

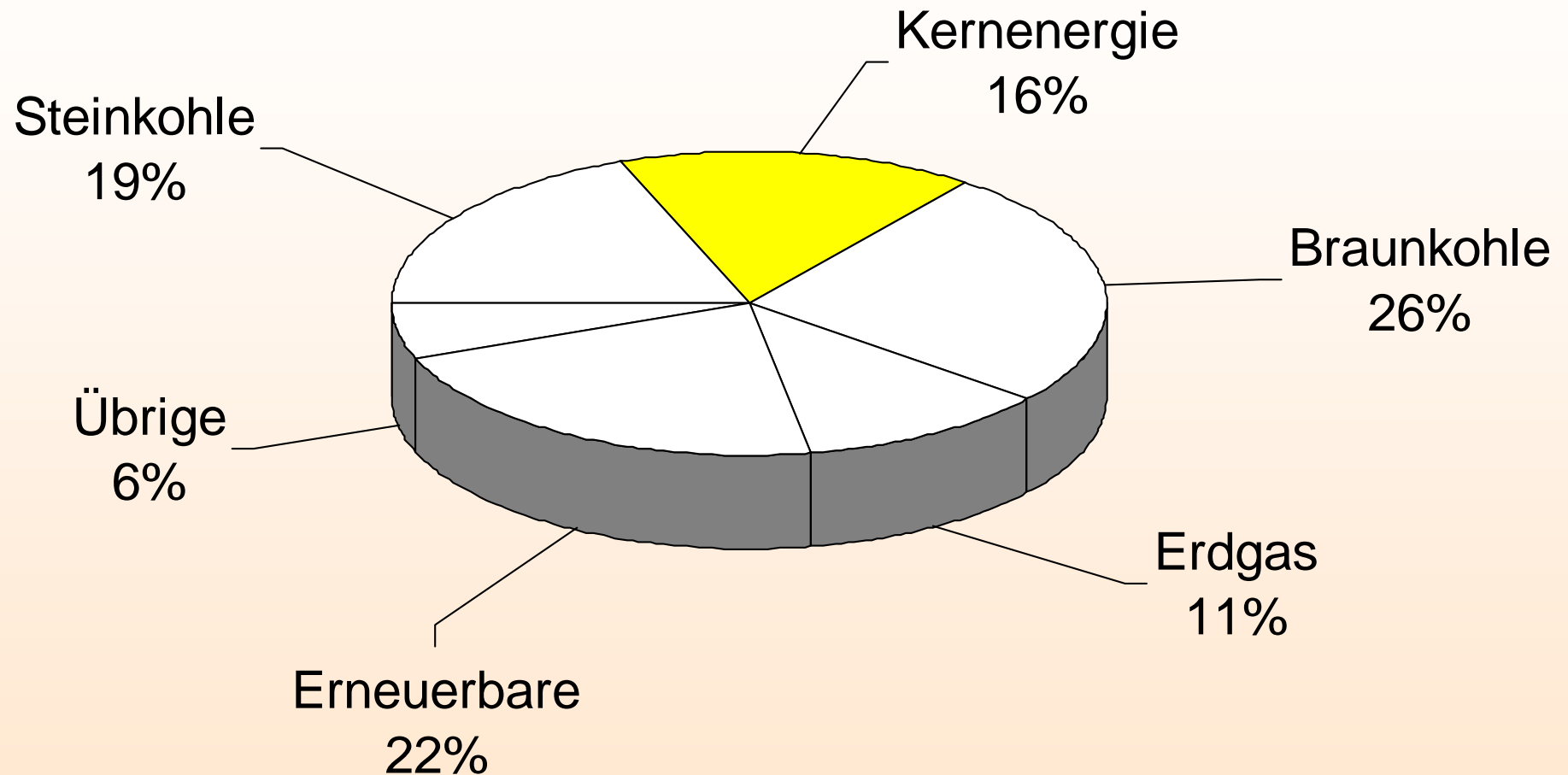
Kernenergetik

- Kernenergienutzung
- Kernspaltung
- Kettenreaktion im Kernreaktor
- Kernkraftwerke

Welche Bedeutung hat die Kernenergie ?

- *in Deutschland*
- *in Europa*
- *weltweit*

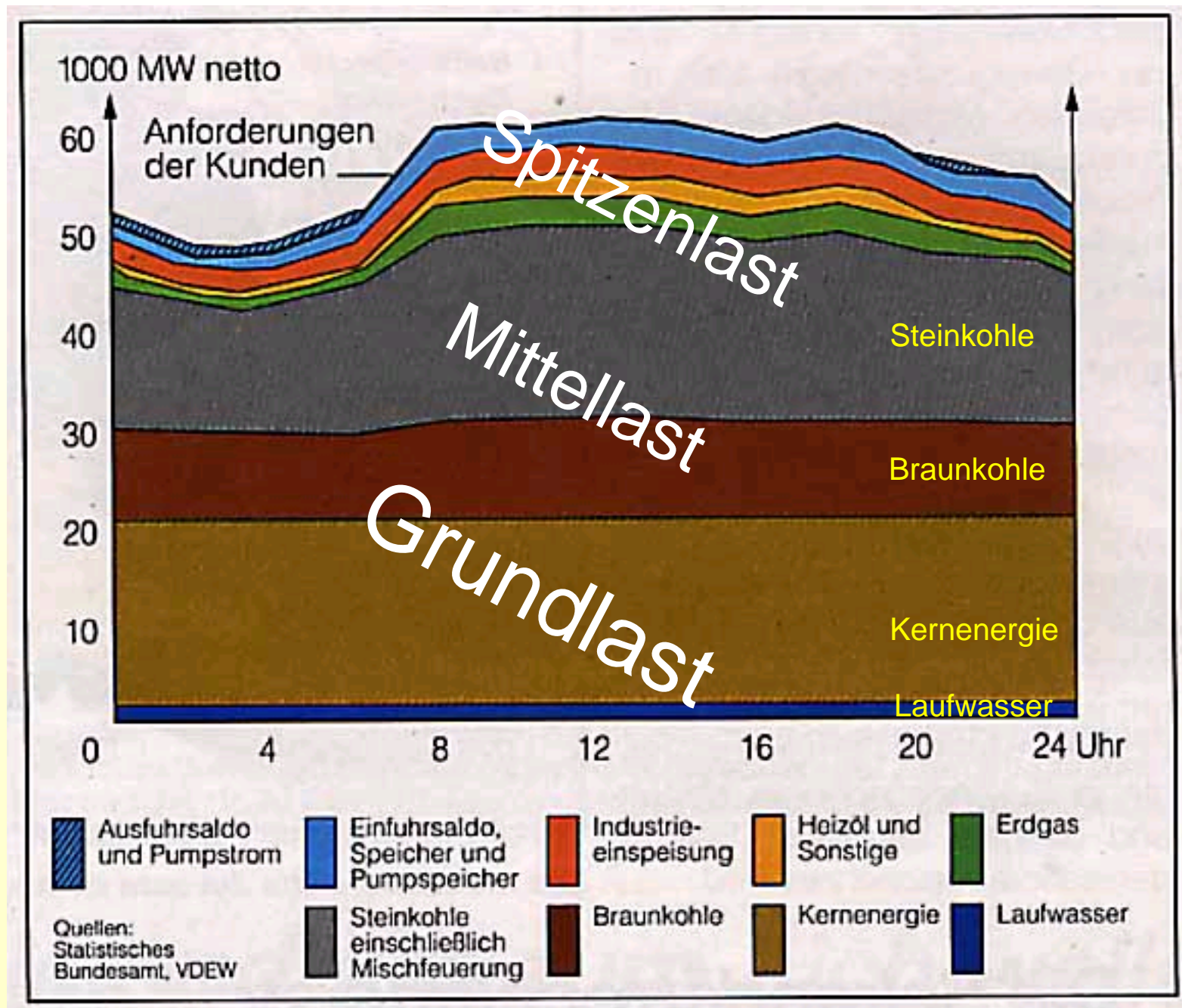
Anteile der Energieträger an der Bruttostromerzeugung im Jahr 2012 in Deutschland



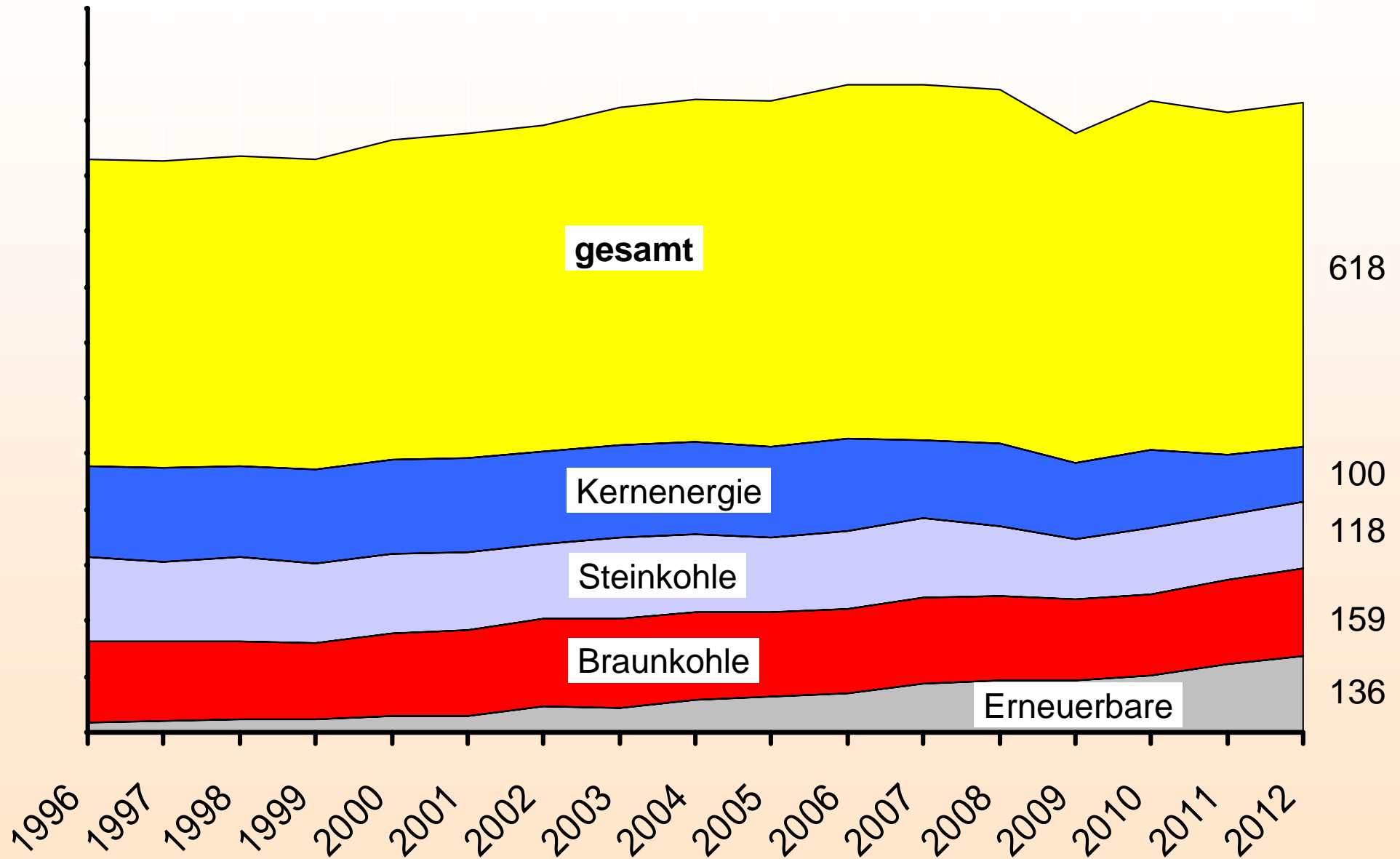
Kernenergie für die Grundlastsicherung 2012: 36 %

(Rest: Braunkohle 57 %, Laufwasser 7 %)

