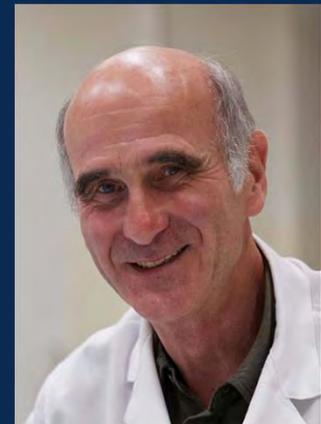


Studium generale

Einführung zum Kernreaktorpraktikum

Prof. Dr. rer. nat. W. Hansen



Oktober 2022



DRESDEN
concept
Exzellenz aus
Wissenschaft
und Kultur

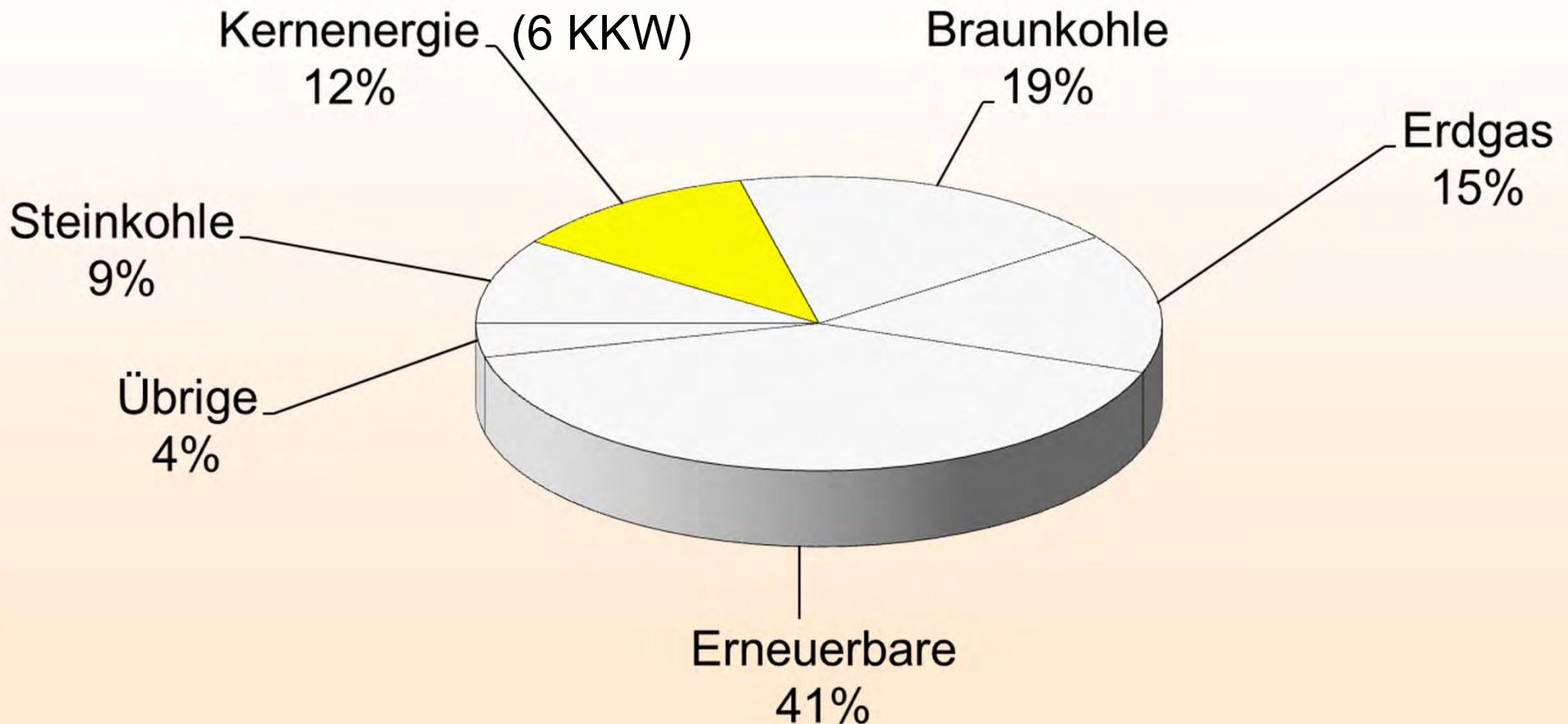
Kernenergetik

- Kernenergienutzung
- Kernspaltung
- Kettenreaktion im Kernreaktor
- Kernkraftwerke

Welche Bedeutung hat die Kernenergie ?

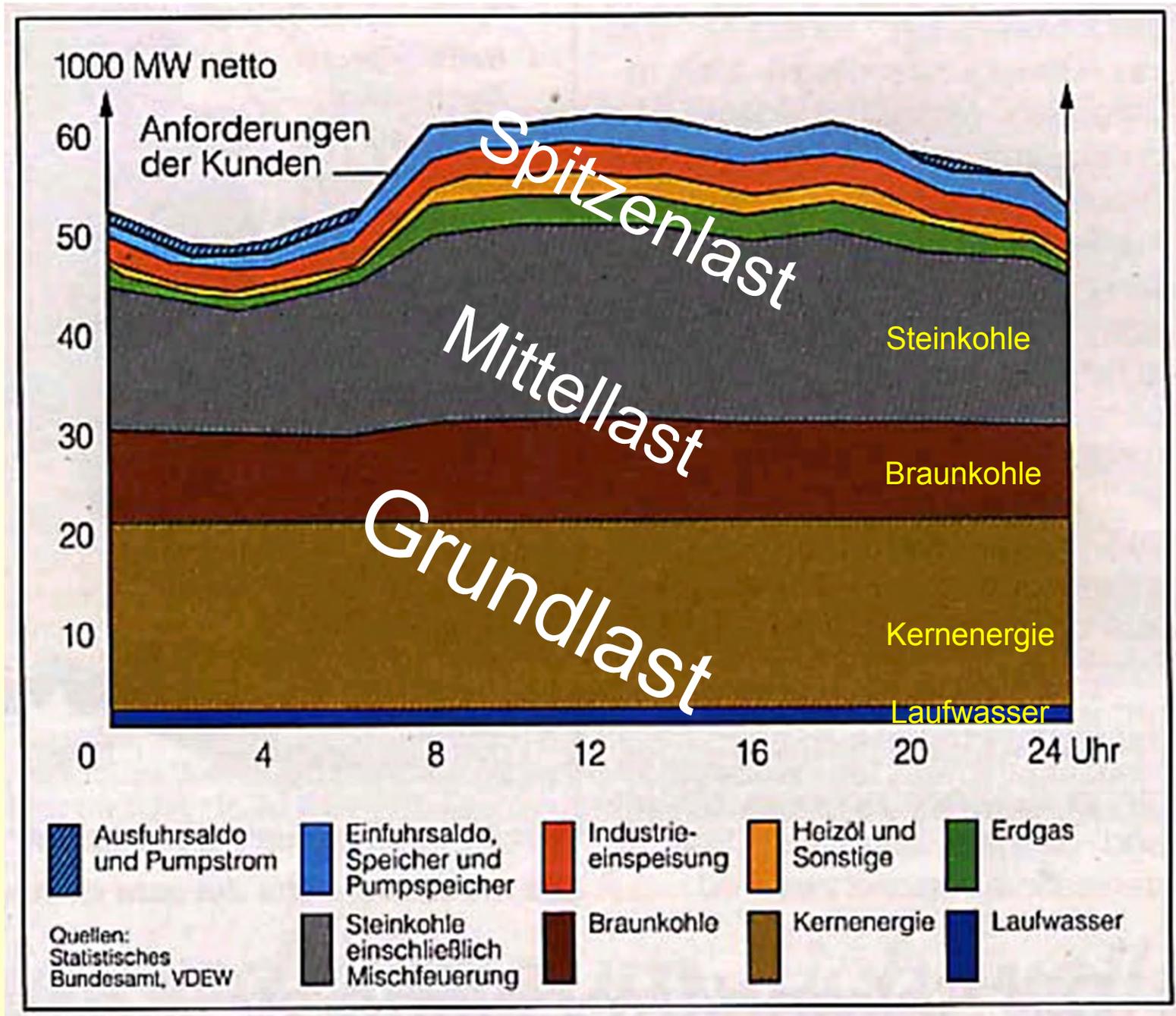
- *in Deutschland*
- *in Europa*
- *weltweit*

