumgekühlt

Aktuelle technische Reaktorkonzepte (EPR= European Pressurized Reactor) erhöhen weiter die Sicherheitsstandards, z.B. core catcher, Erhöhung Notkühlredundanz, Flutbecken ...

Wesentliche Komponenten des EPR



Meldepflicht und Bewertung von Störungen bei Reaktorbetrieb

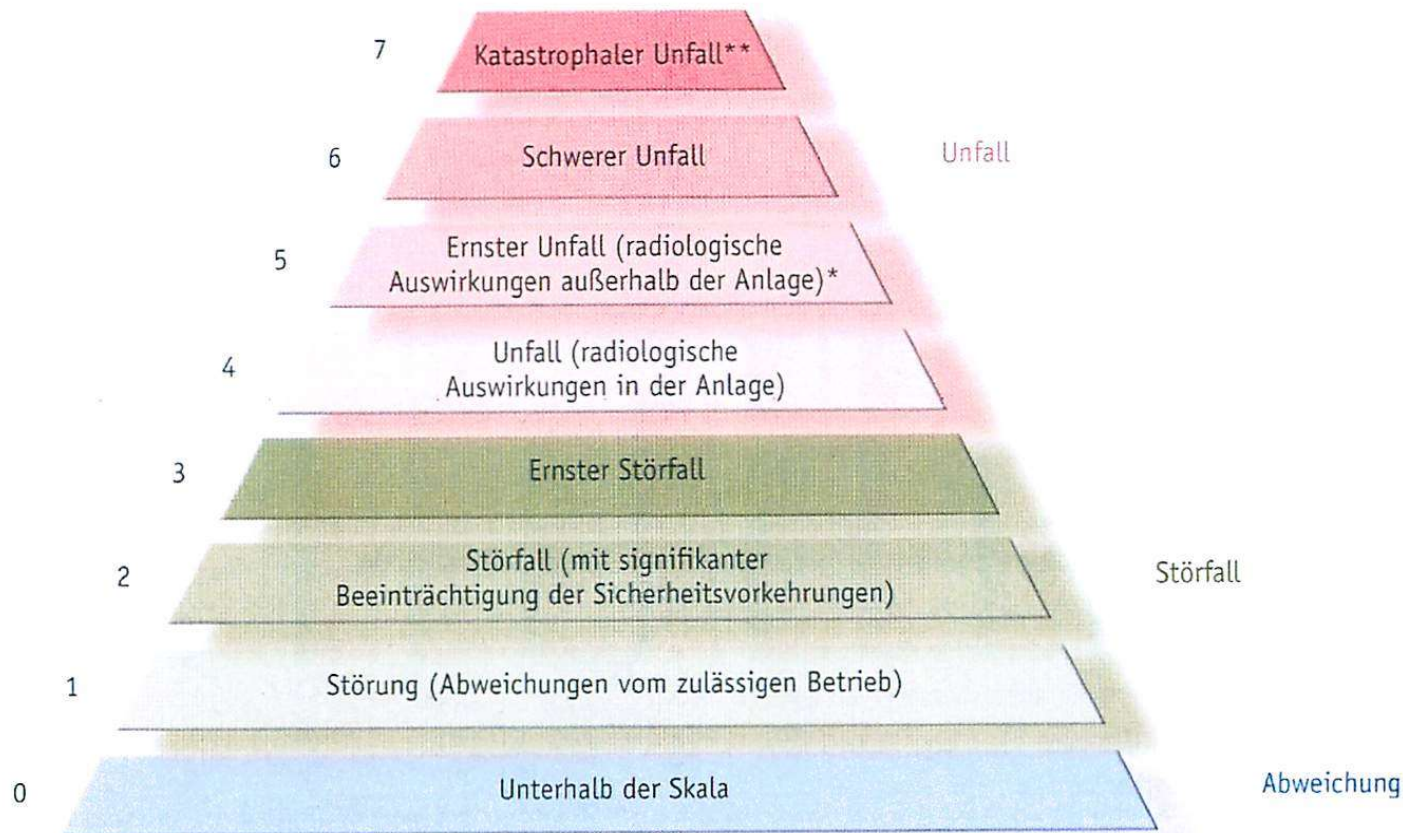
- Stufung der Störungen

Stufe Kurzbezeichnung	Aspekte		
	Erster Aspekt Radiologische Auswirkungen außerhalb der Anlage	Zweiter Aspekt Radiologische Auswirkungen innerhalb der Anlage	Dritter Aspekt Beeinträchtigung der Sicherheitsvorkehrungen
7 Katastrophaler Unfall	Schwerste Freisetzung: Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt in einem weiten Umfeld		
6 Schwerer Unfall	Erhebliche Freisetzung: Voller Einsatz der Katastrophenschutzmaßnahmen		
5 Ernster Unfall	Begrenzte Freisetzung: Einsatz einzelner Katastrophenschutzmaßnahmen	Schwere Schäden am Reaktorkern bzw. an den radiologischen Barrieren	
4 Unfall	Geringe Freisetzung: Strahlenexposition der Bevölkerung etwa in der Höhe der natürlichen Strahlenexposition	Begrenzte Schäden am Reaktorkern bzw. an den radiologischen Barrieren Strahlenexposition beim Personal mit Todesfolge	
3 Ernster Störfall	Sehr geringe Freisetzung: Strahlenexposition der Bevölkerung in Höhe eines Bruchteils der natürlichen Strahlenexposition	Schwere Kontaminationen Akute Gesundheitsschäden beim Personal	Beinahe Unfall Weitgehender Ausfall der gestaffelten Sicherheitsvorkehrungen
2 Störfall		Erhebliche Kontamination Unzulässig hohe Strahlenexposition beim Personal	Störfall Begrenzter Ausfall der gestaffelten Sicherheitsvorkehrungen
1 Störung			Abweichung von den zulässigen Bereichen für den sicheren Betrieb der Anlage
0 Unterhalb der Skala			Keine oder sehr geringe sicherheitstechnische Bedeutung

Die im Schema verwendeten Kriterien sind als allgemeine Umschreibungen zu verstehen.