Lastverteilung



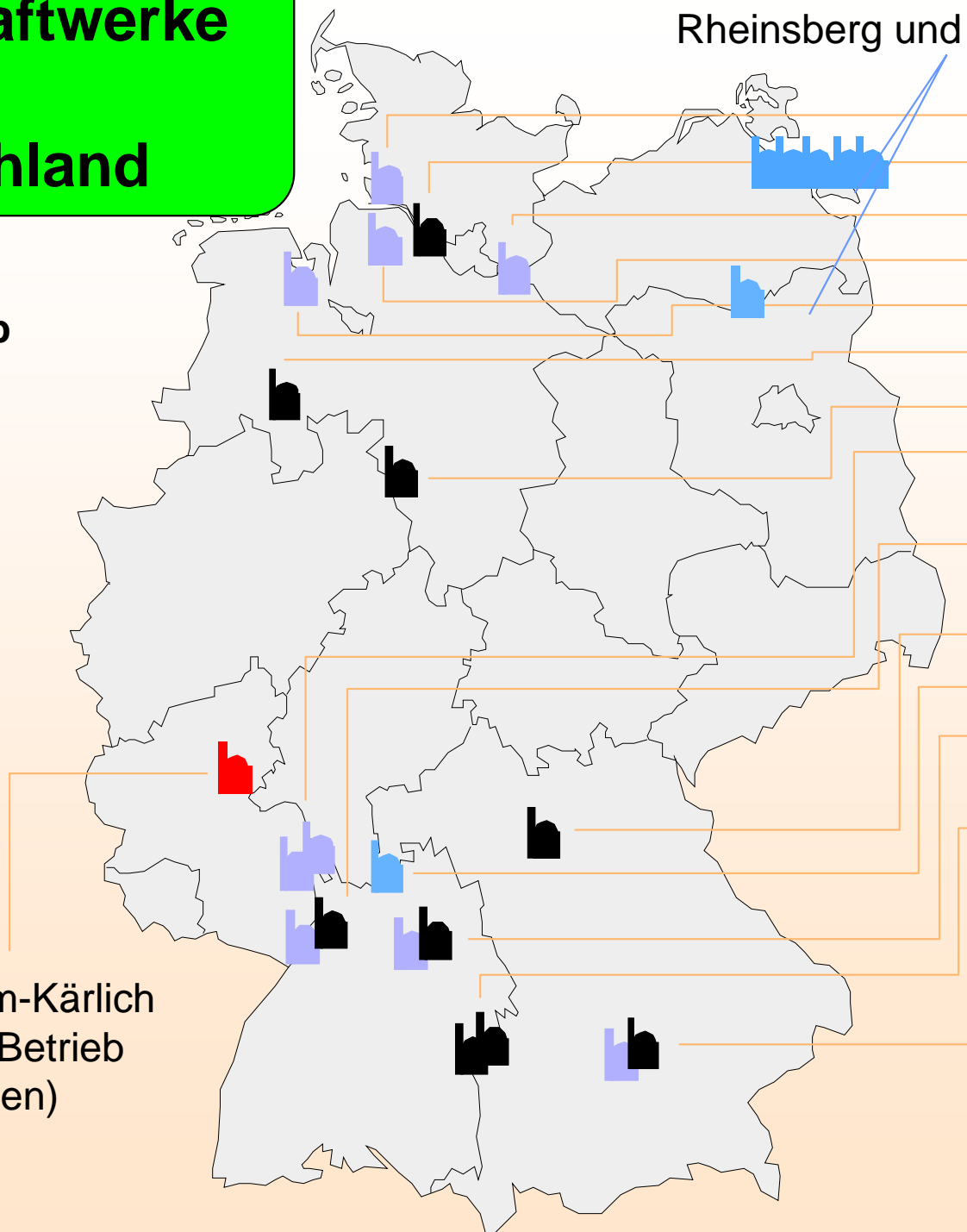
Elektroenergieerzeugung (absolut *) in Deutschland (in Mrd. kWh)



Kernkraftwerke in Deutschland

9 KKW
in Betrieb

Rheinsberg und Lubmin stillgelegt



Brunsbüttel	1977 - 2011
Brokdorf	1986 - 2021
Krümmel	1984 - 2011
Stade	1972 - 2003
Unterweser	1979 - 2011
Emsland	1988 - 2022
Grohnde	1985 - 2021
Biblis A	1975 - 2011
Biblis B	1977 - 2011
Philippsburg 1	1980 - 2011
Philippsburg 2	1985 - 2019
Grafenrheinfeld	1982 - 2015
Obrigheim	1969 - 2005
Neckarwestheim 1	1976 - 2011
Neckarwestheim 2	1989 - 2022
Gundremmingen B	1984 - 2017
Gundremmingen C	1985 - 2021
Isar 1	1979 - 2011
Isar 2	1988 - 2022

Mühlheim-Kärlich
(nicht in Betrieb
genommen)

Standort, Alter und
Inbetriebnahmejahr,
(vorauss.) Abschaltung

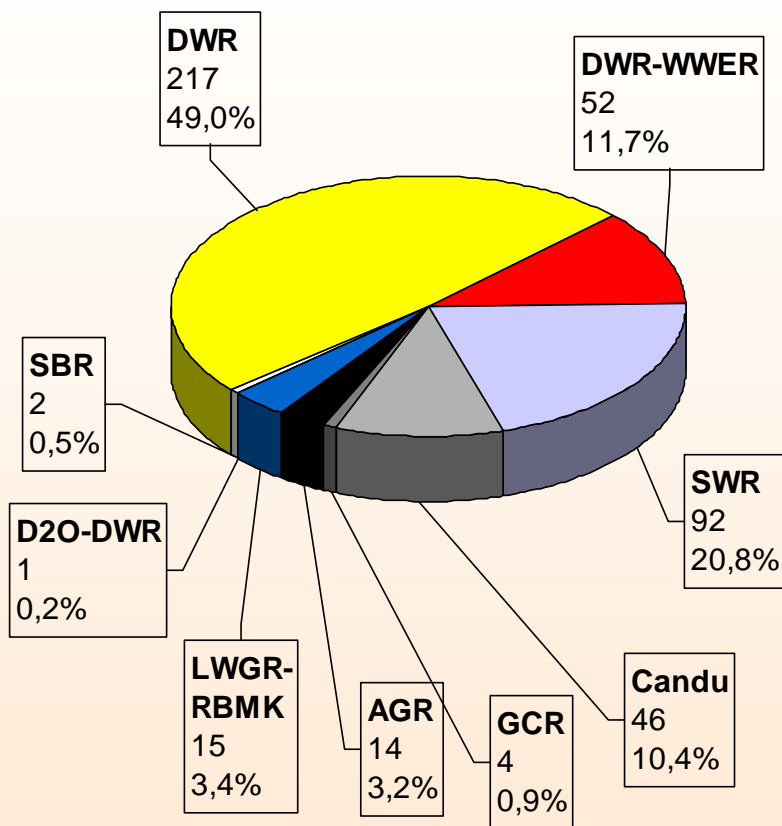
Kernkraftwerke in Europa

→ **187 Reaktoren
in Kernkraftwerken
in Betrieb**

(Stand: 31.12.2011)

Land	Prozentsatz Kernenergie	Zahl der KKW-Blöcke
Frankreich	78 %	58 (+1)
Slowakei	54	4 (+2)
Belgien	54	7
Ukraine	47	15 (+2)
Ungarn	43	4
Slovenien	42	1
Schweiz	41	5
Schweden	40	10
Bulgarien	33	2 (+2)
Tschech. Rep.	33	6
Finnland	32	4 (+1)
Spanien	20	8
Rumänien	19	2
Russland	18	33 (+10)
Großbritannien	18	18
Deutschland	18	9
Niederlande	4	1

Kernkraftwerke weltweit



Land	Anzahl	Bruttoleistung [MWel]
Argentinien	2	1.005
Armenien	1	408
Belgien	7	6.208
Brasilien	2	2.007
Bulgarien	2	2.000
China	17	13.704
Deutschland	9	12.696
Finnland	4	2.820
Frankreich	58	65.880
Großbritannien	16	10.907
Indien	20	4.780
Iran	1	1.000
Japan	51	46.628
Kanada	19	14.360
Korea (Süd)	23	21.654
Mexiko	2	1.610
Niederlande	1	515
Pakistan	3	787
Rumänien	2	1.412
Russland	33	25.242
Schweden	10	9.805
Schweiz	5	3.430
Slowakische Republik	4	1.950
Slowenien	1	727
Spanien	7	7.400
Südafrika	2	1.888
Taiwan	6	5.213
Tschechische Republik	6	4.024
Ukraine	15	13.818
Ungarn	4	2.000
USA	104	106.915
Summe (31 Länder)	437	392.793

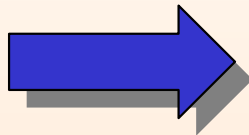
2012: - **68 KKW in Errichtung** (+5 zu 2011)
 - **2 KKW in Betrieb gegangen**
 (je 1x China und Südkorea)
 - **4 stillgelegt** (2x GB, 1x CAN, 1x E)
 - **100 KKW weltweit**
 in **fortgeschrittener Planung**

Vorzüge der Kernenergie:

- **hohe Energiedichte des Urans**
(geringe Brennstoff- und Abfallvolumina)
- **Energie"produktion"**
ohne CO₂ - Freisetzung
- **Rohstoff Uran** nur zur Kernenergieerzeugung
sinnvoll einsetzbar (Schonung anderer Ressourcen)
- **Rohstoff Uran** ist langfristig verfügbar

Energie- und Spaltstoffumsatz

$$\begin{aligned}
 \underline{1\text{g U-235}} &= \frac{N_L}{A} \text{ Atome} = \frac{6.02 \cdot 10^{23}}{235} \text{ Atome} \\
 &= \frac{6.02 \cdot 10^{23}}{235} \text{ Atome} \cdot 210 \frac{\text{MeV}}{\text{Atom}} \cdot 1.602 \cdot 10^{-19} \frac{\text{MWs}}{\text{MeV}} \cdot \frac{\text{d}}{86400 \text{ s}} \\
 &= \underline{0.997 \text{ MWd}}
 \end{aligned}$$



1 g U-235 \approx 1 MWd

Abbrand im Jahr bei Reaktor 1000 MW_{el} (3000 MW_{th}) :

$$3000 \text{ MW} \cdot 330 \text{ d} = 990000 \text{ MWd}$$

\approx 1 t U-235-Verbrauch/Jahr

\approx 1 t Spaltprodukte

\approx Würfel mit Kantenlänge 37 cm

Aber:

im frischen BE nur zu 3.5 % U-235 enthalten
(Rest ist U-238)

→ Gesamtabfall 30 x mehr

→ 30 t Abfall in abgebrannten BE

→ ca. 50 BE/Jahr

Nuklidanteile im Brennelement

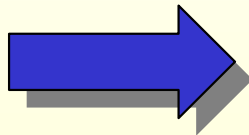
Natururan	99.3 %	U-238
	0.7 %	U-235

frisches Brennelement	96.5 %	U-238
	3.5 %	U-235

abgebranntes Brennelement	95.0 %	U-238
	0.8 %	U-235
	0.9 %	Pu
	3.2 %	Spaltprodukte
	0.1 %	übrige Aktiniden

Energie- und Spaltstoffumsatz

$$\begin{aligned}
 \underline{1\text{g U-235}} &= \frac{N_L}{A} \text{ Atome} = \frac{6.02 \cdot 10^{23}}{235} \text{ Atome} \\
 &= \frac{6.02 \cdot 10^{23}}{235} \text{ Atome} \cdot 210 \frac{\text{MeV}}{\text{Atom}} \cdot 1.602 \cdot 10^{-19} \frac{\text{MWs}}{\text{MeV}} \cdot \frac{\text{d}}{86400 \text{ s}} \\
 &= \underline{0.997 \text{ MWd}}
 \end{aligned}$$



1 g U-235 \approx 1 MWd

A Zum Vergleich: Wieviel Braunkohlebriketts müsste man zur Erzeugung der gleichen Energiemenge verbrennen ?

Heizwert BB: 4700 kcal / kg

Umrechnung: 1 Ws = $2,388 \cdot 10^{-4}$ kcal

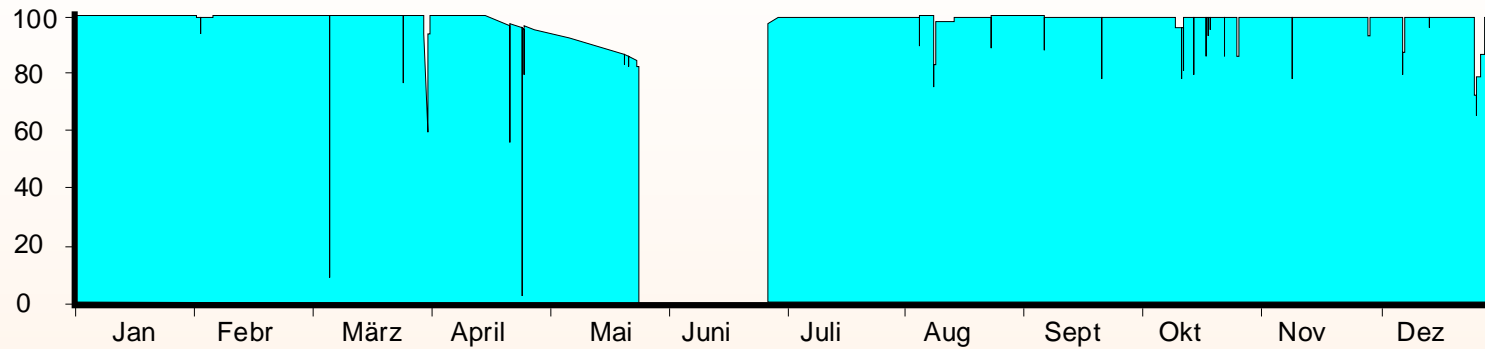
$$\begin{aligned}
 \underline{1 \text{ MWd}} &= 10^6 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ Ws} \\
 &= 10^6 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 2,388 \cdot 10^{-4} \text{ kcal} \\
 &= 10^6 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 2,388 \cdot 10^{-4} \cdot (1/4700) \text{ kg BB} \\
 &= 4390 \text{ kg BB} = \underline{\underline{4,39 \text{ t BB}}}
 \end{aligned}$$