Anteile der Energieträger an der Bruttostromerzeugung im Jahr 2021 in Deutschland

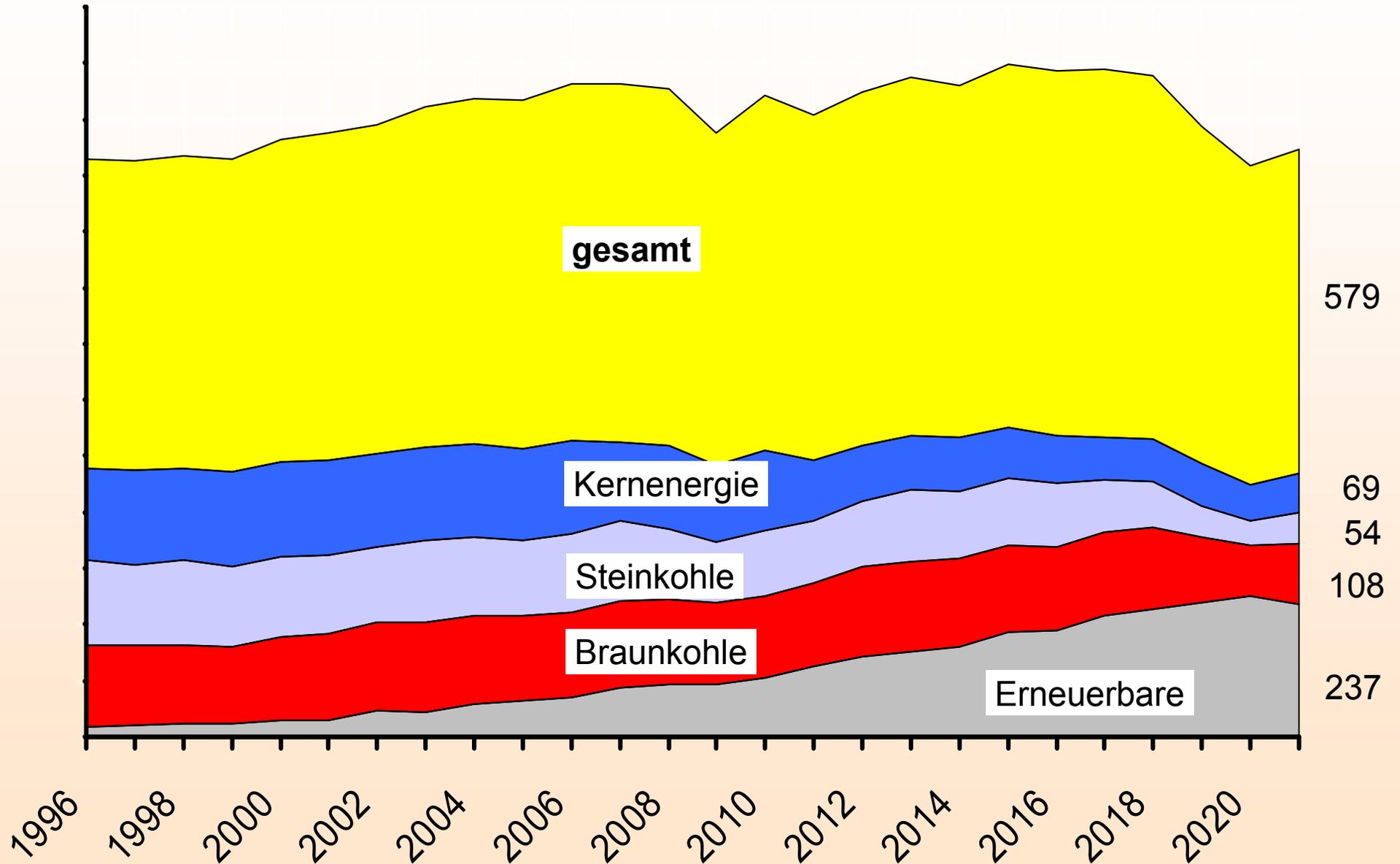


Kernenergie für die Grundlastsicherung 2018: 32 % !
(Rest: Braunkohle 61 %, Laufwasser 7 %)