Meldepflicht und Bewertung von Störungen bei Reaktorbetrieb

- Die internationale INES-Skala zur Bewertung nuklearer Ereignisse



* Three Mile Island, USA, 1979

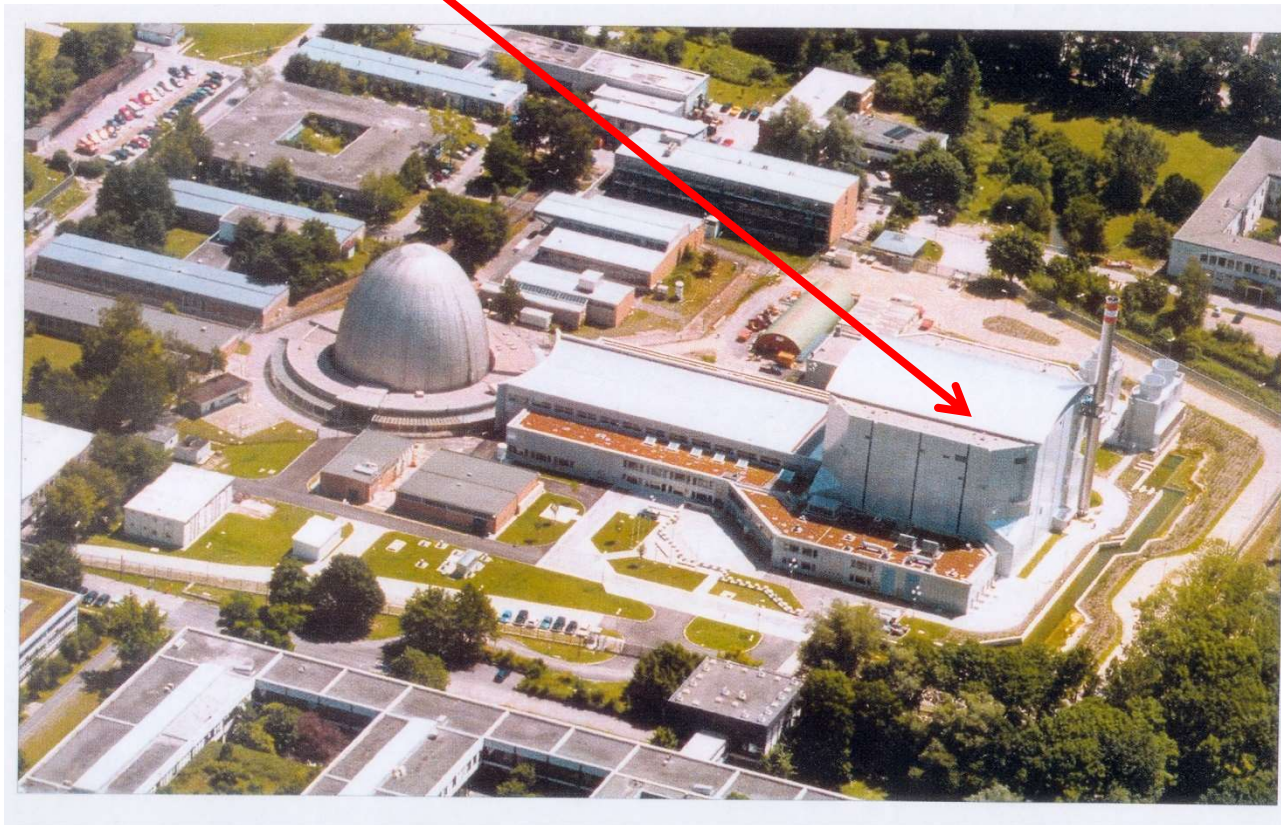
** Tschernobyl, Ukraine, 1986

Quelle: Kernenergie heute, AEN NEA, 2006

FRM-II Reaktor, München-Garching

„Forschungsneutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz“

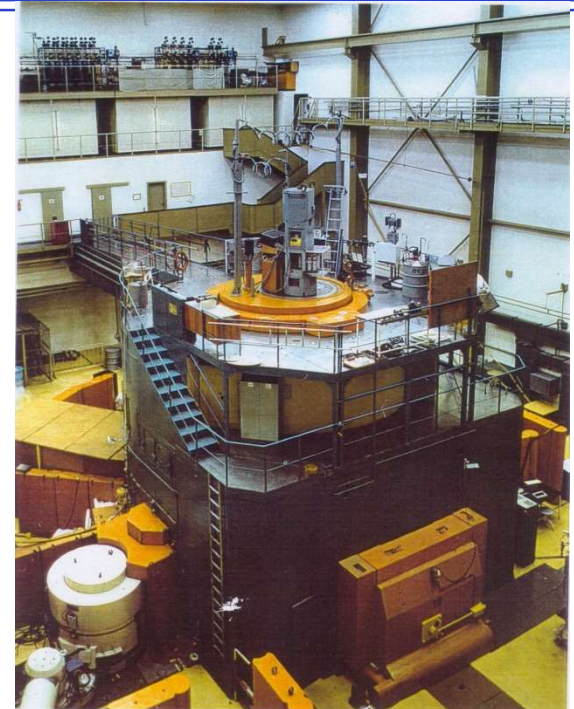
Deutschland hat/hatte viele Forschungsreaktoren an Universitäten und Forschungszentren. Gegenwärtig sind noch relevant der Forschungsreaktor an der Universität Mainz und die Forschungsneutronenquelle der TU München (Neubau!)



Rossendorfer Forschungsreaktor (RFR) I

Historisches:

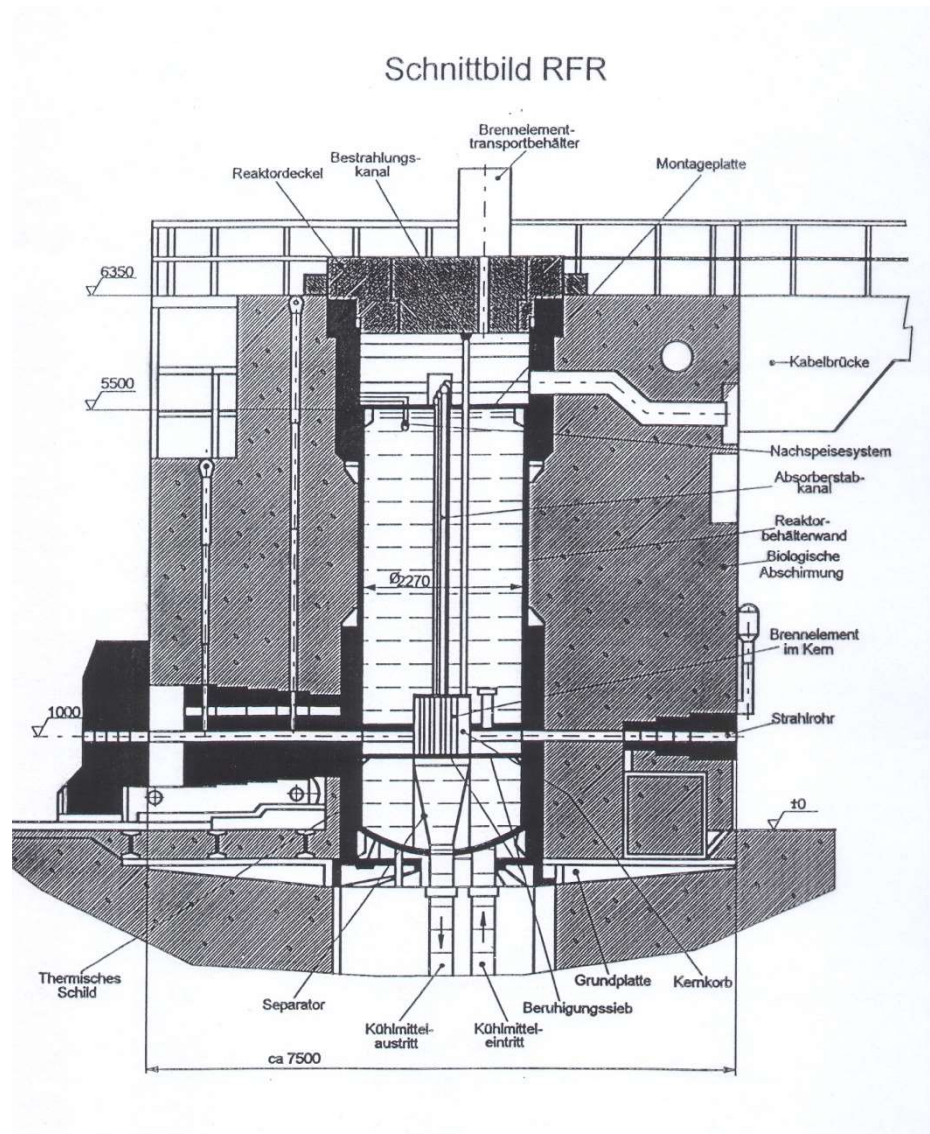
- 14.12.1957 Betriebsstart (Erreichen der Kritikalität)
- 27.06.1991 Letzte Abschaltung
- Betriebszeit 105.115 Stunden
- Energieabgabe 28130 MW-Tage
- Kernphysikalische Grundlagenforschung
- Bestrahlungen zum Zwecke der Isotopenproduktion für medizinische, biologische und technische Anwendungen und jedwede Radionuklidanwendung in der Forschung