→ ca. 50 BE/Jahr

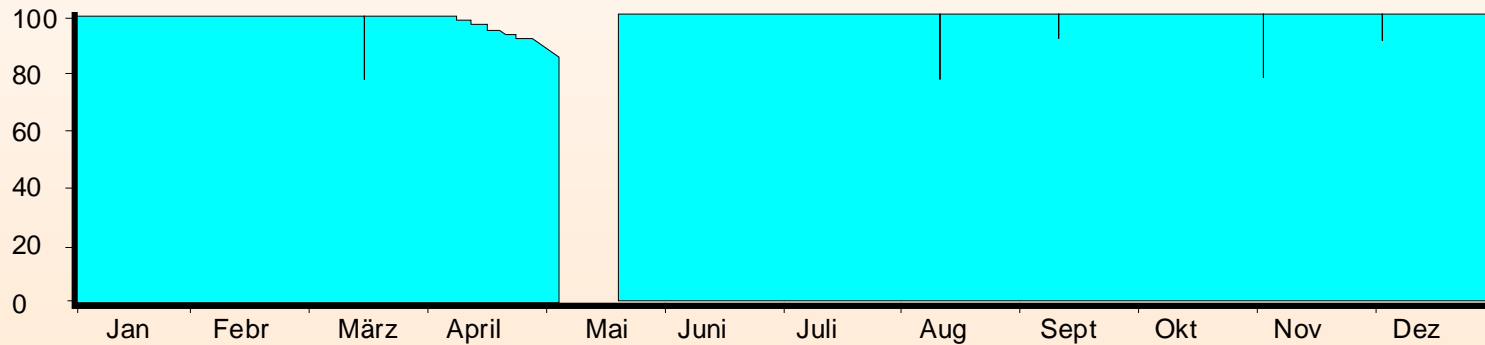
3.2 %	Spaltprodukte
0.1 %	übrige Aktiniden

Betriebsabläufe in deutschen Kernkraftwerken 1998

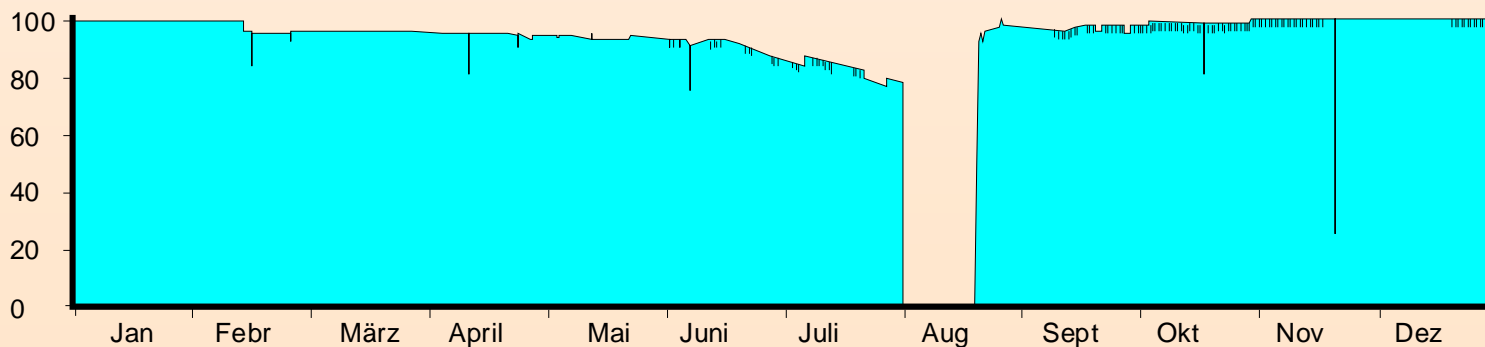
Elektrische Leistung in Prozent



Brokdorf



Emsland



Philippsburg 2

Quelle:
Kernenergie in Deutschland
Jahresbericht 1998
Deutsches Atomforum e.V.

Verfügbarkeit von Kraftwerken

Volllaststunden der Kraftwerke

Jahresvolllaststunden der deutschen
Energiekraftwerke im Jahr 2011



Quelle: Vattenfall / Grafik: Enzo Forciniti

entspricht bei 8760 Std./a einer durchschnittlichen Verfügbarkeit von:

87 %

78 %

69 %

43 %

40 %

37 %

19 %

13 %

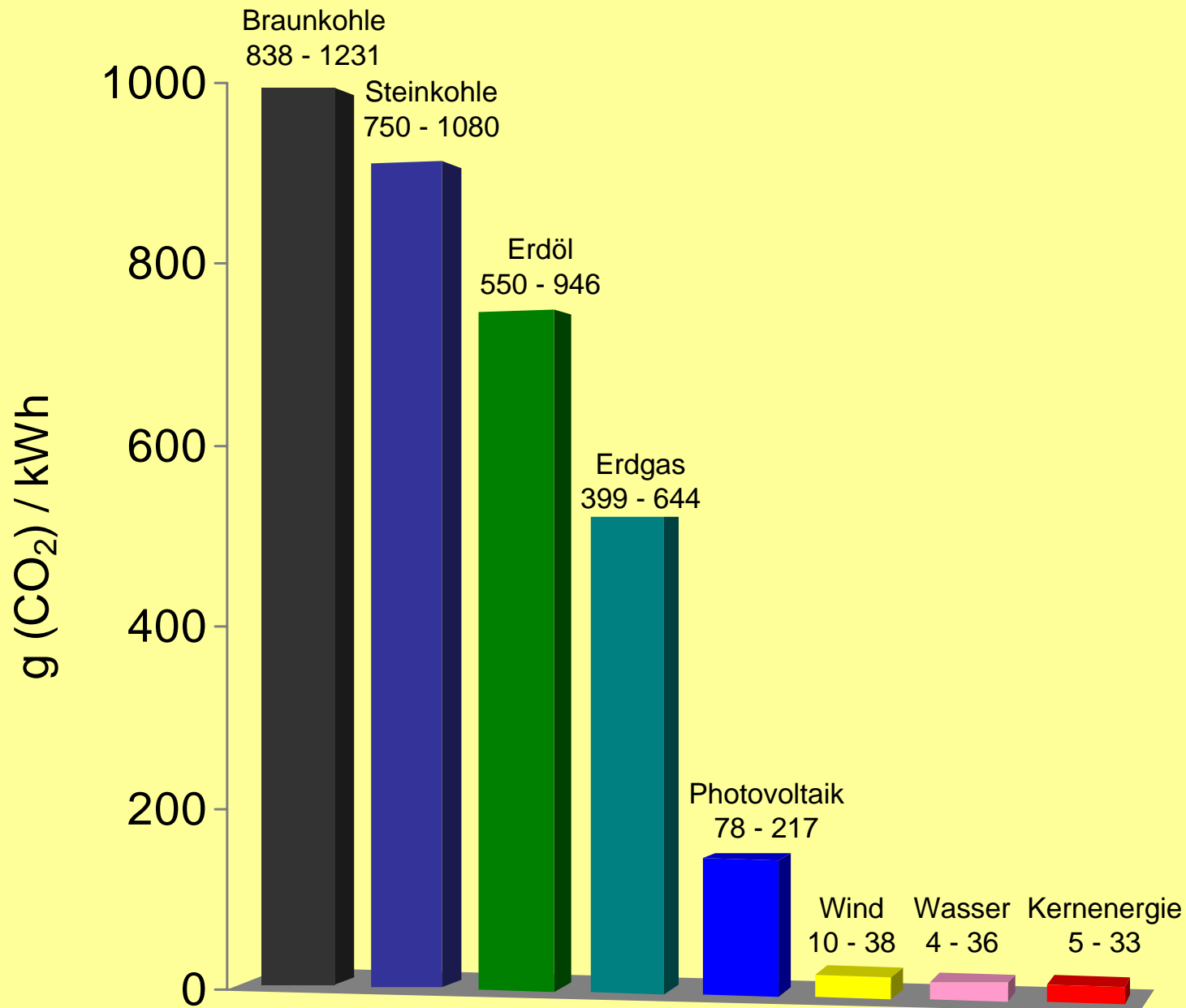
11 %

11 %

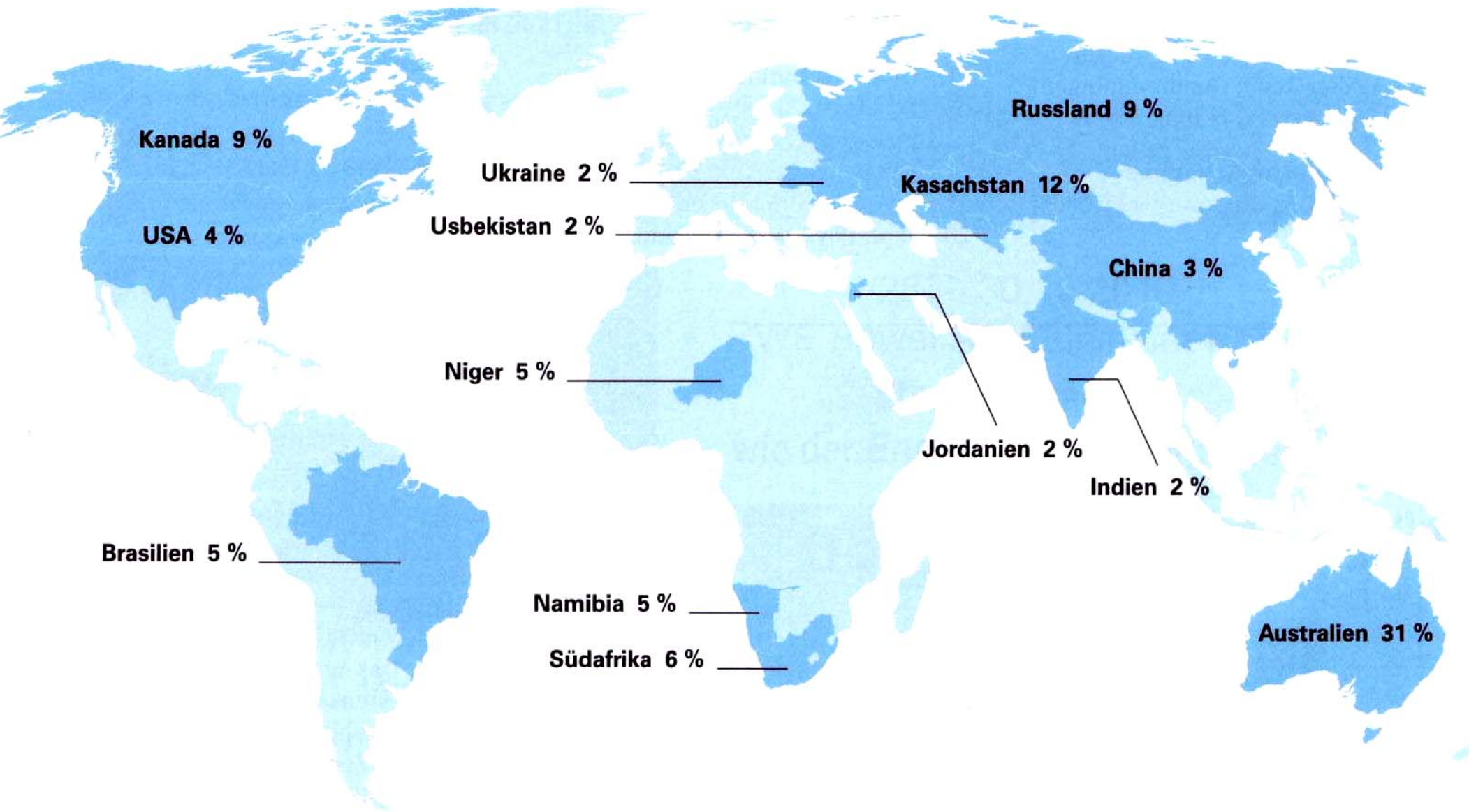
Resultat: mit dem Ausstieg aus der Kernenergie werden die Kraftwerke mit der höchsten Verfügbarkeit und Versorgungssicherheit abgeschaltet