Lastverteilung



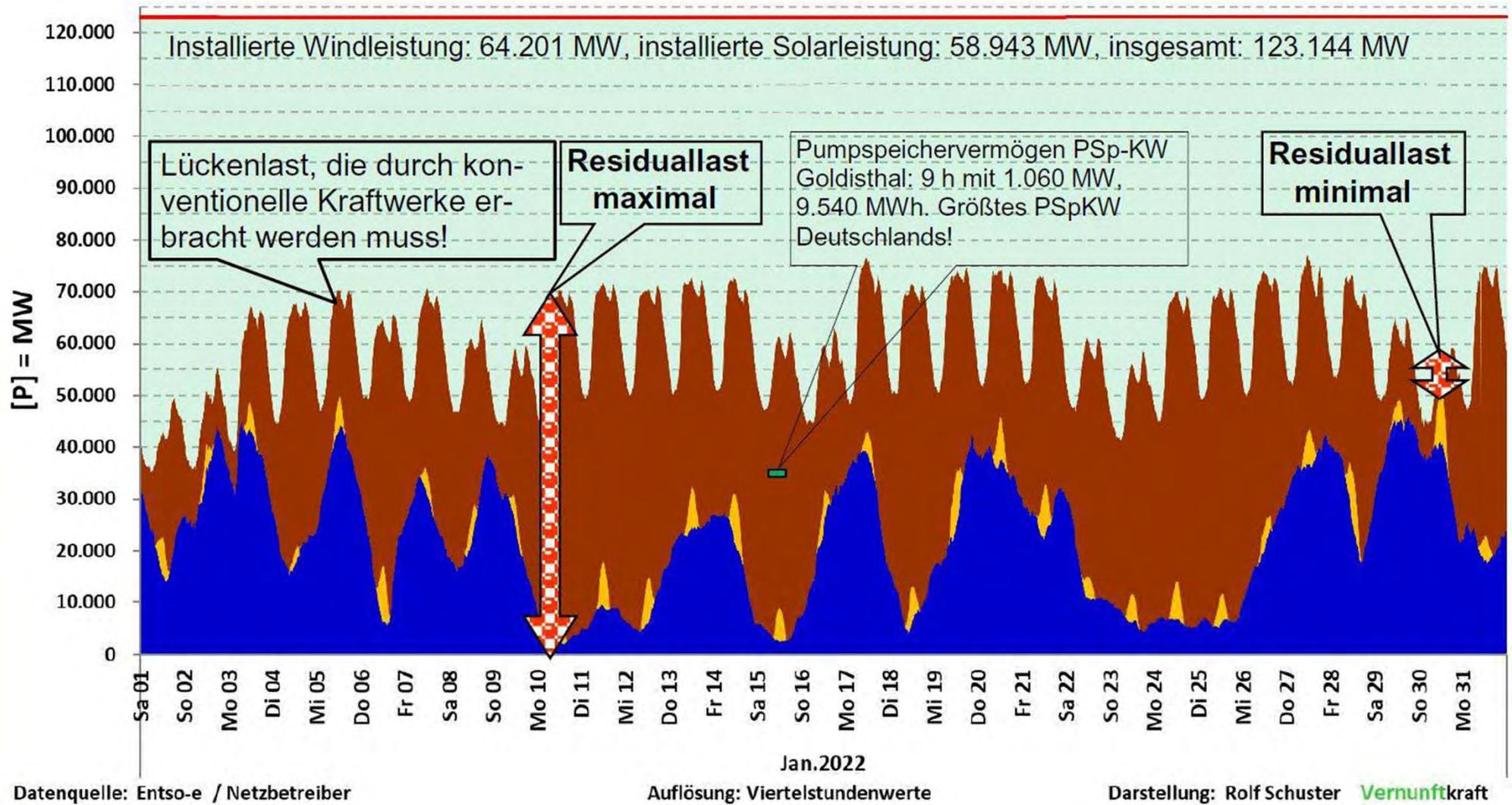
Elektroenergieerzeugung (absolut *) in Deutschland (in Mrd. kWh)



Elektroenergiebilanz Januar 2022

inst.Leistung Wind+Solar
Wind + Solar Einspeisung ist

Load = Verbrauch (Entsoe)
Windenergie Einspeisung Ist



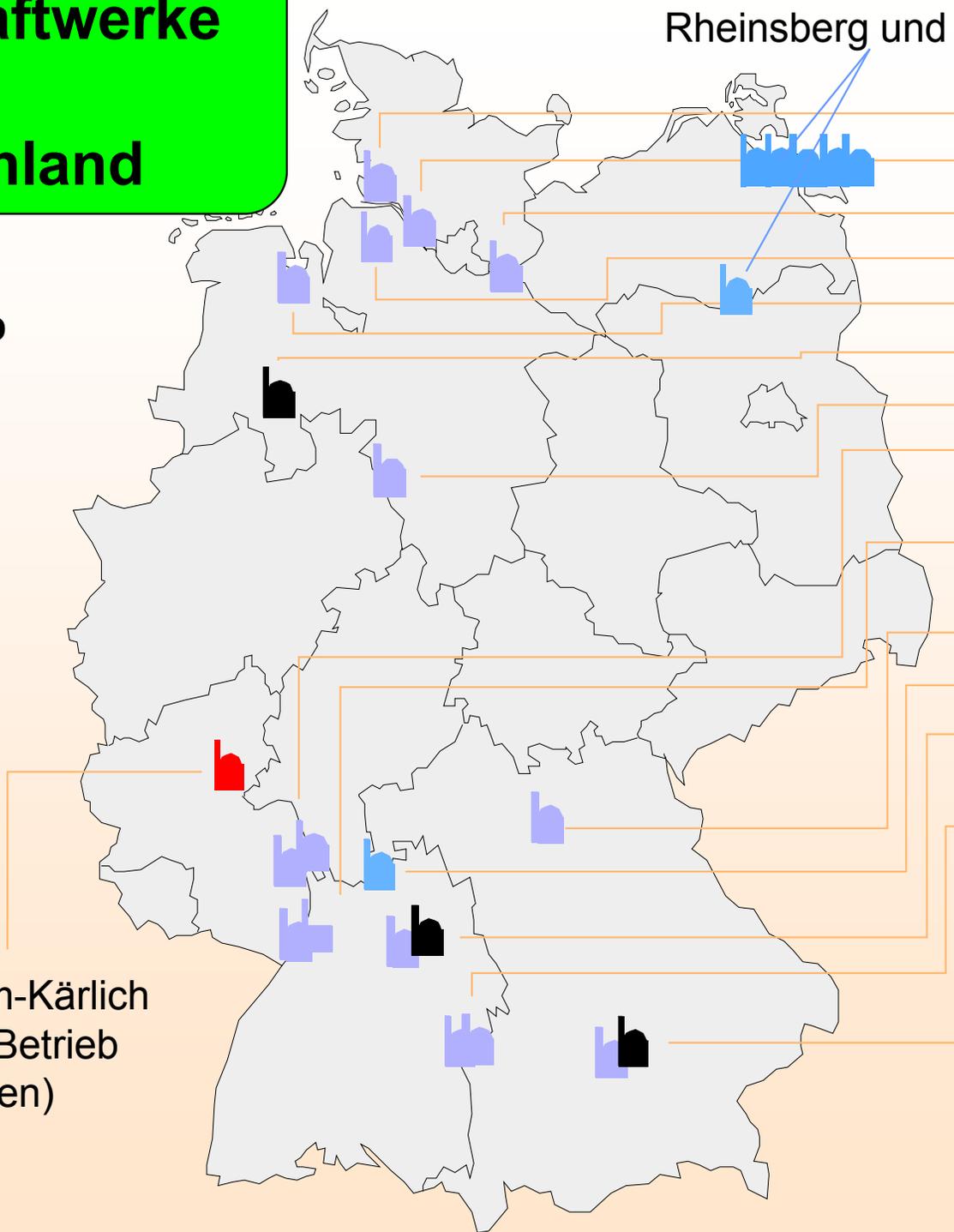
größtes Batterie-Energiespeichersystem (BESS) Jardelund/D liefert voll aufgeladen 50 **MWh** Energie (2:18 min Betrieb von 1300 MW Kraftwerk), aber für 5 Tage würden bei ca. 55 GW Bedarf benötigt: $55 \text{ GW} \times 24 \text{ h/d} \times 5 \text{ d} = 6.600 \text{ GWh} = 6,6 \text{ TWh}$ (5 Größenordnungen mehr !)