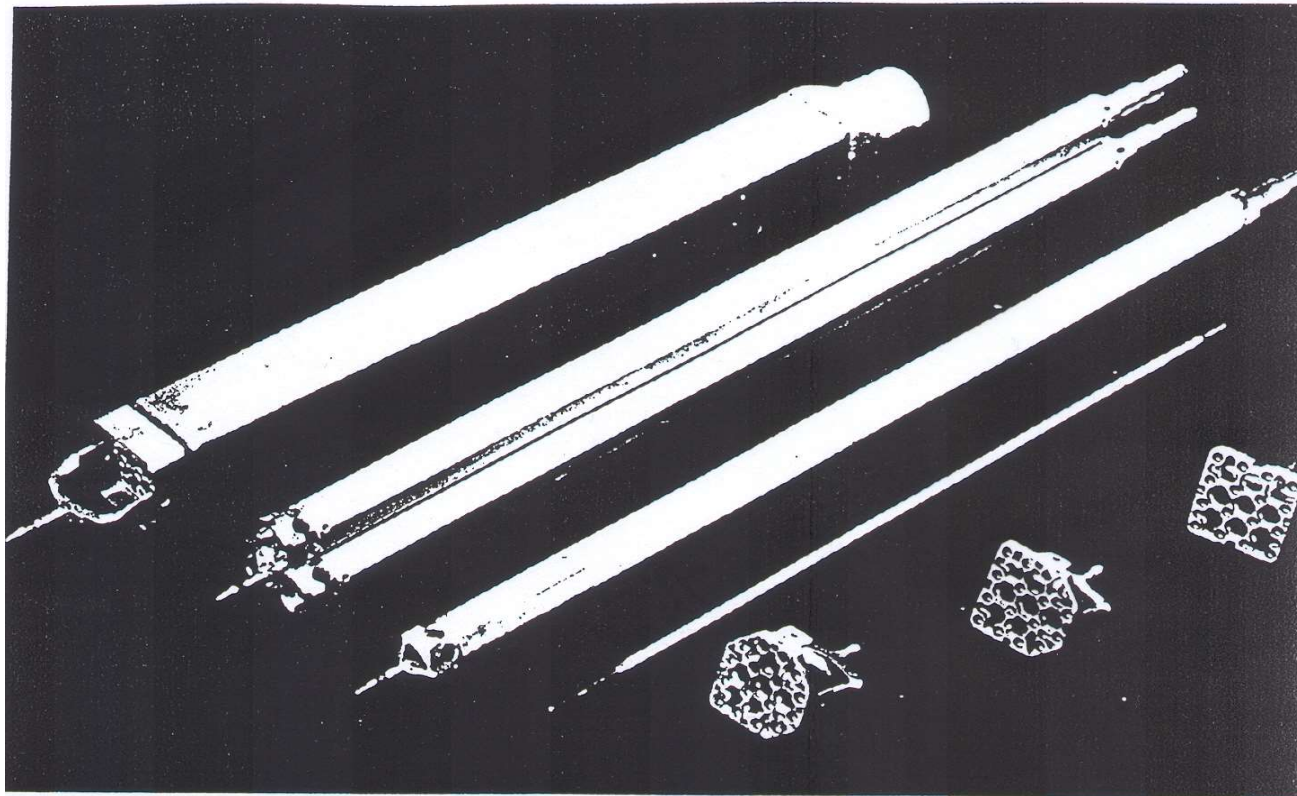
Rückbau des Reaktorkomplexes bis ca. 2015

Rossendorfer Forschungsreaktor (RFR)

II



Brennelemente des Rossendorfer Forschungsreaktors



Brennelementtypen des RFR
EK-10 Brennelement
ECH-1 Brennelement, dreifach
ECH-1 Brennelement, einfach
EK-10 Brennstab
EK-10 Brennelementköpfe (Abstandshalter)
(von oben nach unten)
Foto: Archiv FZR

Aluminium-gemantelte Brennelemente,
ca. 1m lang
Zwischengelagert im BE-Lager Ahaus
in speziellen Castor-Containern

- Kernfusion

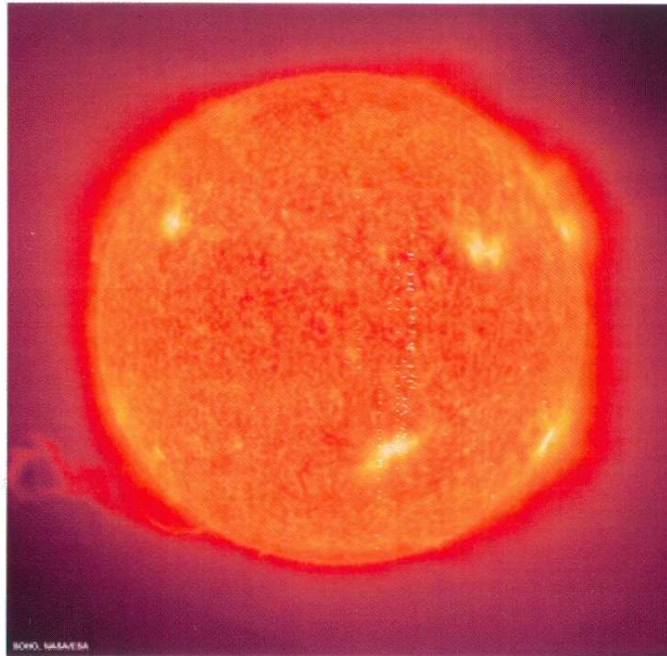
Die Sonne

Masseanteile

Außen:	Wasserstoff	71 %
	Helium	27 %
Innen:	Wasserstoff	35 %
	Helium	63 %

Temperatur

Oberfläche:	5.800 K
Sonnenflecken:	4.000 K
Zentrum:	15.600.000 K



<https://www.wikipedia.de/>

Entfernung von der Erde

ca. 150 Mio km

Größenvergleich zur Erde

ca. 330.000 Erdmassen

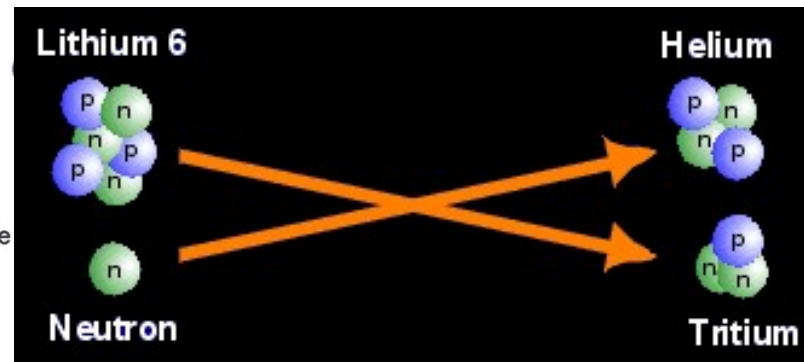
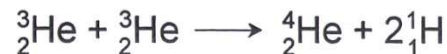
ca. 109 Erddurchmesser

Mögliche Fusionsreaktionen

Aussichtsreichste Reaktion ist die Verschmelzung von Deuterium und Tritium,
Temperatur > 100 Mio Grad Celsius,
Elektrostatische Abstoßung der Kerne überwinden durch starke Beschleunigung

Kernfusion

Wasserstoff-Wasserstoff-Reaktion:



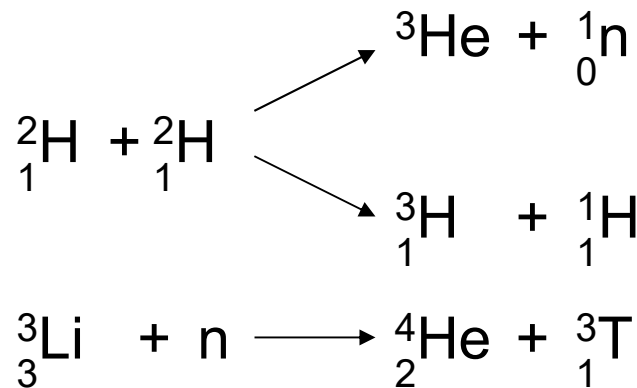
Kohlenstoff-Stickstoff-Reaktion:



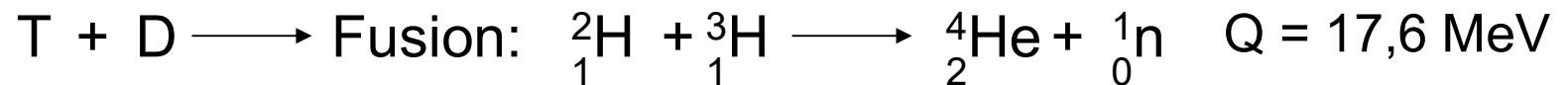
Mögliche Fusionsreaktion (irdisch)

- Kernfusionsreaktionen zwischen Wasserstoffkernen

D – D – Reaktion (Fusion von Deuterium Kernen)

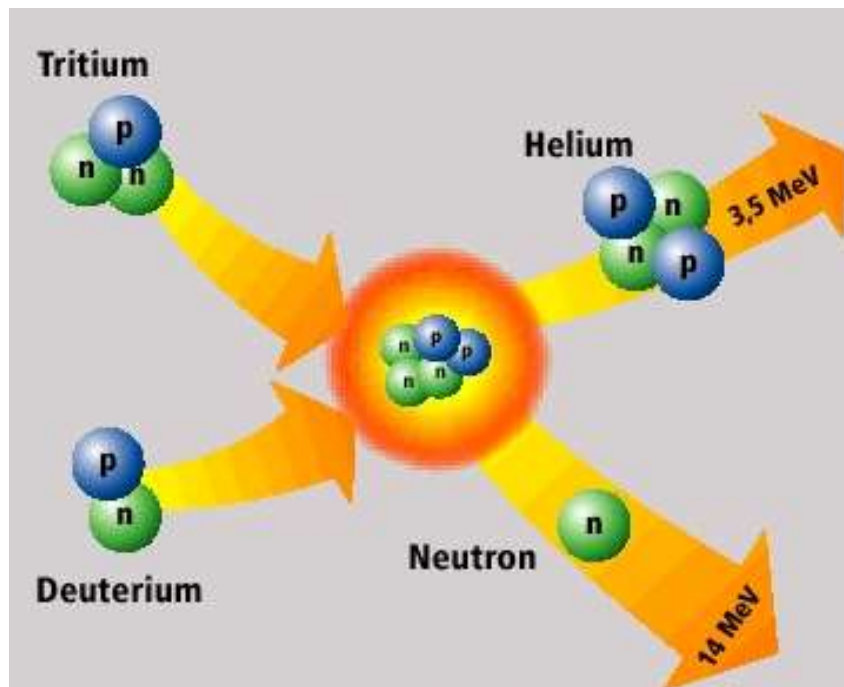


- Betrachtete Fusionsreaktion für Ausrichtung der Technologie:



Woher Deuterium, Tritium?

Fusionsreaktion zwischen Deuteriumkern und Tritiumkern



<https://www.wikipedia.de/>

Temperatur:

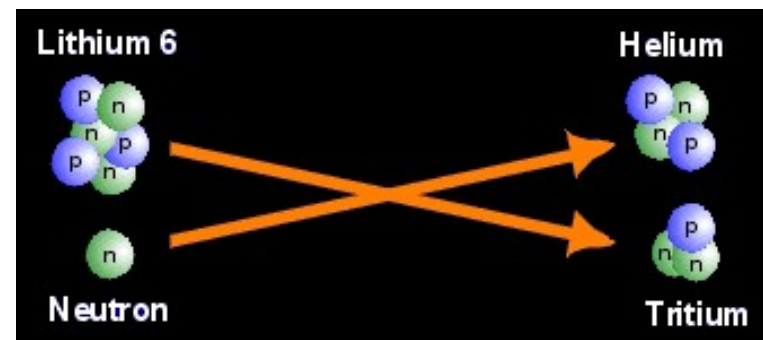
ca. 100 Mio Grad Celsius, Plasma

Verfügbarkeit:

Deuterium: jedes 8700 H-Atom ist ein D

Tritium: aus Lithium herstellbar

${}^6_3\text{Li}$ (Ausgangsmaterial zur T-Erzeugung)



Li: ${}^6\text{Li}$ 7,4% stabil,
 ${}^7\text{Li}$ 92,6% stabil

Fusionsreaktion - Energiebilanz

$$A + B \rightarrow D + \Delta E$$

$$4 p \rightarrow {}^4_2\text{He} + 2 e^+ + 2 \nu_e + \Delta E$$

$$\Delta E = (4 m_p - m_{\text{He}} - 2m_e)c^2$$

$$\Delta E = 931,5 (4 \times 1,007825037 - 4,00260325 - 4 \times 0,00054858) \text{ MeV}$$

$$\underline{\underline{\Delta E = 24,69 \text{ MeV}}}$$

$$E = m \times c^2$$

$$1 \text{ u} = 1,660566 \times 10^{-24} \text{ g}$$

$$c = 2,997925 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$$



$$1 \text{ u} = 1,49244 \times 10^{-10} \text{ J}$$

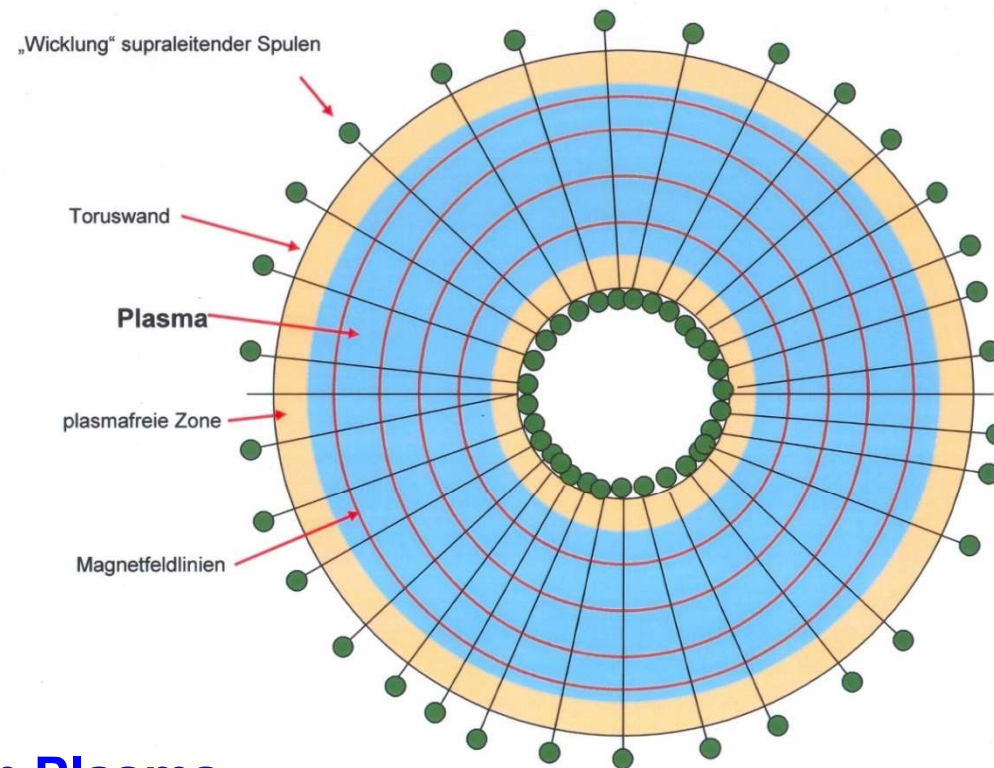
$$\xrightarrow{\text{MeV}} 931,5 \text{ MeV}$$

**75 mg Deuterium und 225 mg Lithium
reichen, um Energiebedarf einer Familie
pro Jahr zu decken.**

Fusion – Technische Realisierung

Erfolg der Forschung :

Im Dezember 2015 wurde zum ersten Mal in der Versuchsanlage Wendelstein-7 ein Plasma gezündet