Treibhausgas-Emissionen

Energieträger mit Lebenszyklus-Analyse

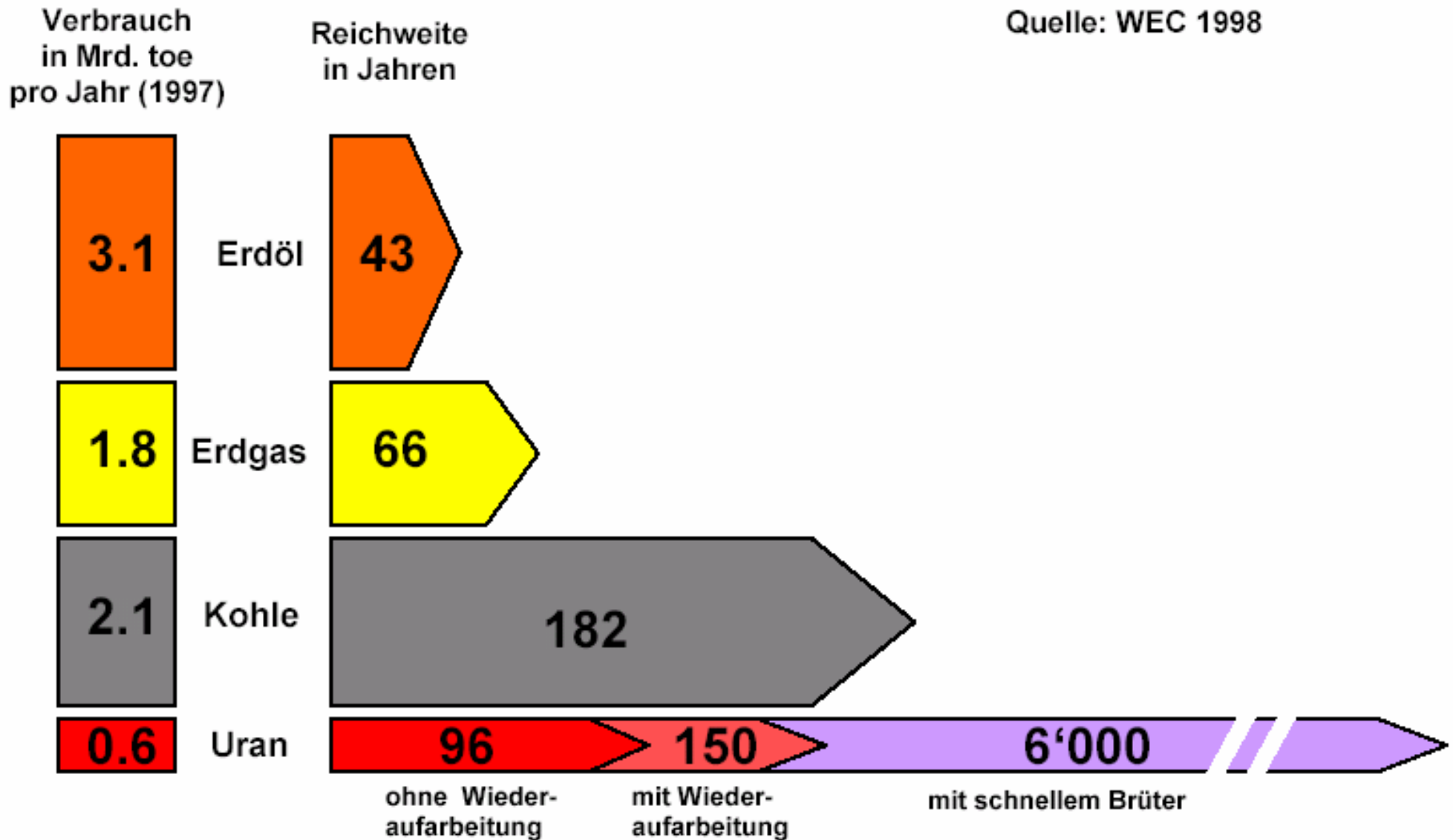


Weltweite Verteilung der Uranressourcen 2009

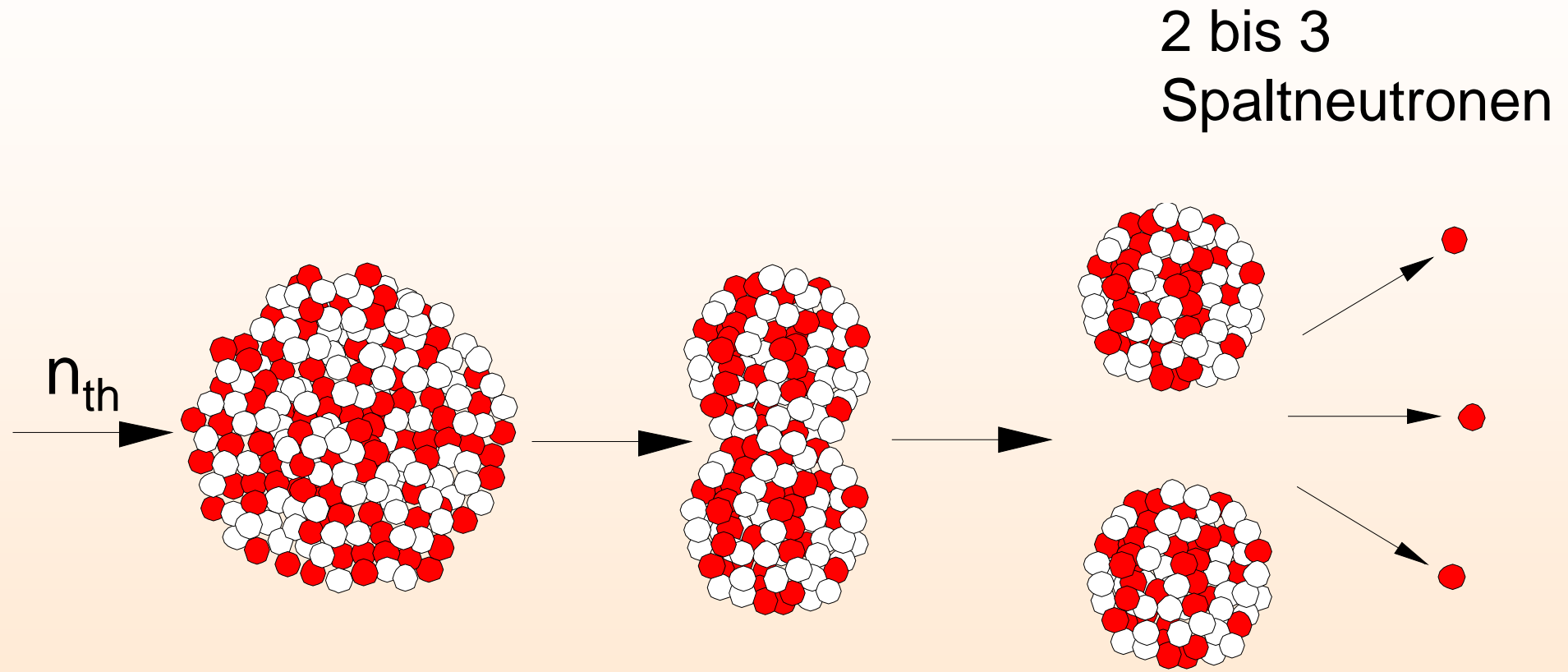


**Förderwürdigkeit bis 130 US-\$ pro kg Natururan
(97 % der Reserven in gezeigten 14 Staaten, restl. 3 % verteilen sich auf 19 weitere Staaten)**

Reichweiten verschiedener Energieträger



Kernspaltung



Spaltstoff:

U-235

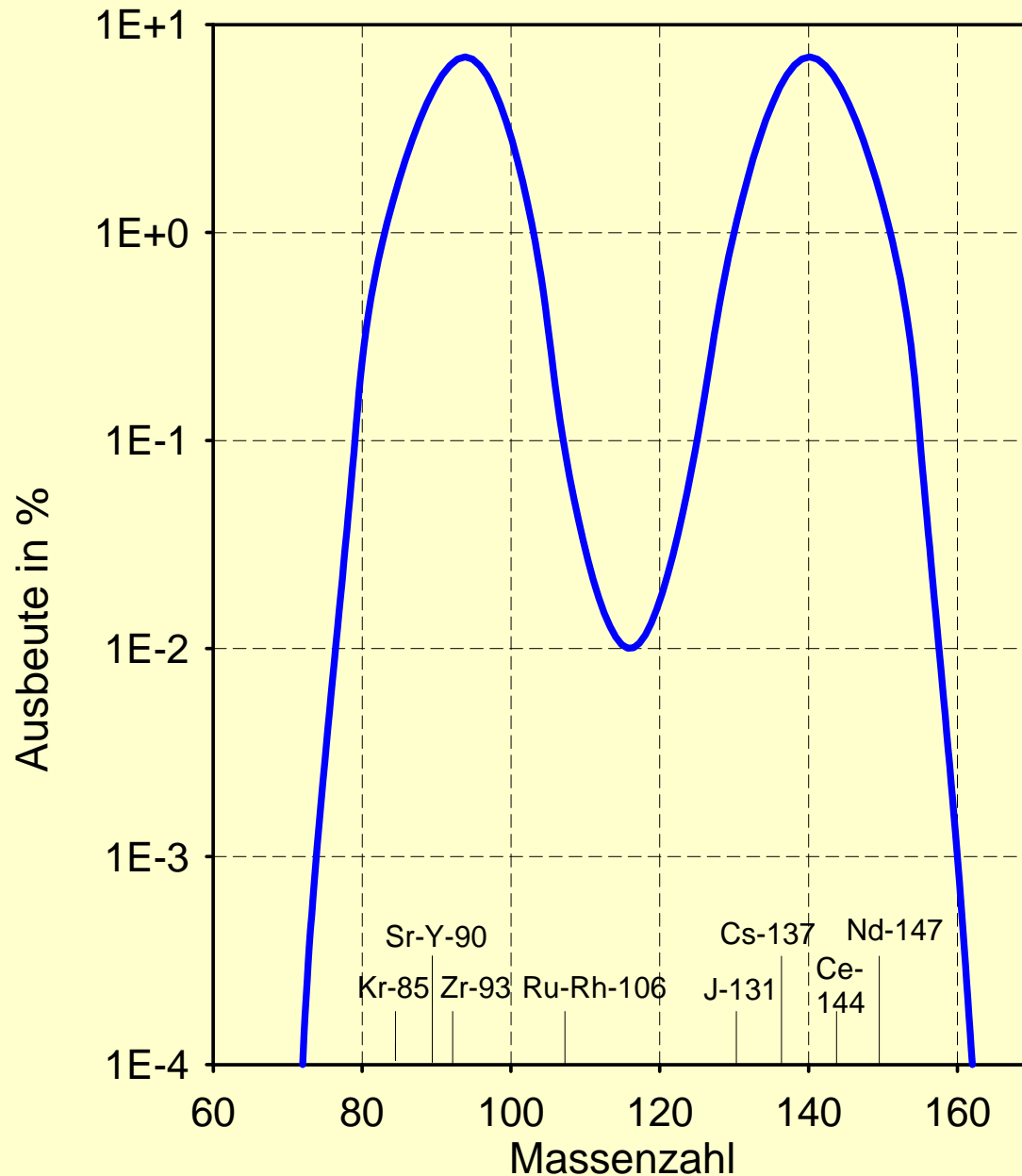
Pu-239 (aus U-238)

U-233 (aus Th-232)

U-236

2 Spalt-
bruchstücke

Spaltproduktverteilung



**Aktivität nach 1 Jahr
auf 1% abgesunken**

Energiefreisetzung bei der Kernspaltung

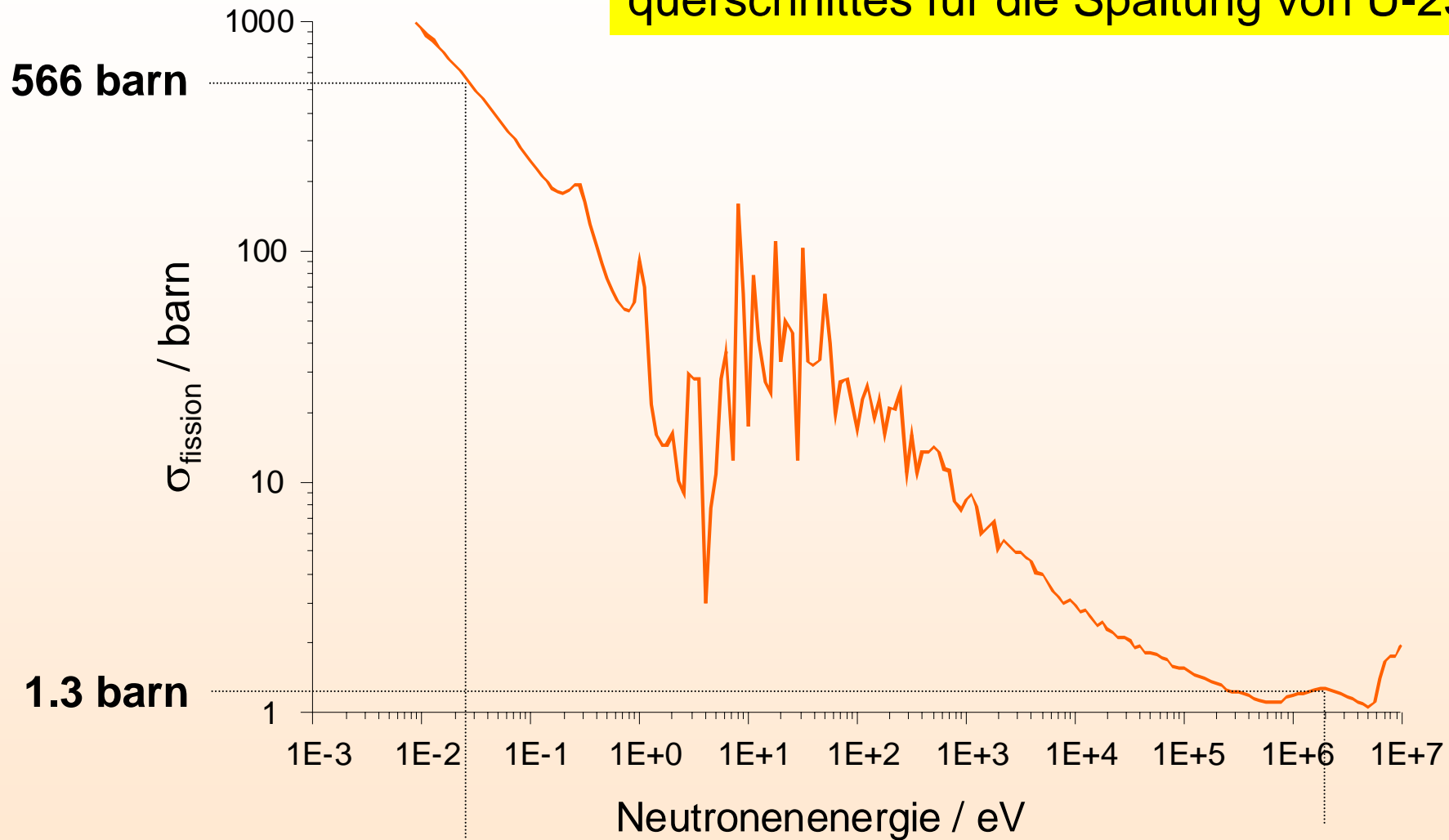
Spaltprodukte	175 MeV
prompte Neutronen	5 MeV
prompte Gammastrahlung	7 MeV
β -Strahlung aus Spaltprodukten	7 MeV
γ -Strahlung aus Spaltprodukten	6 MeV
Neutrino	10 MeV
gesamt	210 MeV