Kernkraftwerke in Deutschland

3 KKW
in Betrieb

Mühlheim-Kärlich
(nicht in Betrieb
genommen)

Rheinsberg und Lubmin nach 1990 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

Standort, Alter und
Inbetriebnahmejahr,
(vorauss.) Abschaltung

Kernkraftwerke in Europa

→ 171 Reaktoren in Kernkraftwerken in Betrieb

(Stand: 31.12.2021)

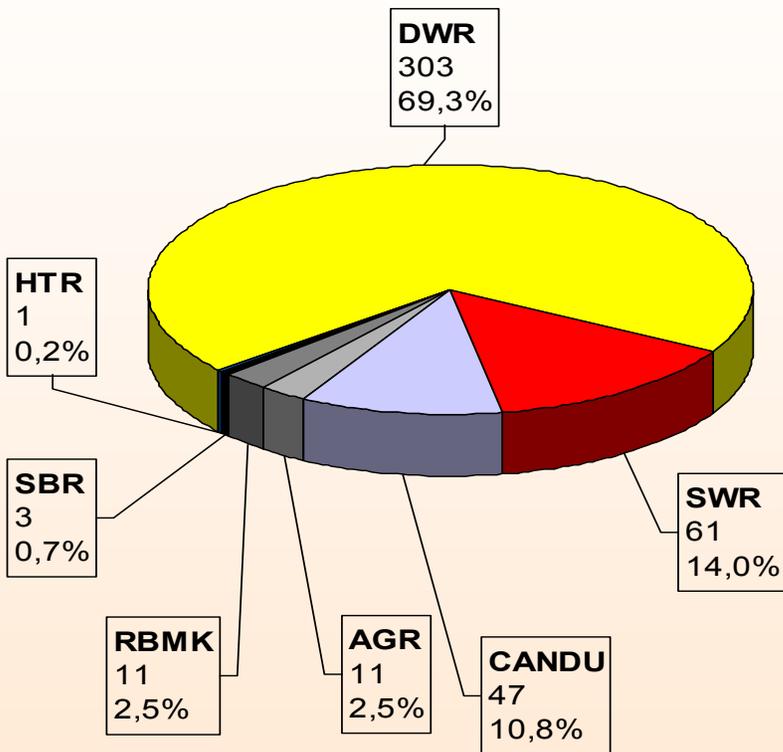
Gesamtanteil der Kernenergie^{*)}

in (West-)Europa → 22 %

in (Ost-)Europa → 24 %

Land	Prozentsatz Kernenergie	Zahl der KKW-Blöcke
Frankreich	69 %	56
Ukraine	55	15
Slowakei	52	4
Belgien	51	7
Ungarn	47	4
Tschech. Rep.	37	6
Slowenien	37	1
Bulgarien	35	2
Finnland	33	4
Schweden	31	6
Schweiz	29	4
Spanien	21	7
Russland	20	37
Rumänien	19	2
Großbritannien	15	12
Deutschland	12	3
Niederlande	3	1

Kernkraftwerke weltweit



Land	Anzahl	Nettoleistung [MW _{el}]	(% nukl.)
Argentinien	3	1.641	7
Armenien	1	448	25
Belarus	1	1.110	14
Belgien	7	5.942	51
Brasilien	2	1.884	2
Bulgarien	2	2.006	35
China	53	50.034	5
Deutschland	3	4.055	12
Finnland	4	2.794	33
Frankreich	56	61.370	69
Großbritannien	12	7.343	15
Indien	22	6.795	3
Iran	1	915	1
Japan	33	31.679	5
Kanada	19	13.624	14
Korea (Süd)	24	23.091	27
Mexiko	2	1.552	3
Niederlande	1	482	3
Pakistan	5	2.242	11
Rumänien	2	1.300	19
Russland	37	27.727	19
Schweden	6	6.882	31
Schweiz	4	2.960	30
Slowakische Republik	4	1.868	52
Slowenien	1	688	37
Spanien	7	7.121	21
Südafrika	2	1.854	3
Taiwan	3	2.859	10
Tschechische Republik	6	3.934	37
Ukraine	15	13.107	55
Ungarn	4	1.916	45
USA	93	95.523	20
Vereinigte Arab. Emirate	2	2.762	1
Summe (2021: 33 Länder)	437	389.508	

2021: - **10 %** an Gesamtstromerzeugung*)
 - **4 KKW** weniger gegenüber Vorjahr
 (6 Inbetriebnahmen / 10 Stilllegungen)
 - **56 KKW in Errichtung** in 19 Ländern
 (neu 2021: 6x China, je 1x Indien, Türkei, Russland)

Quelle: IAEA, Nuclear Power Reactors in the World, Juni 2022 (Stand 31.12.2021)

*) IAEA, Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates up to 2050, Sept. 2022 (Stand 31.12.2021)

Vorzüge der Kernenergie:

- **hohe Energiedichte des Urans**
(geringe Brennstoff- und Abfallvolumina)
- **Energie"produktion"**
ohne CO₂ - Freisetzung → klimaschonend
- **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 ≈ 1 MWd