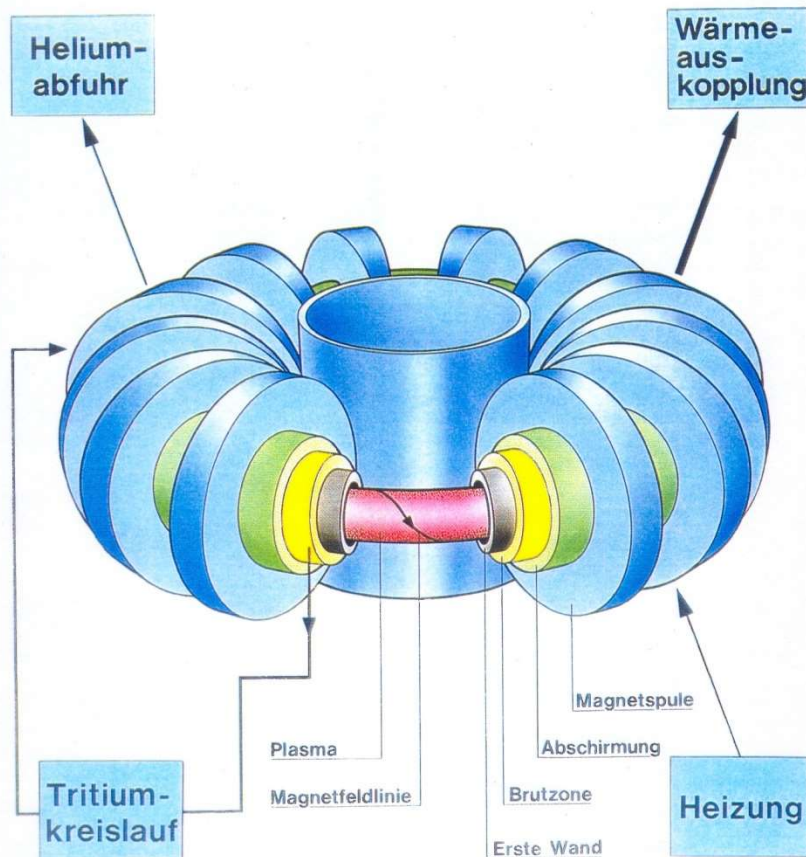
- Reaktionen im Plasma
 - * Werkstoffproblematik
- Tritium-, Heliumproblematik

Benötigt wird eine dichte „Teilchensuppe“ bei $T > 10^8$ K
Hierbei gilt $E_{\text{kin}} = 1,5 \text{ kT} \approx 9 \text{ keV} > \text{Bindungsenergie der Elektronen}$

Atomkerne und Elektronen sind ungebunden: Plasma

Plasmaeinschluss nicht durch Wände → würde sofortigen Energieverlust bedeuten → Einschluss durch B-Feld

Fusionsreaktor (Schema)



ITER wird der nächste Schritt hin zur sicherer und nachhaltiger Fusionsenergie sein, soll eine Fusionsleistung von 500 MW für eine Dauer von bis zu zehn Minuten erzeugen und für den stationären Betrieb geeignet sein.

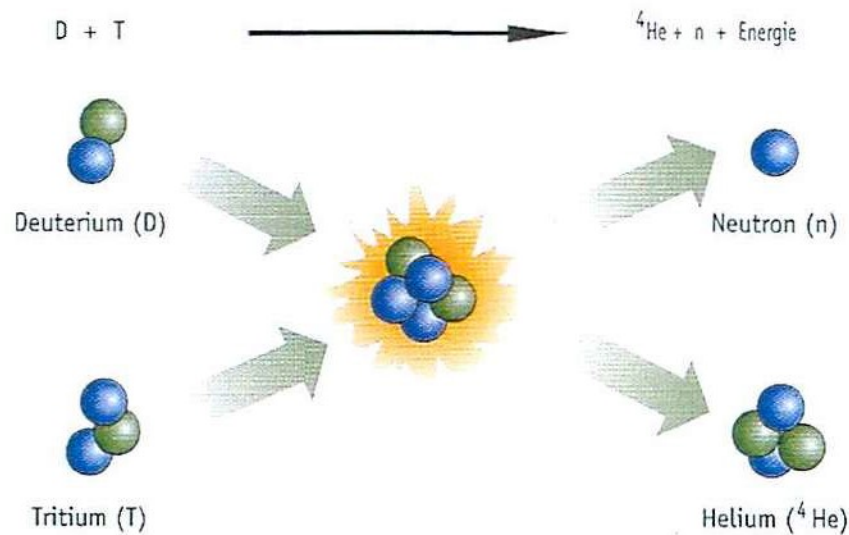
Damit soll er die wissenschaftliche und technische Machbarkeit der Fusion in einer Anlage mit Kraftwerksdimensionen demonstrieren.

International Thermonuclear Experimental Reactor
Iter, lat. der Weg

Technische Systeme zum Einschluss des Plasmas:

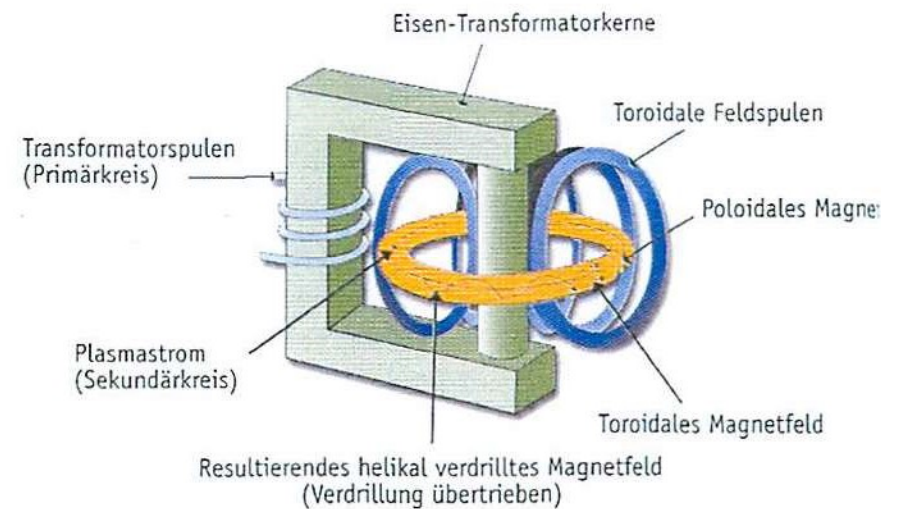
- Tokamak
- Stellarator

Typische Fusionsreaktion



Quelle: Europäische Fusionsanlage (JET).

Vereinfachtes Diagramm eines Tokamak-Fusionsreaktors



Quelle: Europäische Fusionsanlage (JET).

4.2 Beschleunigersysteme

Beschleunigersysteme

- mit geradliniger Beschleunigung

Linearbeschleuniger

Van-de-Graaff-Beschleuniger

Tandembeschleuniger

Cockcroft-Walton-Generator

Dynamitron

Kielfeld-Beschleuniger, (Laser-Plasma-Beschleuniger)

- mit zyklischer Beschleunigung

(Beschleunigung auf einer ringförmig geschlossenen, spiralartigen oder rosettenförmigen Bahn)

Betatron

Zyklotron

Mikrotron

Synchrotron

Speicherring

Rhodotron



ESRF, Grenoble, Frankreich

Physik:

Kernphysik, Teilchenphysik, Kosmologie, Synchrotronstrahlung

Chemie:

Isotopenherstellung, Massenspektrometer, Analytische Verfahren

Medizin:

Strahlentherapie, Herstellung von Isotopen

Materialwissenschaften:

Durchstrahlungsprüfung

Industrie:

Strahlensterilisation, Lebensmittelbestrahlung, Elektronenstrahlschweißen, Röntgenlithographie, Elektronenstrahlolithographie