Vergleich: Verbrennen fossiler Energieträger (Kohle, Öl, Gas, Holz)
= Oxidation → **ca. 30 eV** pro Reaktion
Unterschied: **7 Zehnerpotenzen !**

Eigenschaften der Spaltneutronen:

- $\bar{E} \approx 2 \text{ MeV}$ (schnell)
- 99,36 % prompte Neutronen (10^{-9} s)
- 0,64 % verzögerte Neutronen ($\approx 1 \text{ min}$)

Energieabhängigkeit des Wirkungsquerschnittes für die Spaltung von U-235



$E_n = 0.025 \text{ eV}$
(thermische Neutronen)

← **Abbremsung**
= **Moderation**

$E_n = 2 \text{ MeV}$
(schnelle Neutronen)

Moderatoreigenschaften

- gute Bremsung von Neutronen
- geringe Absorption von Neutronen

Moderator		mittlere Stoßzahl für eine Abbremsung von 1.75 MeV auf 0.025 eV	Neigung zum Einfang thermischer Neutronen in relativen Einheiten
Wasserstoff	${}^1_1\text{H}$	18	650
Deuterium	${}^2_1\text{H}$	25	1
Beryllium	${}^9_3\text{Be}$	86	7
Kohlenstoff	${}^{12}_6\text{C}$	114	10
Uran	${}^{238}_{92}\text{U}$	2172	5600

		H ₂ O	D ₂ O	Be	Graphit
Bremsver- mögen	• $\frac{G_s}{G_a}$	1.53	0.170	0.178	0.061
Brems- verhältnis	• $\frac{G_s}{G_a}$	70	5200	162	235

Verzögerte Neutronen

i	1	2	3	4	5	6
T_2 / s	0,2	0,6	2,3	6,2	23	56
$a_i = \beta_i / \beta$	0,042	0,115	0,395	0,196	0,219	0,033
Mutterkern	?	?	?	Br-89	J-137	Br-87
n pro 10^3 Spaltungen (U-235)	0,7	1,8	6,2	3,1	3,5	0,5