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

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

≈ 1 t U-235-Verbrauch/Jahr

≈ 1 t Spaltprodukte

≈ 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

***Jährlicher
Brennstoffbedarf
für ein Kraftwerk
mit 1300 MW
elektr. Leistung***

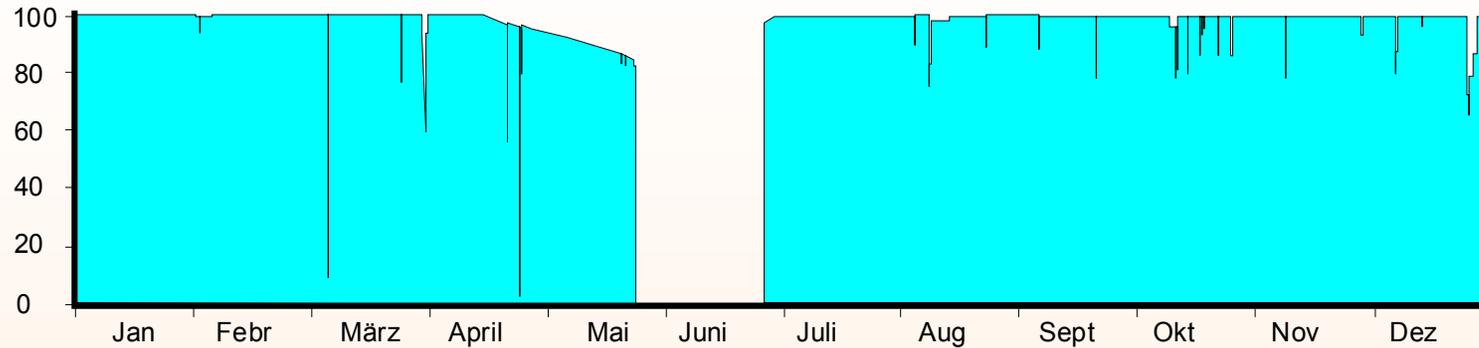


35 t Uran (UO₂)
auf 3.2 % angereichert
3.2 m³

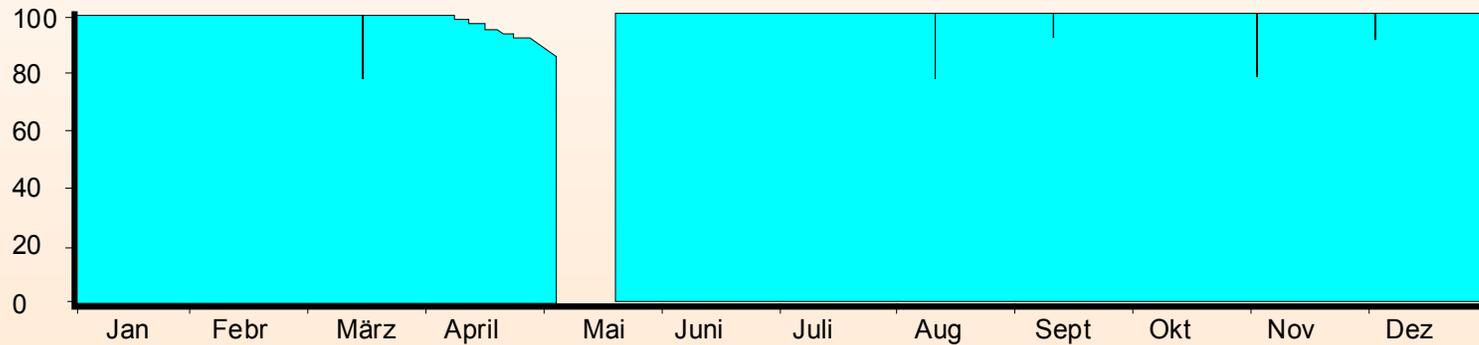