Zyklotron

-
-
- Vielfachbeschleunigung der Teilchen im Magnetfeld
 - Zwei flache halbkreisförmige Metallbehälter, die sich innerhalb eines größeren Behälters zwischen den Polen eines starken Magnetfeldes befinden
 - Ionenquelle ist in der Mitte zwischen den beiden Metallbehältern, die als Elektroden wirken
 - Spannung wechselt mit hoher Frequenz, Ionen werden dadurch fortlaufend beschleunigt
 - Unter dem Einfluss des Magnetfeldes bewegen sich die Teilchen auf einer spiralförmigen Bahn derart, dass die Zentrifugalkraft der Kraftwirkung des Magnetfeldes gleicht

$$m \cdot v^2 / r = Ze \cdot v \cdot B$$

M: Masse

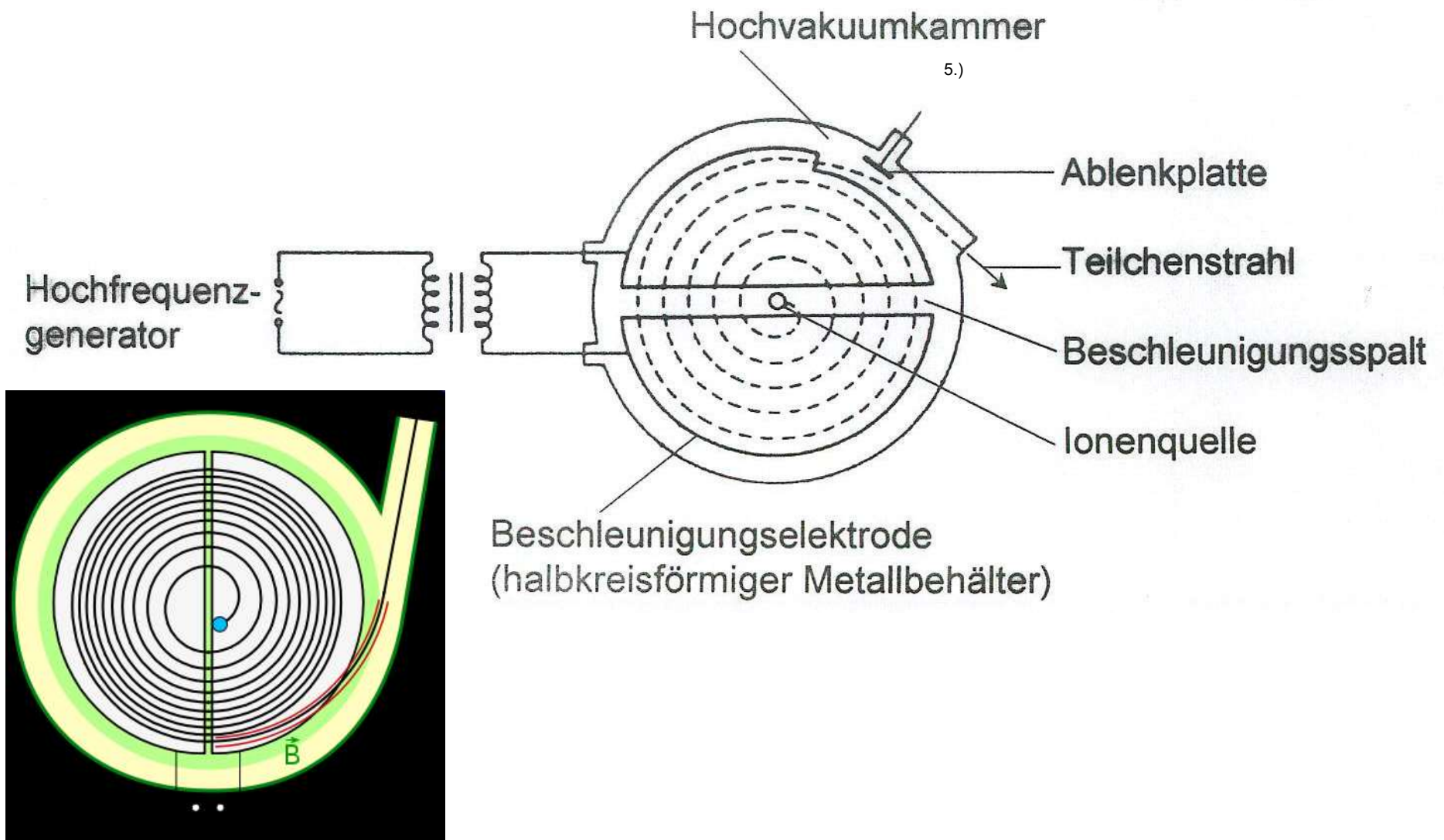
Ze: Ladung

V: Geschwindigkeit

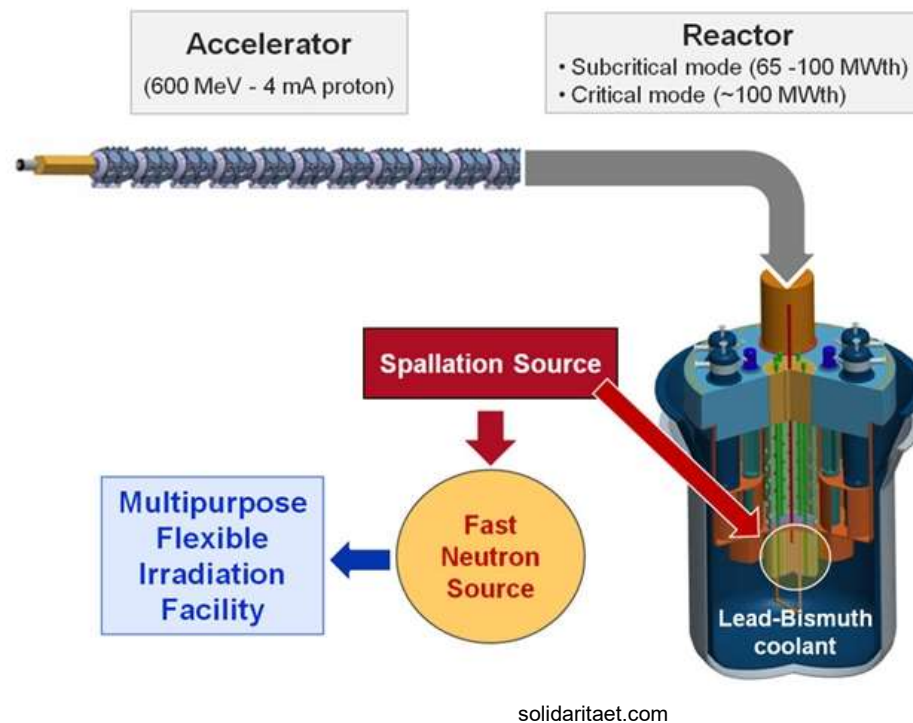
B: magnetische Flussdichte

- Praktische Grenzenergien
Protonen 22 MeV, Deuteronen 24 MeV, α -Teilchen 44 MeV

Schema eines Zyklotrons



Beschleunigergetriebene Neutronenerzeugung



MYRRHA characteristics

- 2.1 MW proton beam (600 MeV - 3.5 mA)
- Spallation target and coolant: heavy liquid metal (Lead-Bismuth Eutectic - LBE)
- 50-100 MW thermal power, mixed plutonium-uranium oxide fuel (MOX), sub-critical core

4.3 Bombe

- Technik der Atombombe (Spaltung)**

...siehe Grundlagen der Kernspaltung Wdh. bei Reaktor

Kritische Bedingungen (Beispiele)