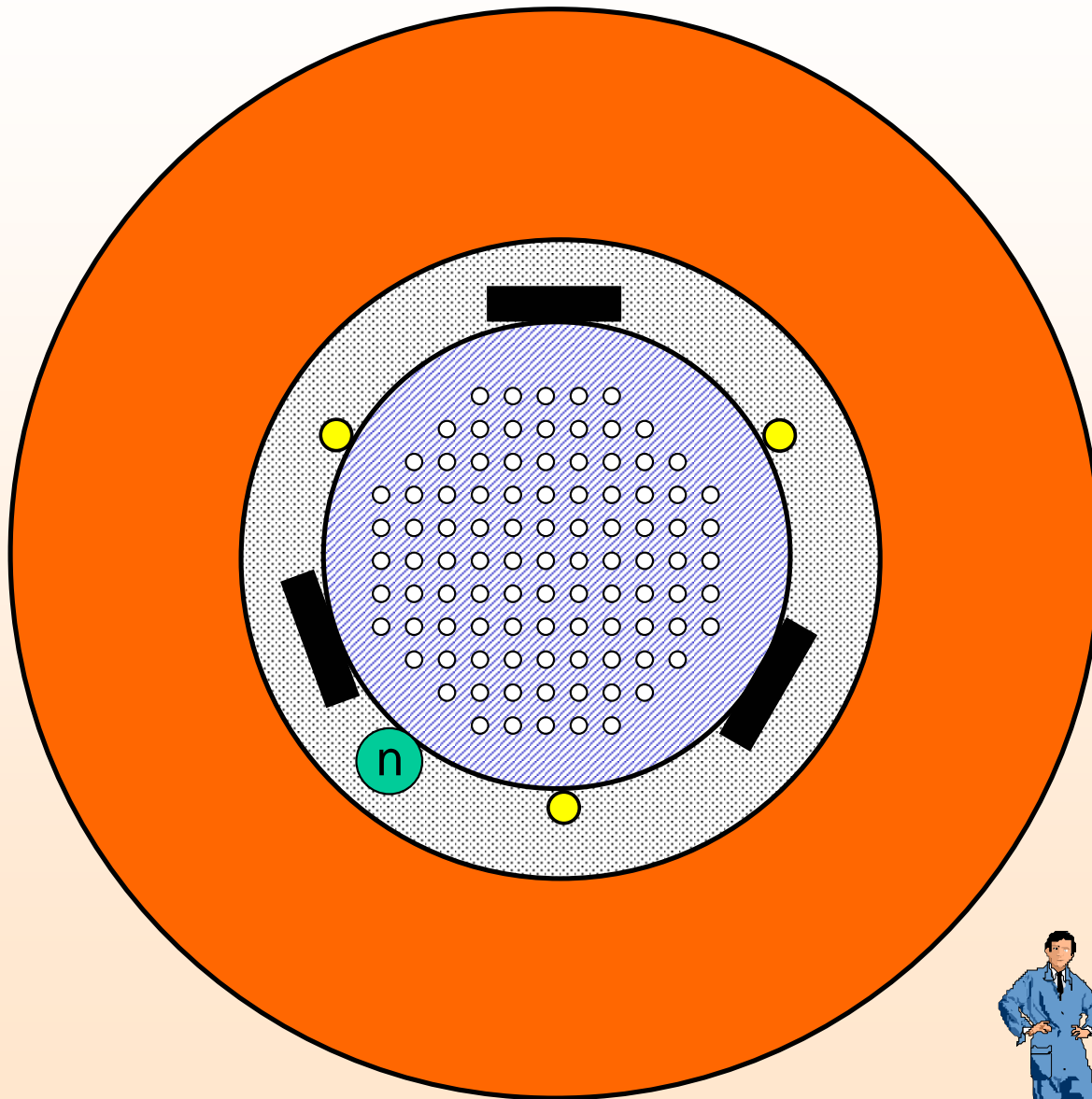
$$\Rightarrow \Sigma = 1$$

$$\Rightarrow \Sigma = 15,8$$

$$\rightarrow 15.8/1000/2.47 = 0.64\%$$



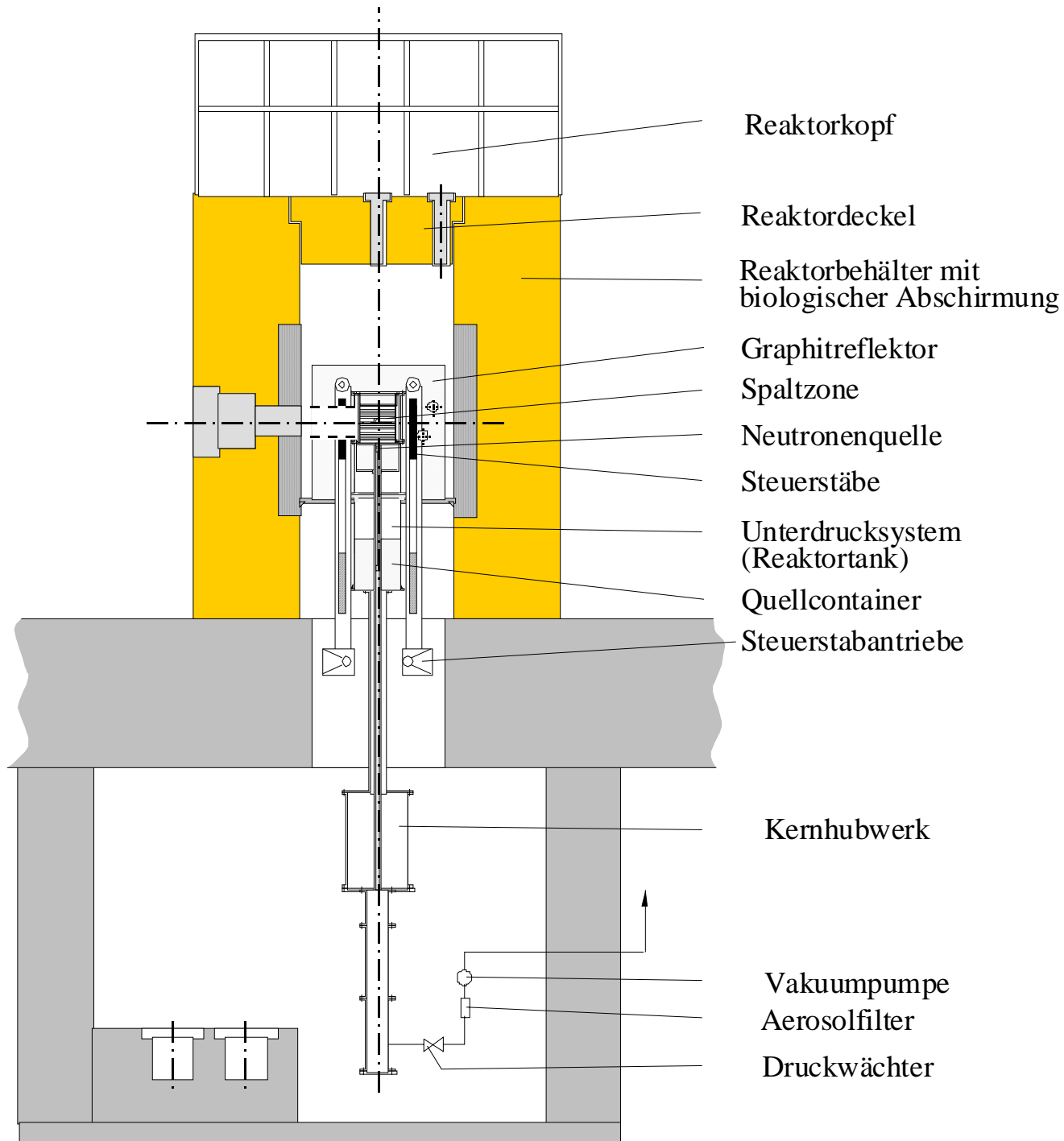
Prinzipaufbau eines Kernreaktors



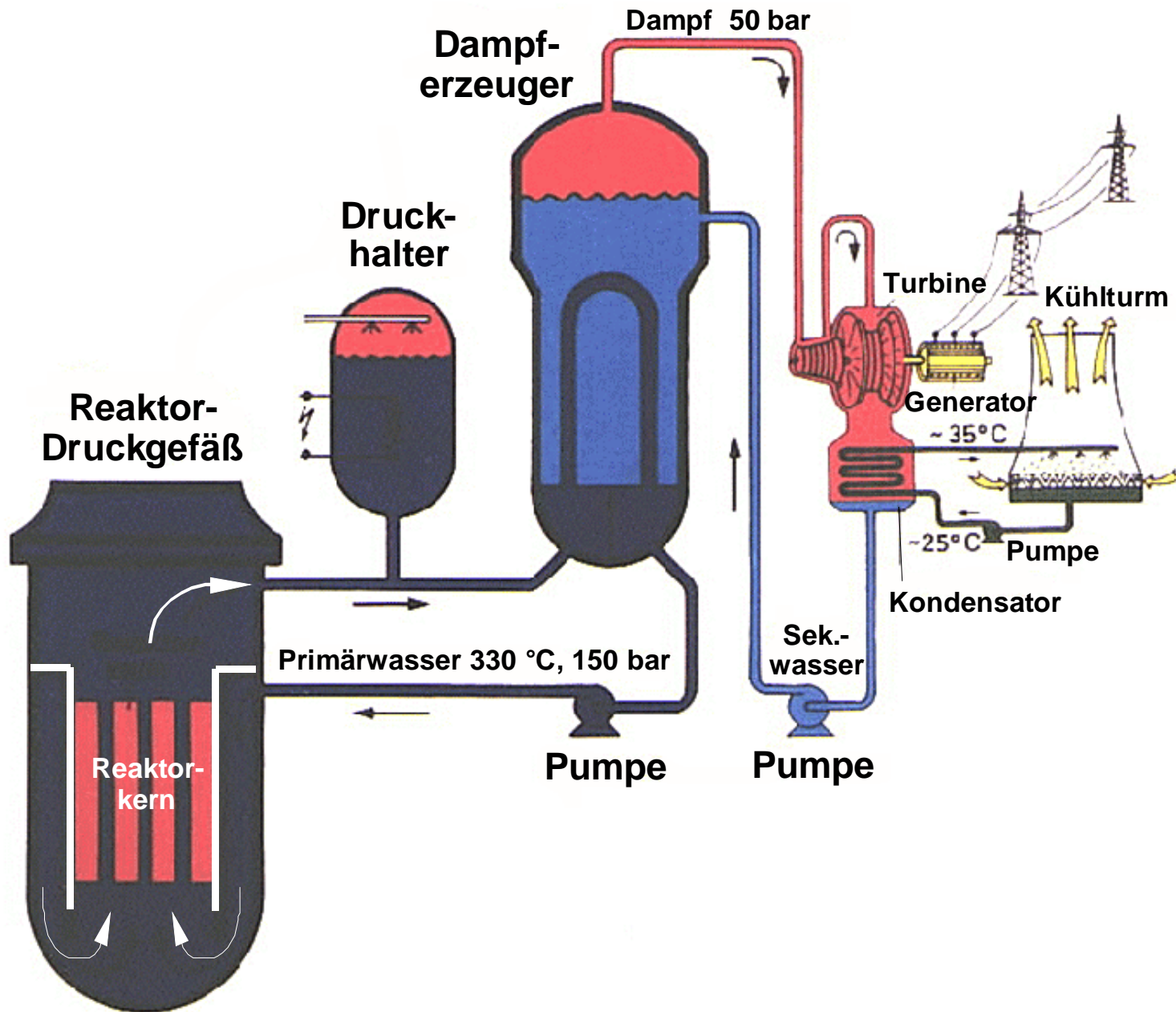
- **Kernbrennstoff**
- **Moderator** (H_2O , D_2O , Graphit, PE)
- **Reaktorgefäß**
- **Reflektor** (H_2O , D_2O , Be, Graphit)
- **Strahlenabschirmung** (Schwerbeton)
- **Regelstäbe** (Cd, B, Hf, Sm)
- **Neutronendetektoren**
- **Neutronenquelle**
(nur bei Forschungsreaktoren
kleiner Leistung)