Betriebsabläufe in deutschen Kernkraftwerken 1998

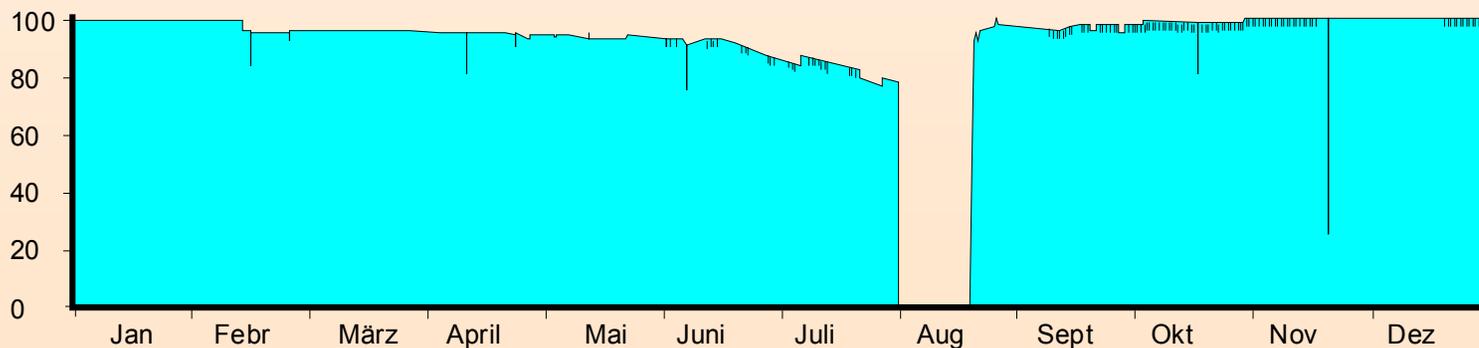
Elektrische Leistung in Prozent



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 %

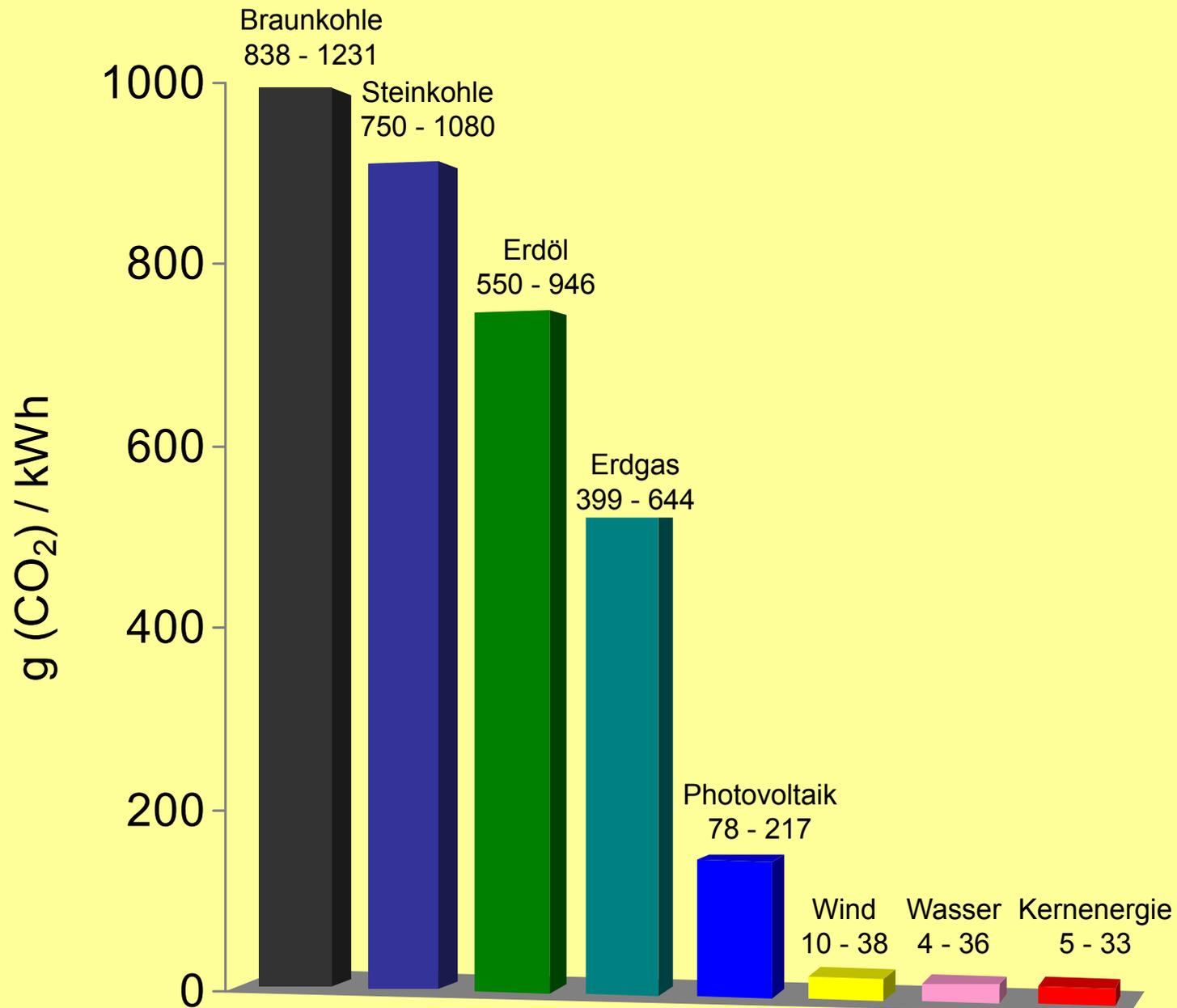
11 %

11 %

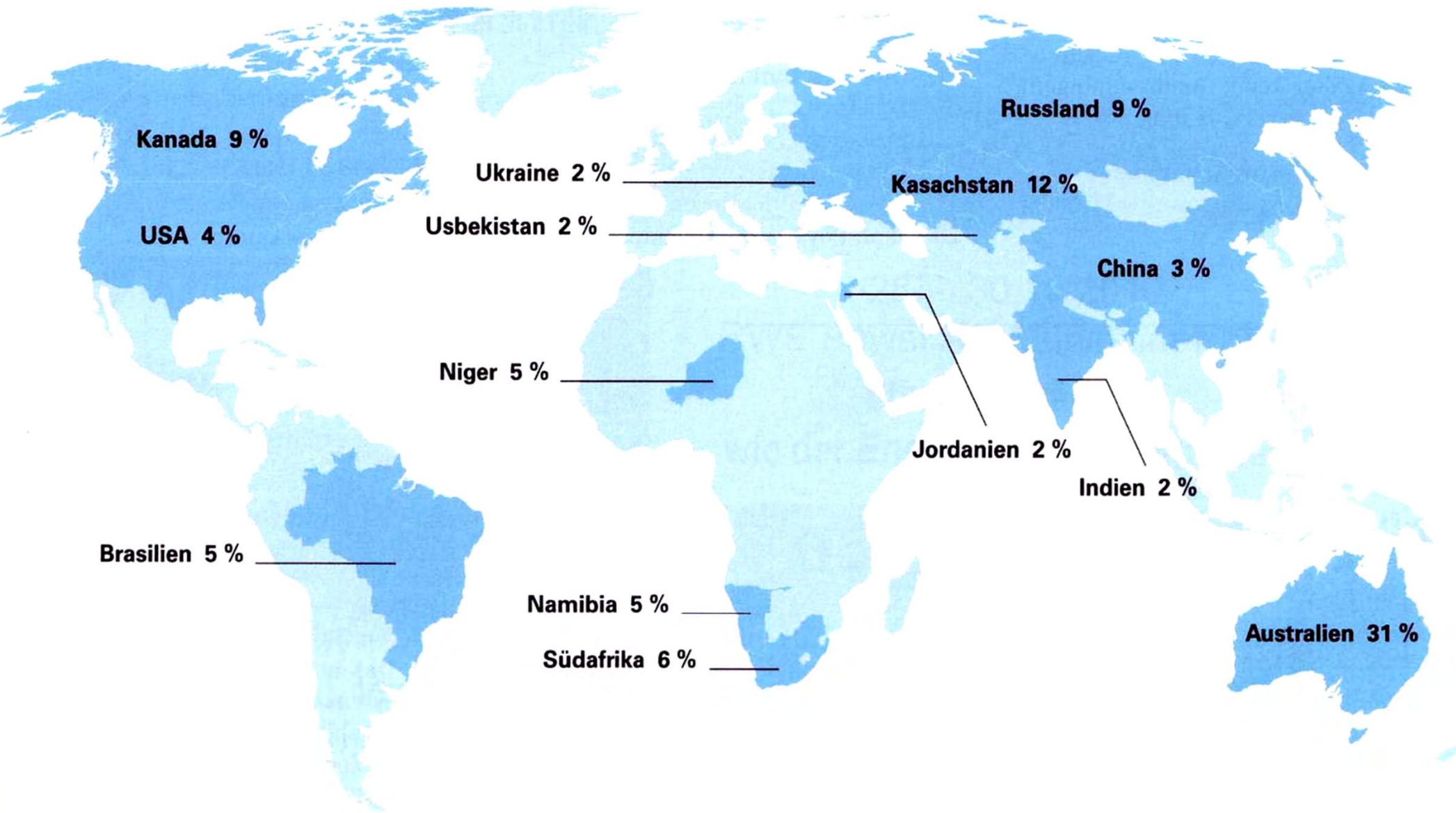
Resultat: mit dem Ausstieg aus der Kernenergie werden die Kraftwerke mit der höchsten Verfügbarkeit und Versorgungssicherheit abgeschaltet