Isotop	Kritische Masse			Link
	unreflektiert	reflektiert (20cm H ₂ O)	reflektiert (30cm Stahl)	
Thorium-229	2839 kg	2262 kg	994 kg	
Protactinium-231	580–930 kg ?	?	?	
Uran-233	16,5 kg	7,3 kg	6,1 kg	[1]
Uran-234	145 kg	134 kg	83 kg	
Uran-235	49,0 kg	22,8 kg	17,2 kg	[2]
Neptunium-235	66,2 kg	60 kg	38,8 kg	
Neptunium-236	6,79 kg	3,21 kg	3,3 kg	
Neptunium-237	63,6-68,6 kg	57,5-64,6 kg	38,6 kg	[3]
Plutonium-236	ca. 8,04-8,42 kg	5,0 kg	3,74-4,01 kg	
Plutonium-237	ca. 3,1 kg	1,71 kg	1,62 kg	
Plutonium-238	ca. 9,04 -10,31 kg	7,35 kg	4,7 kg	[4]
Plutonium-239	10,0 kg	5,42 - 5,45 kg	4,49 kg	[5]
Plutonium-240	35,7-39,03 kg	32,1-34,95 kg	18,3-22,6 kg	
Plutonium-241	12,27 - 13,04 kg	5,87-6,68 kg	5,05-5,49 kg	
Plutonium-242	85,6 kg	78,2 kg	36,2-48,1 kg	
Americium-241	57,6-75,6kg	52,5-67,6 kg	33,8-44,0 kg	
Americium-242m	9–18 kg	3,2-6,4 kg	3-4,6 kg	[6]
Americium-243	50-209 kg	195 kg	88-138 kg	[7]

Kritische Masse U-235, Pu-239

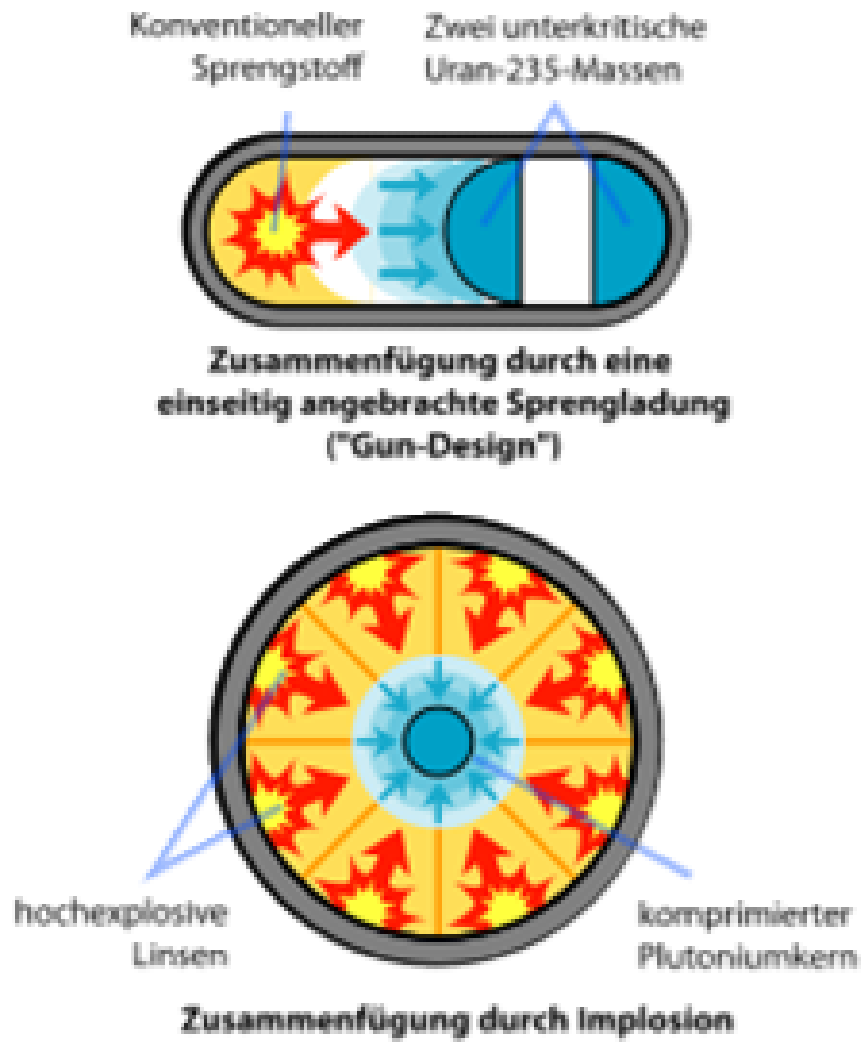
kleinste kritische Masse in Kugelform,
wässrige Lösung bei optimaler Moderation

kleinste kritische Masse in Kugelform für Metall
(schnelle unmoderierte Systeme)

	unreflektiert	Wasser-reflektiert	unreflektiert	Stahl-reflektiert
U-235	1,42 kg	0,748 kg	46,7 kg	16,8 kg
Pu-239	0,877 kg	0,494 kg	10,0 kg	4,7 kg

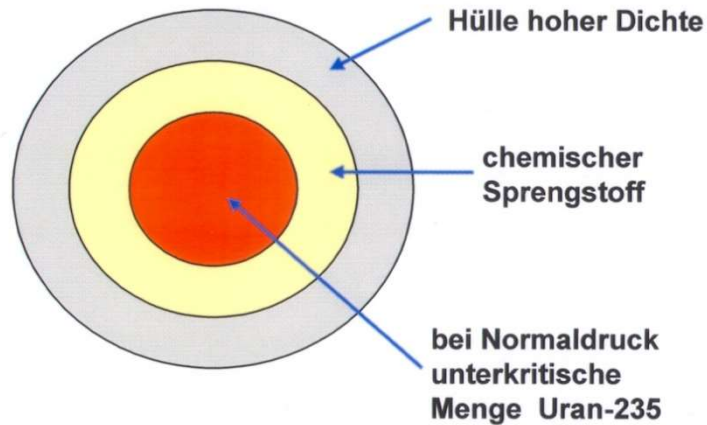
Bezeichnet die kleinste Spaltstoffmasse, die unter festgelegten Bedingungen (Art des Spaltstoffs, Geometrie, moderiertes/unmoderiertes System etc.) eine sich selbsterhaltende Kettenreaktion in Gang setzt.

Kernwaffen Prinzip: Zusammenschuss 1/ Implosion 2



Anwendung/Testung der Methoden

„Implosion“ (Bombe Hiroshima)



Pro Spaltung entstehen 1,6 freie, schnelle Neutronen

Bei 1 kg: $2,5 \times 10^{24}$ Kerne $(1,6)^{120} \approx 2,5 \times 10^{24} \rightarrow$ nach 120 „Generationen“ ist Material „verbraucht“

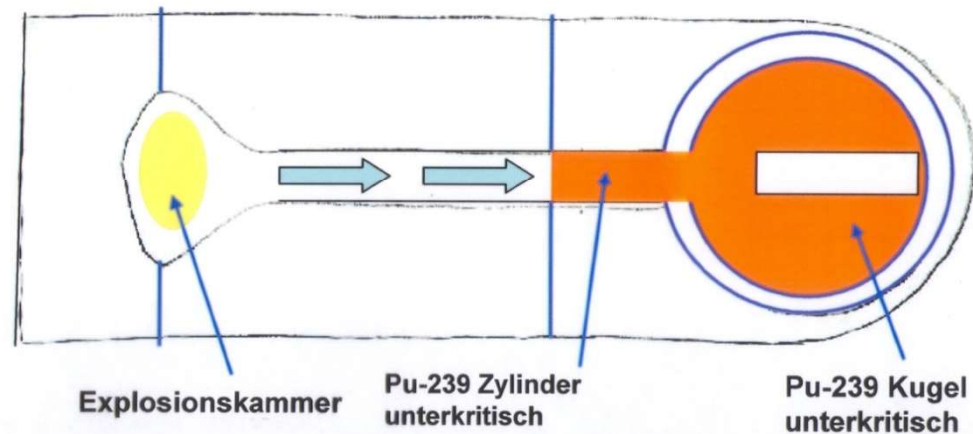
$120 \times 2,5 \times 10^{-9} \text{ s} \approx 3 \mu\text{s}$ (Zeit für gesamte Kettenreaktion)

$180 \text{ MeV} \times 2,5 \times 10^{24} = 7,2 \times 10^{13} \text{ J} \approx 20 \text{ kT TNT}$

„kritische Masse“ > 10 kg, da Wirkungsquerschnitt von 2 MeV Neutronen klein

„Zusammenschuss“ (Bombe Nagasaki)

de.wikipedia.org



Bomben:

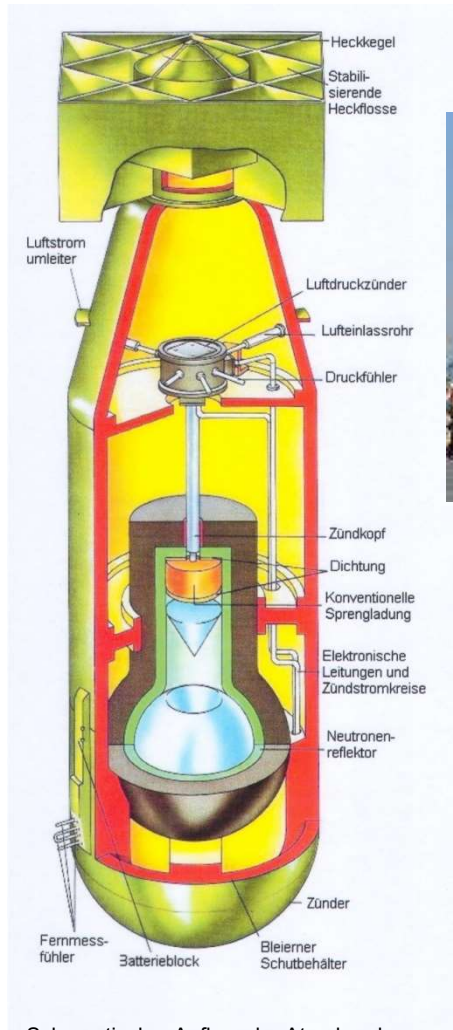
Little Boy (U-235), Hiroshima Fat Man (Pu-239), Nagasaki



Modell/Museum abc-waffen.de

Kernspaltungsbombe

Aufbau



Schematischer Aufbau der Atombombe:
kriegstechnologie.elf24.de

Transport



Taktische Kernwaffen
emaze.com

Test



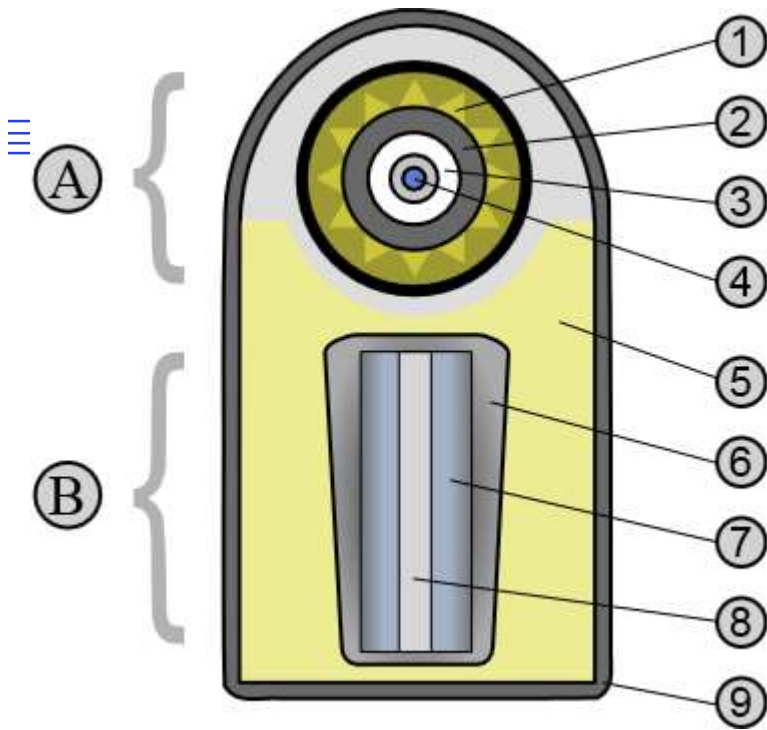
Plumbbob Fizeau, Explosion am 14. Sept. 1957
de.wikipedia.org



mitwelt.org

- Technik der „Wasserstoffbombe“

Schema Wasserstoffbombe



<https://de.wikipedia.org/wiki/Kernwaffentechnik>

nach Teller-Ulam-Design:

A - primärer Kernspaltungssprengsatz

B - sekundärer Fusionssprengsatz

1 - chemischer Sprengstoff

2 - ^{238}U - Mantel

3 - Hohlraum

4 - in Plutonium- oder Urankugel eingeschlossenes Tritiumgas

5 - Polystyrol

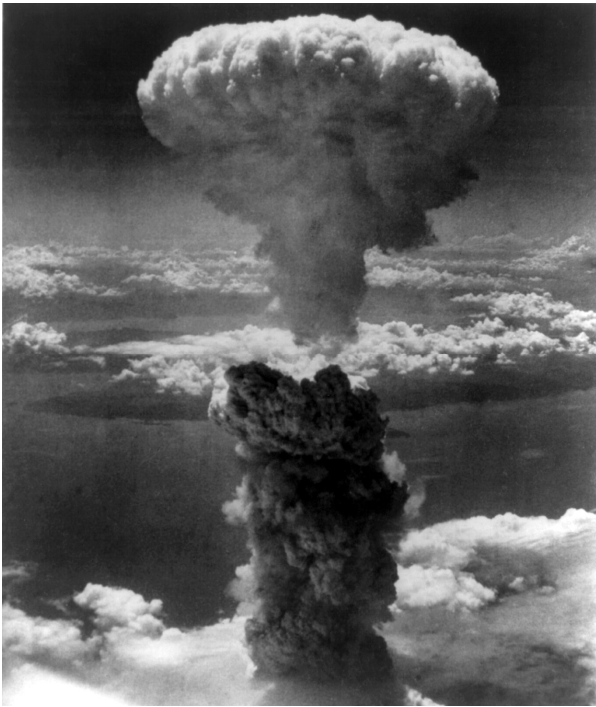
6 - ^{238}U - Mantel

7 - Lithium-6-deuterid

8 - Plutonium

9 - reflektierender Mantel

Wirkung



<https://www.wikipedia.de/>

- **Druckwelle**
- **Radioaktivität**
- **Hitze**
- **Staub (Nuklearwinter)**
- **Krater**
- **Störung elektromagnetischer Felder**

- Radioaktivität als „Waffe“

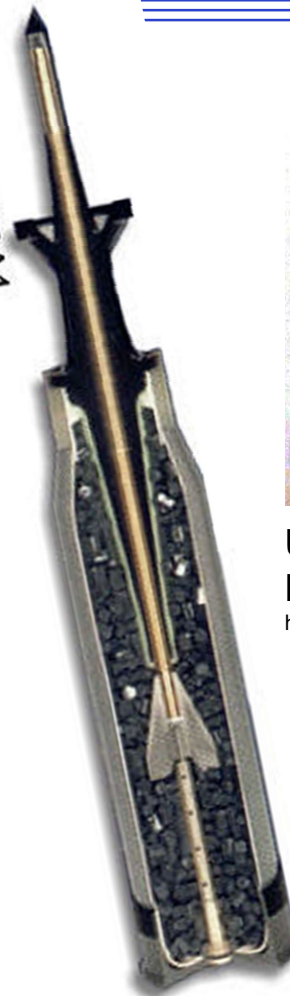
Uran-Metall in der Waffentechnik

- Uran-gemantelte Munition
- Panzerbrechende uranhaltige Granaten
- „Wandverstärkung-Panzerung“



de.euronews.com

120 mm M829A1



Urankern eines panzerbrechenden DU-Geschosses

<https://de.wikipedia.org/wiki>

kotsch88.de

Schmutzige Bombe?

Konventioneller Sprengsatz gekoppelt mit der Freisetzung radioaktiver Stoffe

Problematik:

- Erkennung ?...Messung
- Zusätzliche Gesundheitsgefährdung indirekt betroffener Personen
- Aufwändige, kostenintensive Dekontamination
- Zusätzliches psychologisches Moment