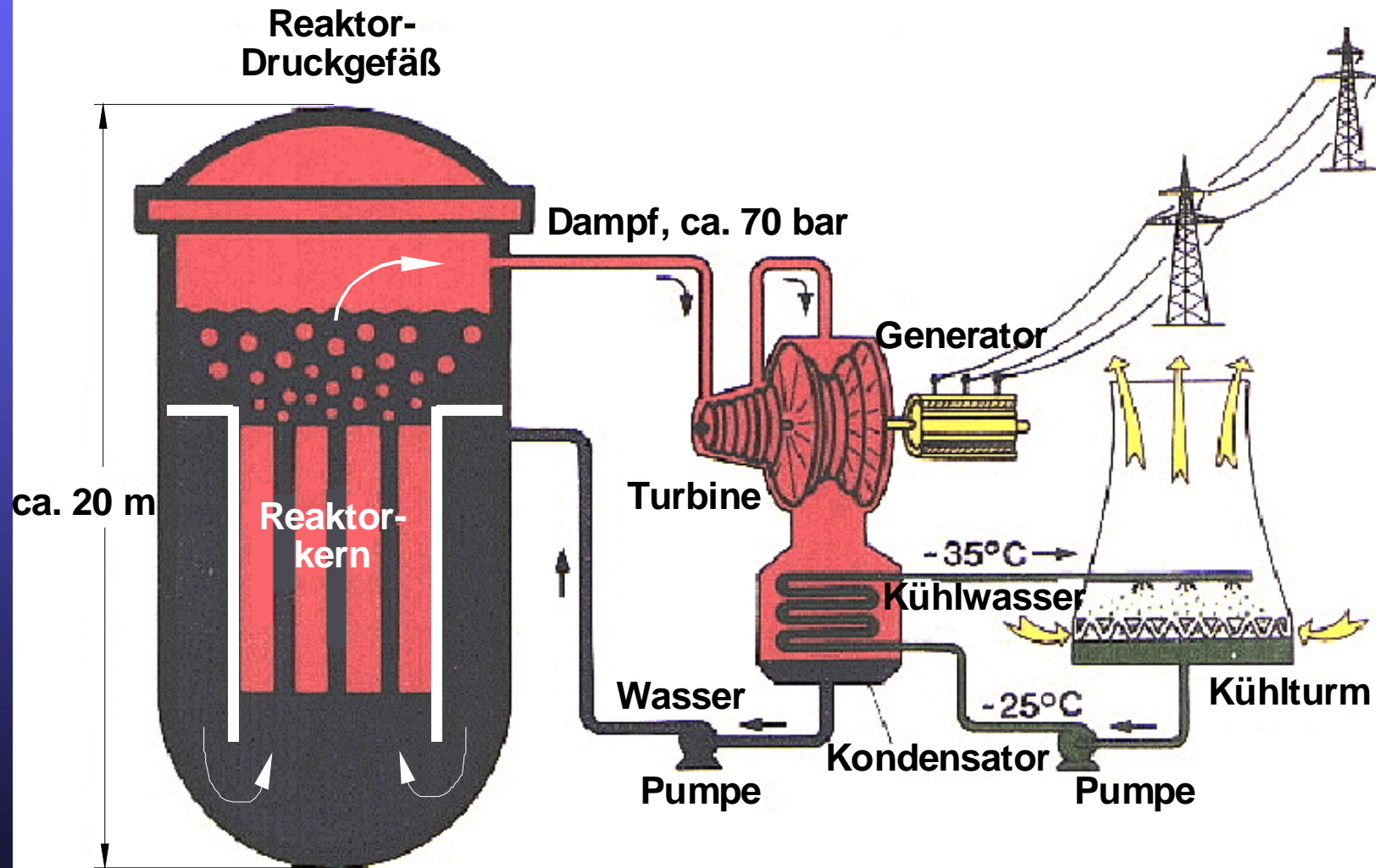
Aufbau des AKR



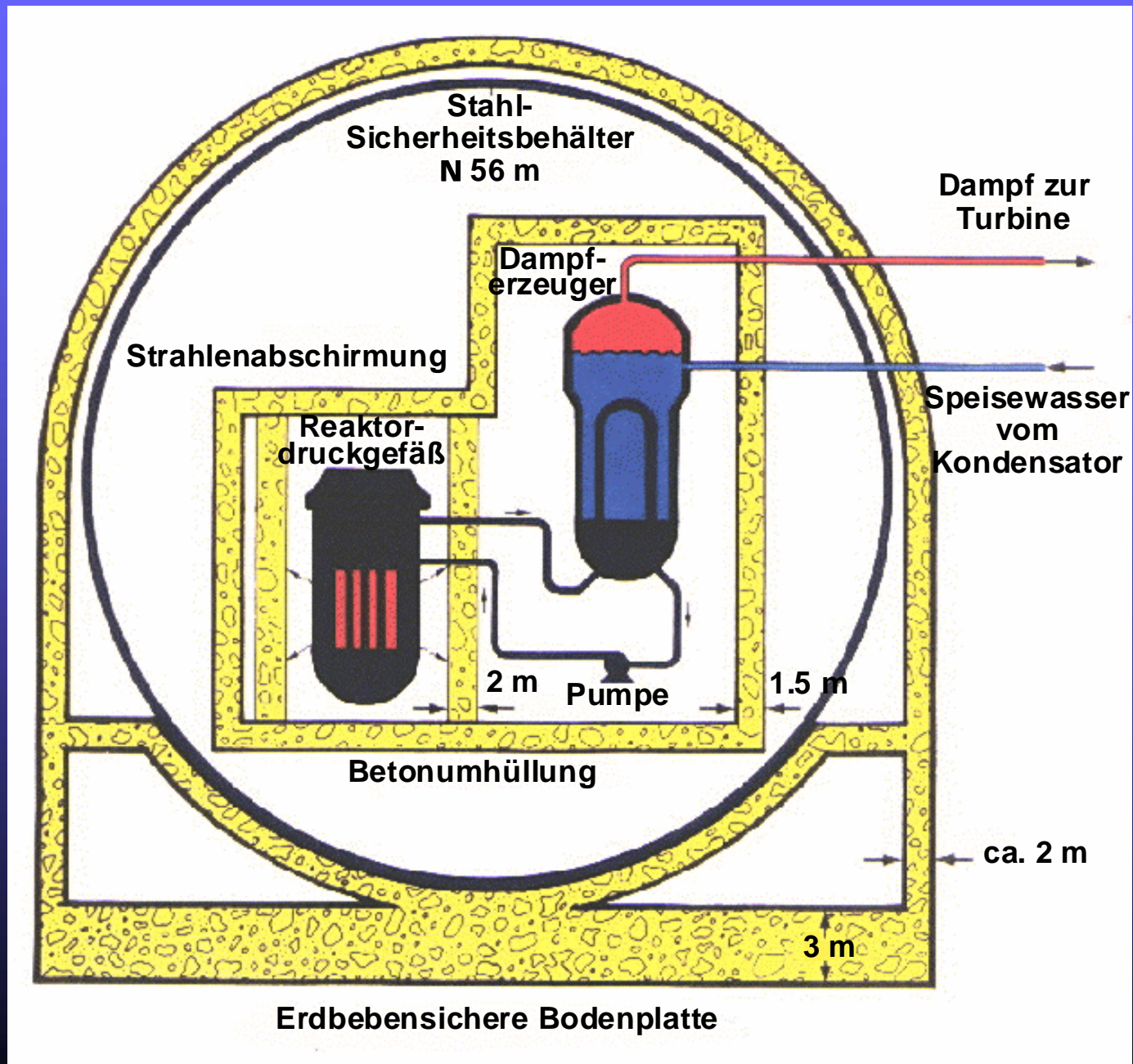
KKW mit Druckwasserreaktor

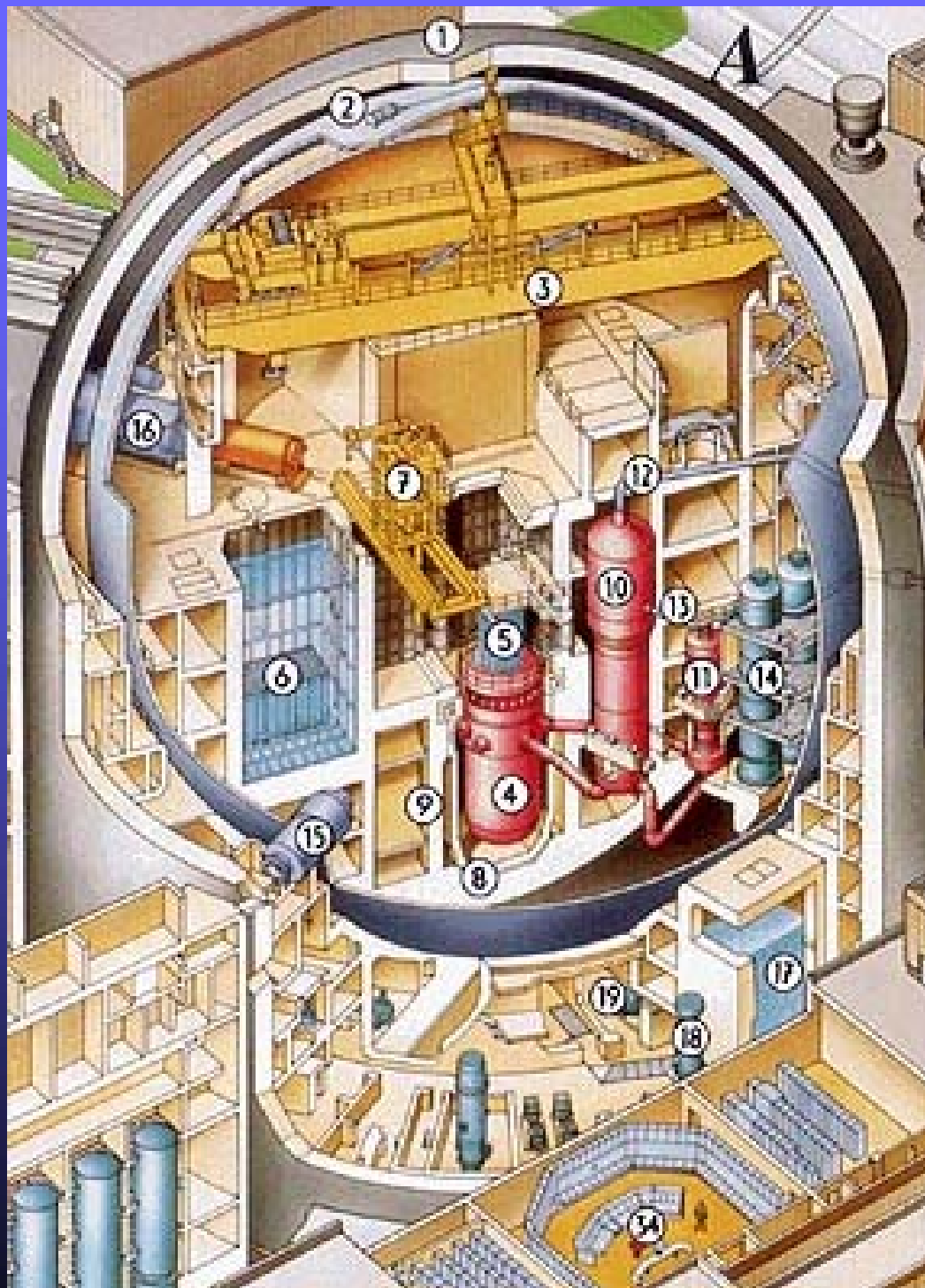


KKW mit Siedewasserreaktor



Sicherheitseinschluss im Containment



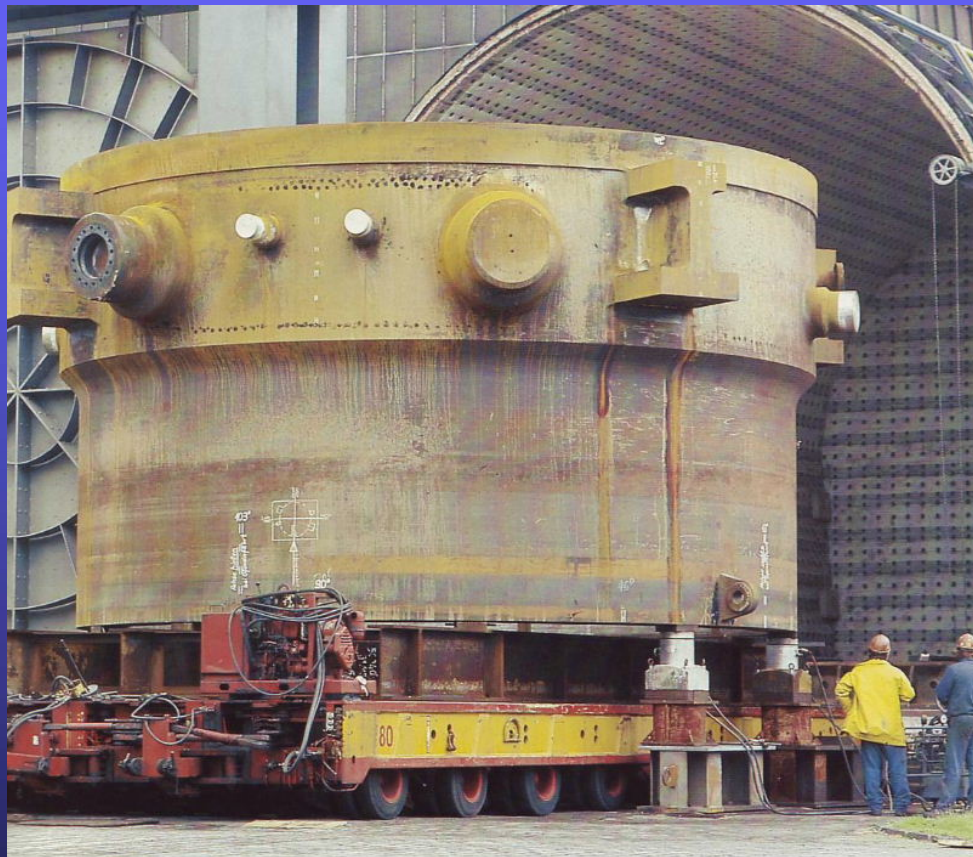


Reaktorgebäude des KKW ISAR 2

- 1 Stahlbetonhülle
- 2 Sicherheitsbehälter
- 3 Reaktorrundlaufkran
- 4 Reaktordruckbehälter
- 5 Steuerstabantriebe
- 6 Brennelementebecken
- 7 Lademaschine
- 8 Innenschild (biologisch)
- 9 Tragschild (biologisch)
- 10 Dampferzeuger
- 11 Hauptkühlmittelpumpe
- 12 Frischdampfleitung
- 13 Speisewasserleitung
- 14 Druckspeicher
- 15 Personenschleuse
- 16 Materialschleuse
- 17 Flutbecken
- 18 Nachwärmekühler
- 19 Sicherheitseinspeisepumpe

Kernkraftwerk Biblis



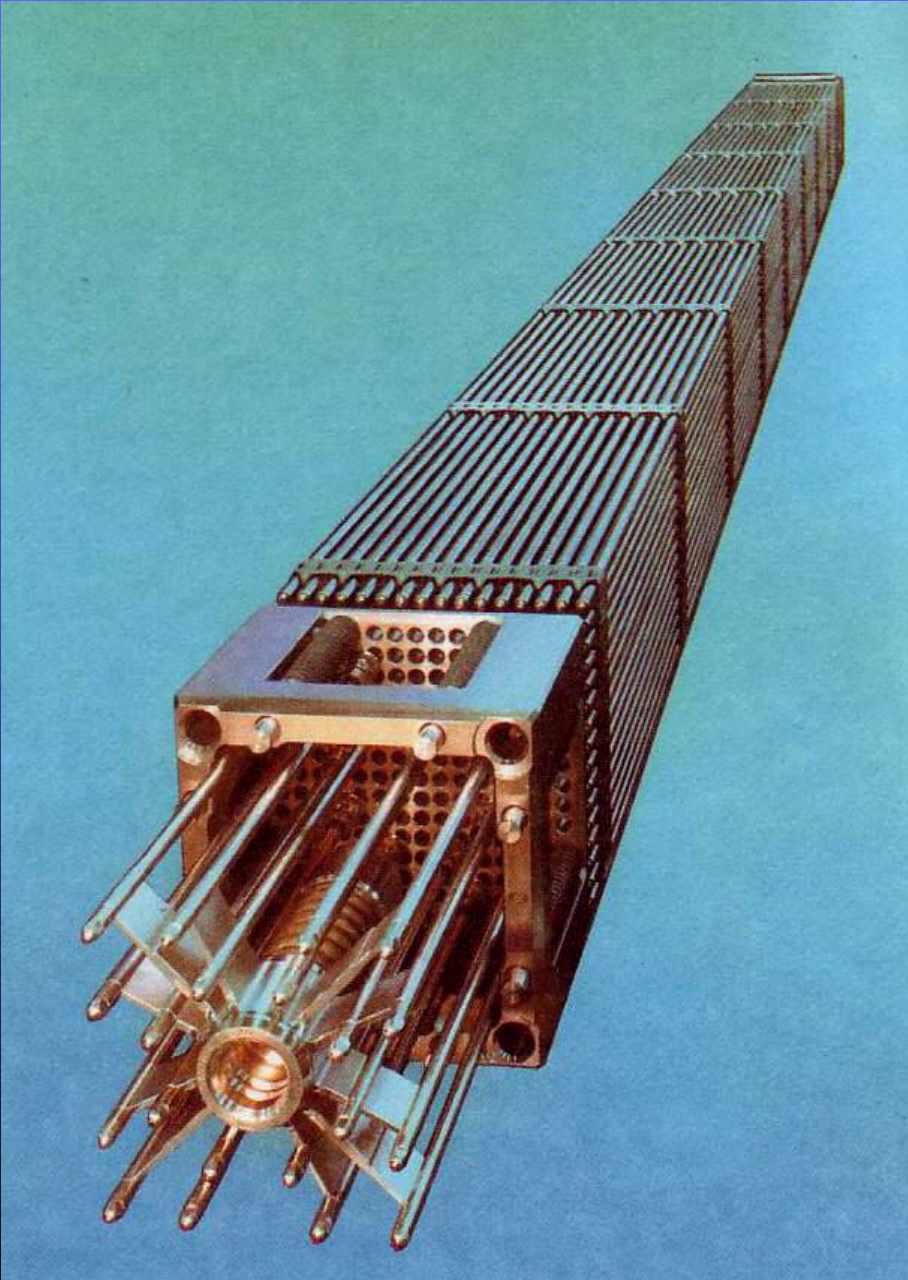


Oberteil



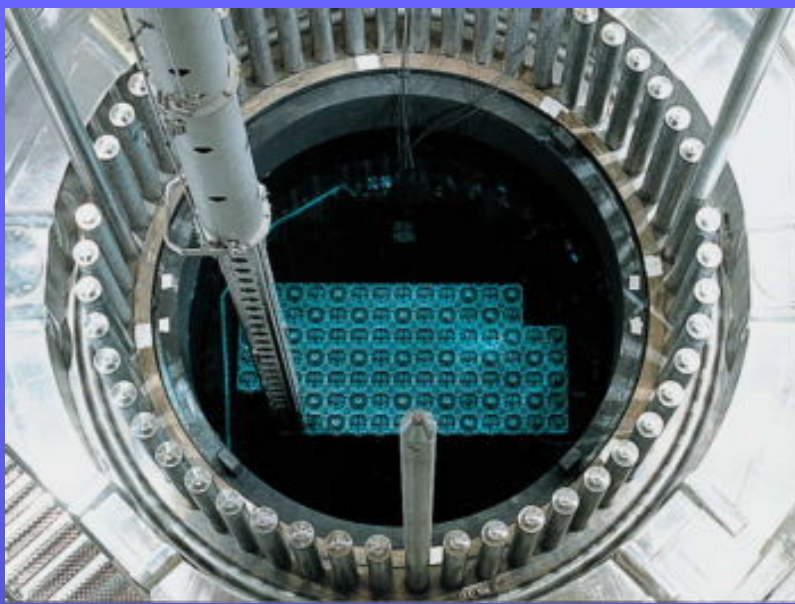
vor dem Einbau

Brennelement eines Druckwasserreaktors

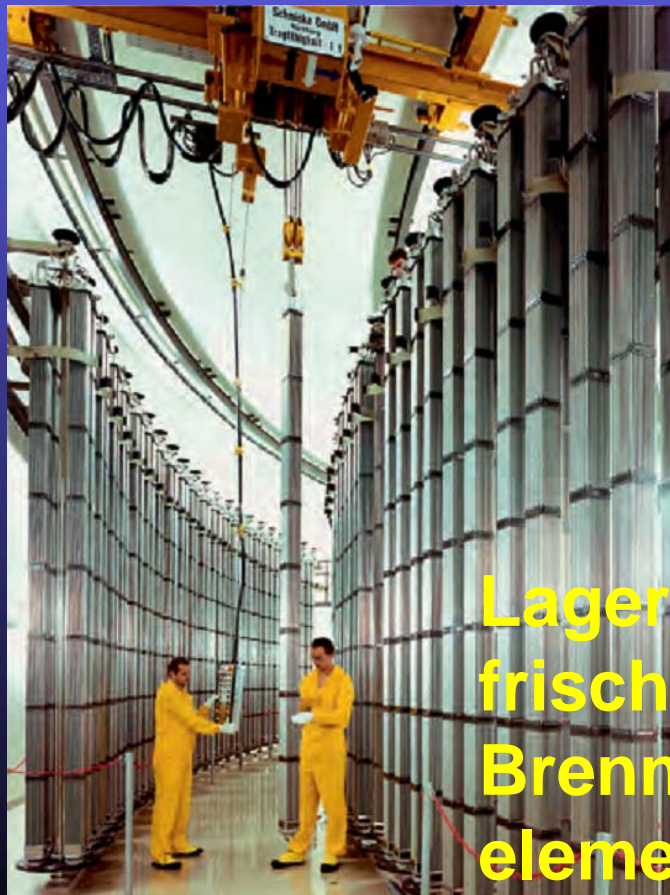
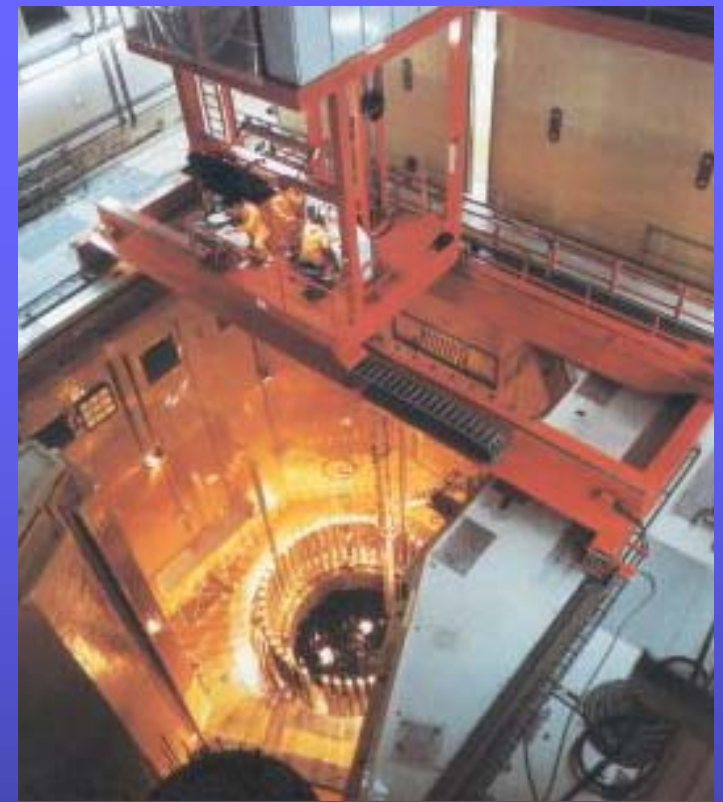