Treibhausgas-Emissionen

Energieträger mit Lebenszyklus-Analyse



Weltweite Verteilung der Uranressourcen 2009



Förderwürdigkeit bis 130 US-\$ pro kg Natururan

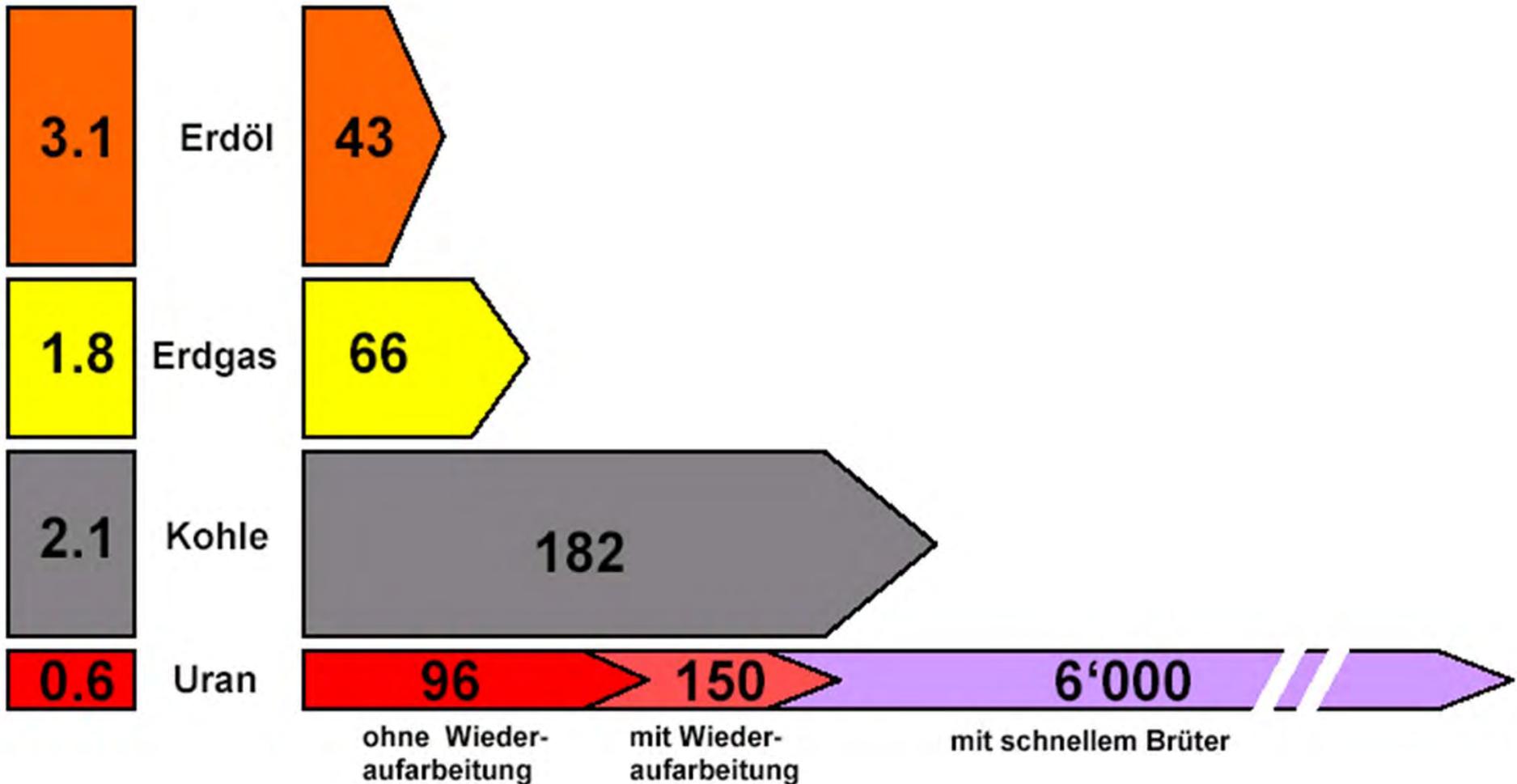
(97 % der Reserven in gezeigten 14 Staaten, restl. 3 % verteilen sich auf 19 weitere Staaten)

Reichweiten verschiedener Energieträger

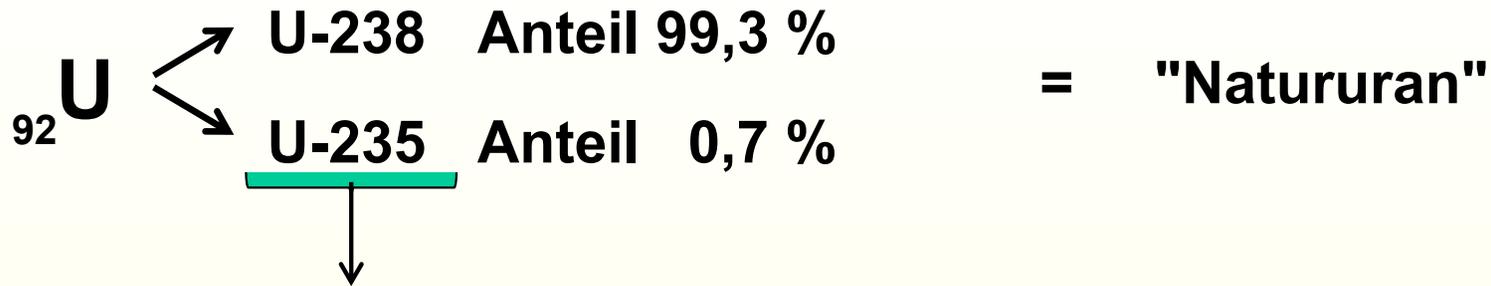
Verbrauch
in Mrd. toe
pro Jahr (1997)

Reichweite
in Jahren

Quelle: WEC 1998



Kernbrennstoff Uran



in den meisten Reaktoren nur **U-235** als Spaltstoff verwendbar, Anteil aber zu gering → **Anreicherung notwendig**: je höher die Anreicherung, desto "besser funktioniert der Reaktor"

<u>Anreicherungsgrade</u>	
in Kraftwerksreaktoren	2 - 5 %
in Forschungsreaktoren	bis 98 %
im AKR	19,8 %

aber: hoch angereichertes Uran-235 kann waffentauglich sein !