- rechteckiges Stabbündel (16 x 16)
- Grundfläche 23 x 23 cm
- Masse ca. 750 kg
- knapp 5 m Höhe
- 236 Brennstäbe
- zusätzlich 20 Steuerstäbe (Cd)
- im Reaktor (z.B. Biblis A)
befinden sich 193 dieser BE,
d.h. 193 x 236 ~ 45500 Brennstäbe
- das sind 99,2 t Urangewicht

Quelle: Robert Gerwin, So ist das mit der Kernenergie,
Econ-Verlag Düsseldorf/Wien, 1978



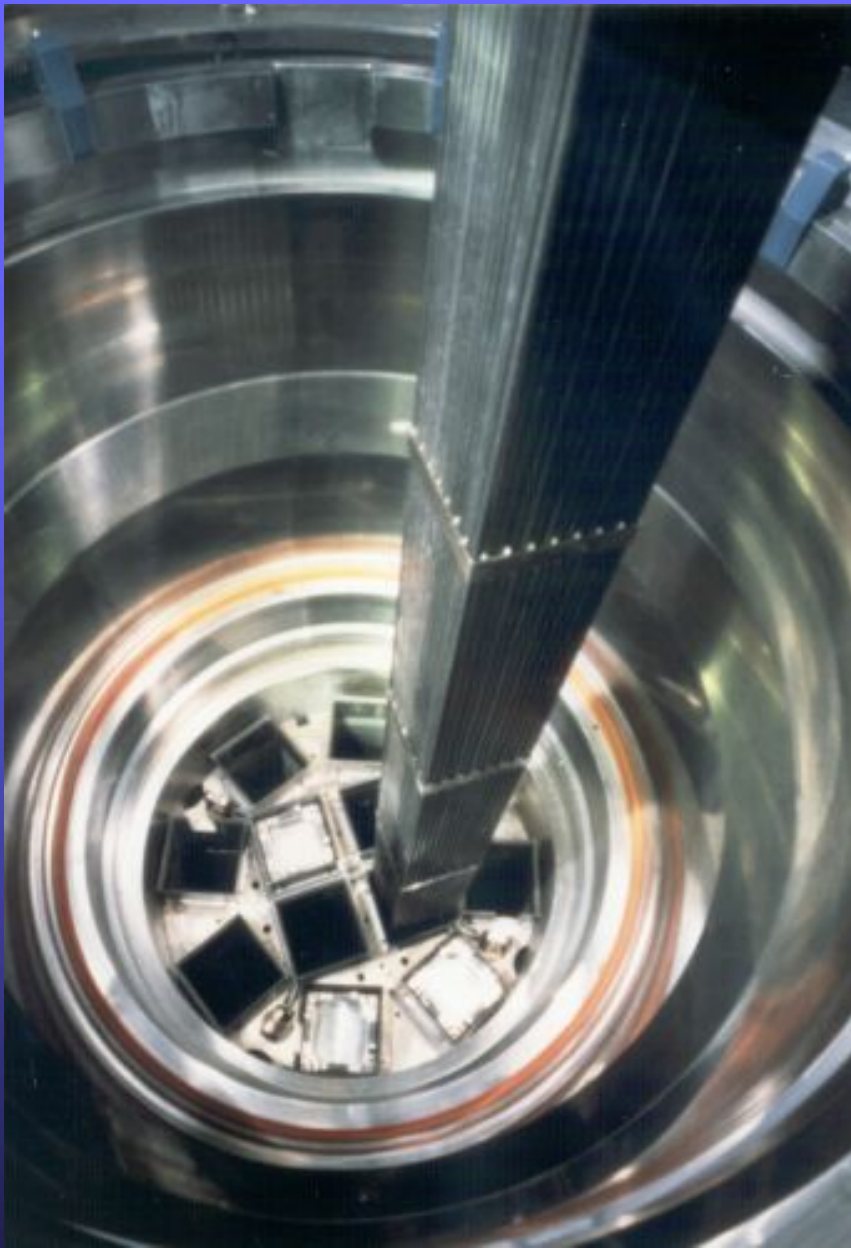
**Umladung
von Brenn-
elementen**



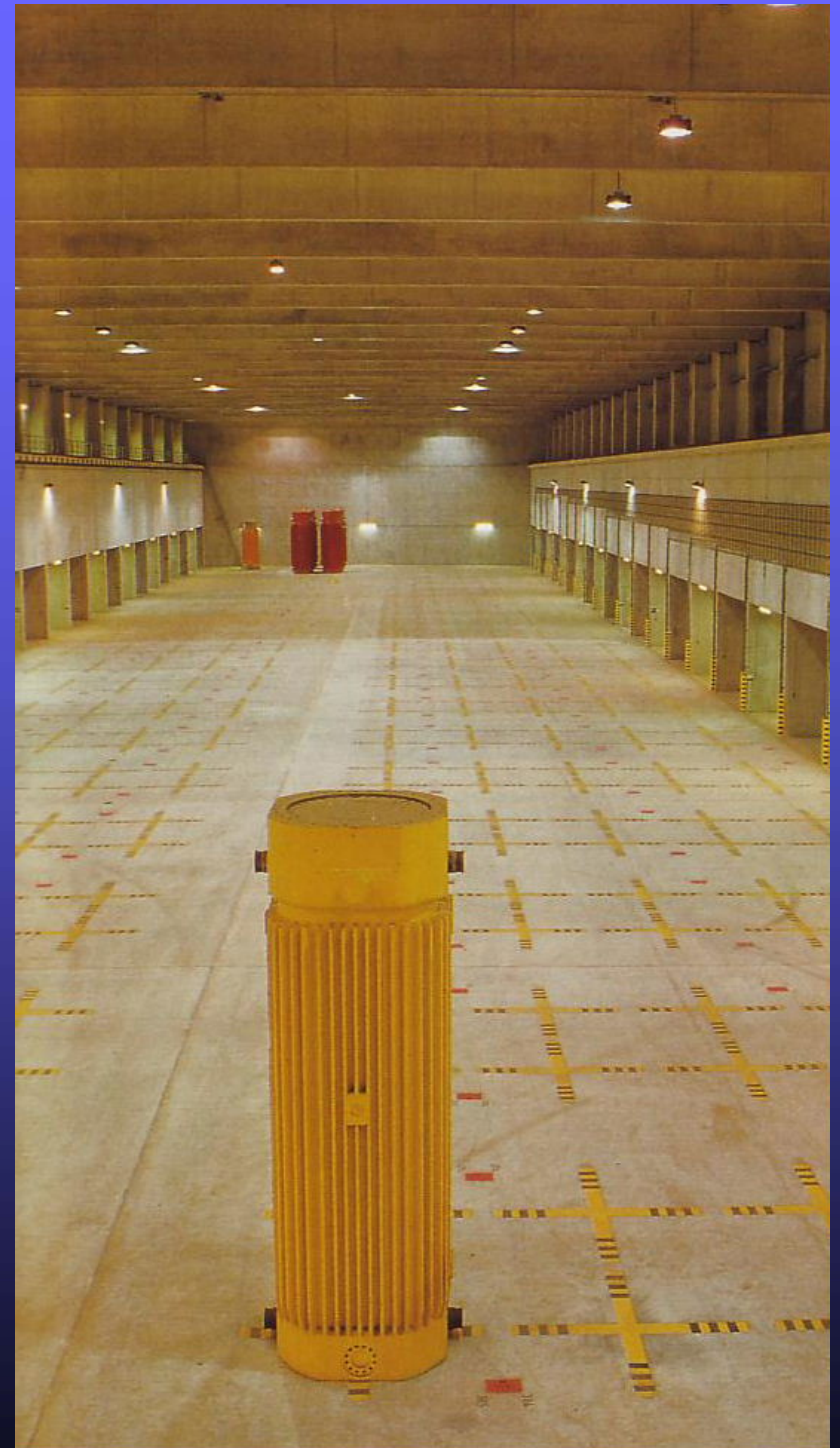
**Lager für
frische
Brenn-
elemente**

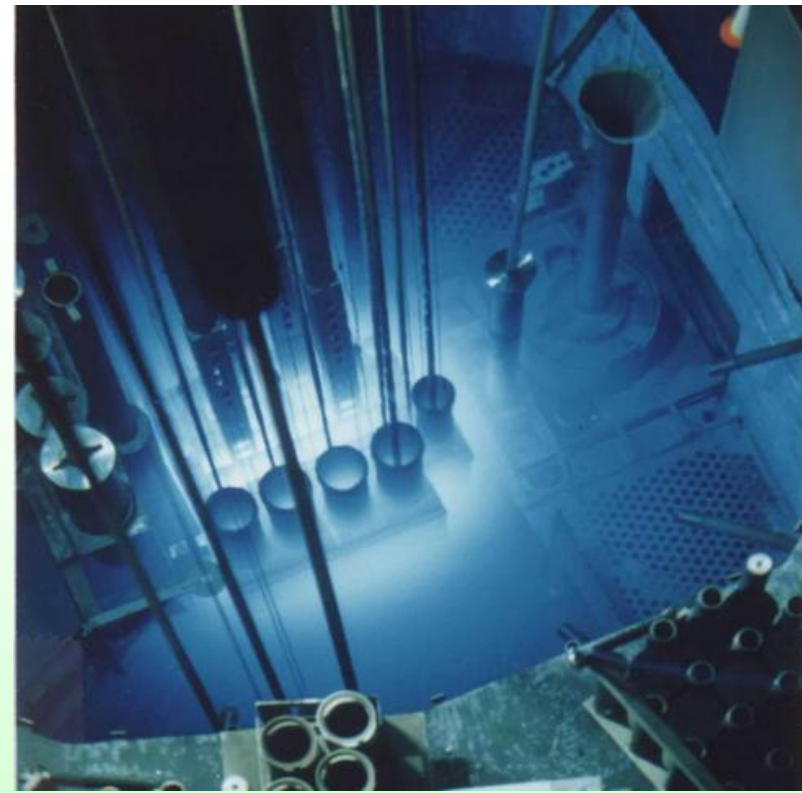


Abklingbecken

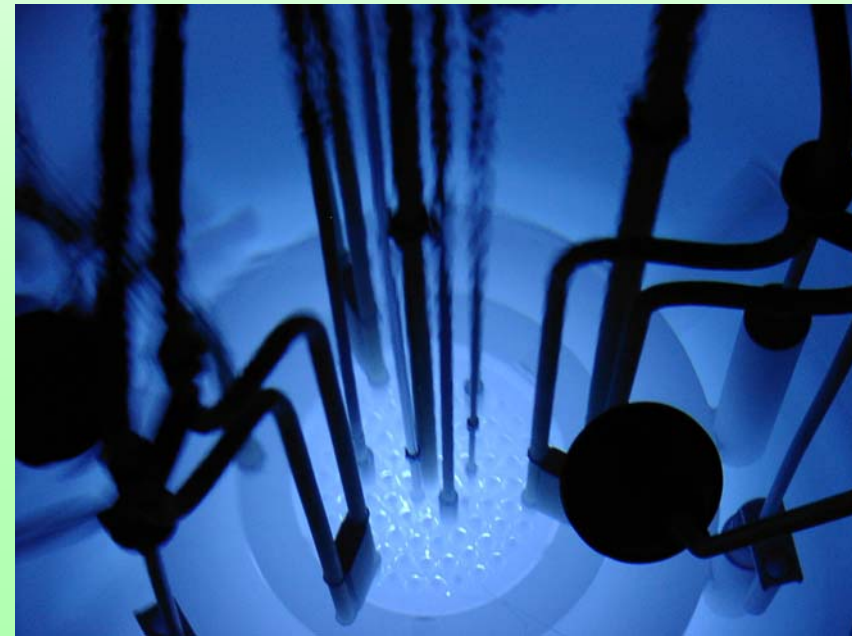


**CASTOR-Behälter mit
abgebrannten Brennelementen**





Faszination
des
 γ
Čerenkov-
Effektes



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