→ Atomwaffensperrvertrag soll missbräuchliche Verwendung verhindern

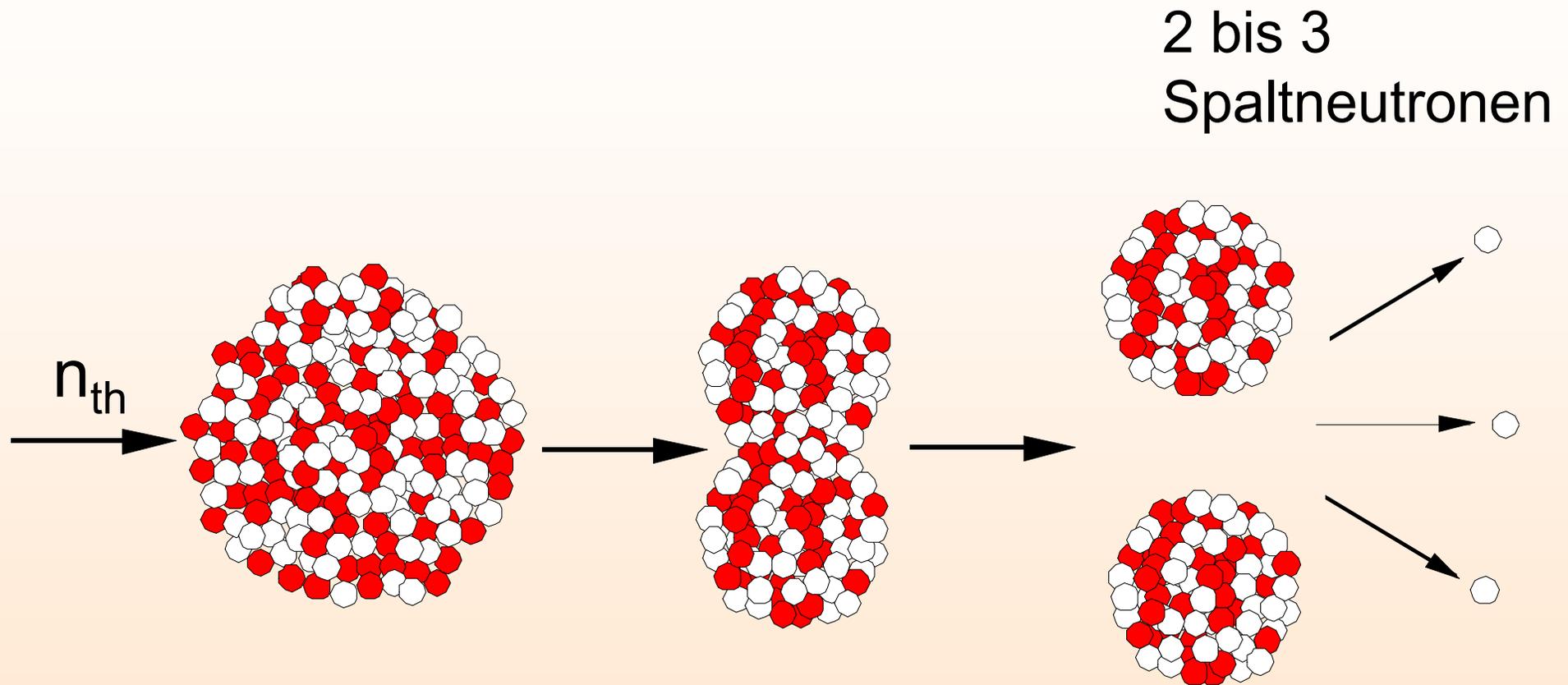
2 Wege: - hoch angereichertes Uran gar nicht verwenden,
- wenn es (für friedliche Zwecke) notwendig und sinnvoll ist, muss es kontrolliert werden (Safeguards-Kontrolle durch IAEA)

Definition von 2 Kategorien angereicherten Urans:

- **LEU (Low Enriched Uranium)** < 20% nicht waffentauglich
- **HEU (Highly Enriched Uranium)** ≥ 20 % (potentiell) waffentauglich
(real erst oberhalb ca. 80 %)

Konsequenz: zur friedlichen Nutzung nur LEU verwenden,
wenn immer es physikalisch und technisch möglich ist !

Kernspaltung



2 bis 3
Spaltneutronen

Spaltstoff:

U-235

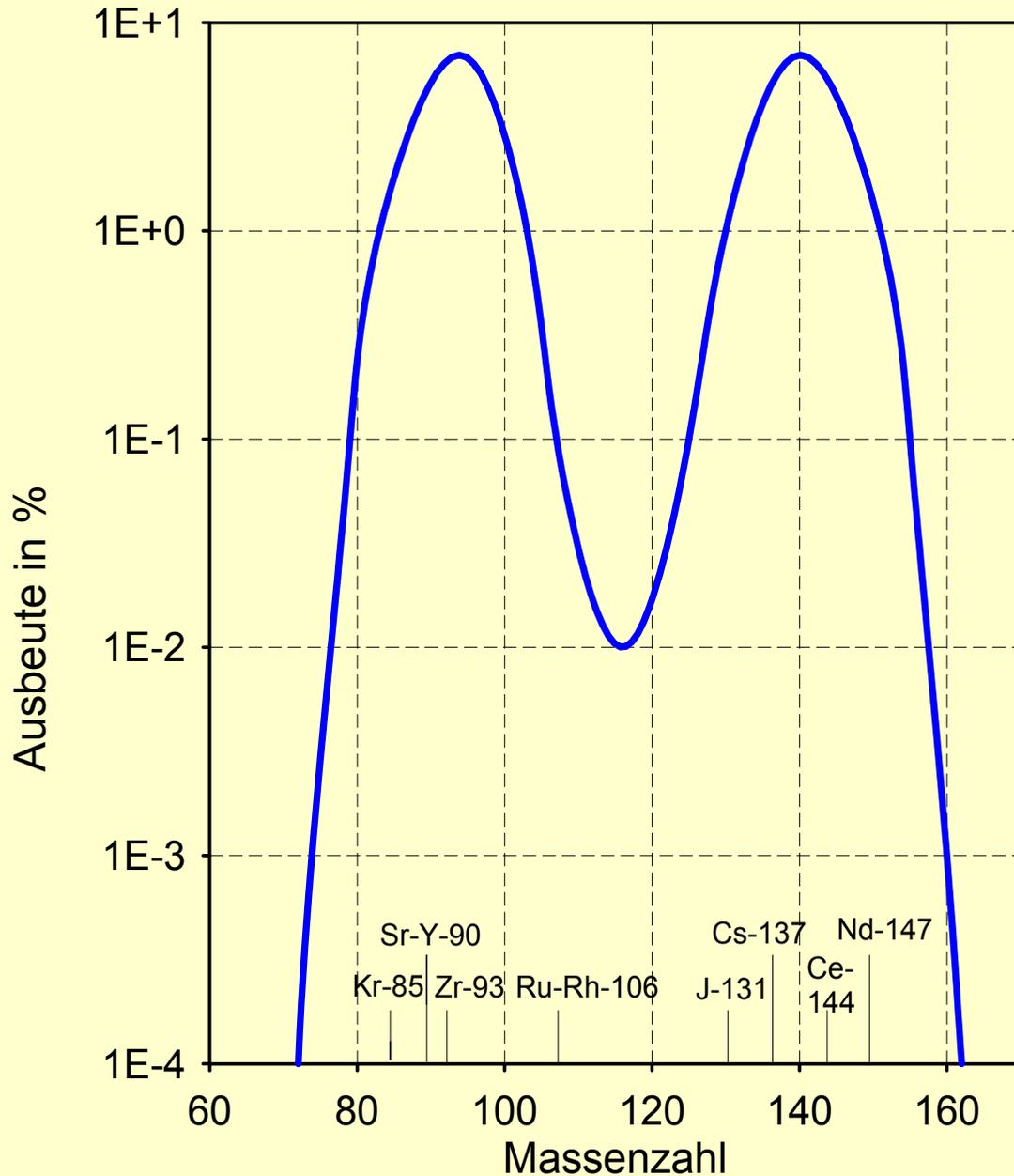
Pu-239 (aus U-238)

U-233 (aus Th-232)

U-236

2 Spalt-
bruchstücke

Spaltproduktverteilung



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

Energiefreisetzung bei der Kernspaltung

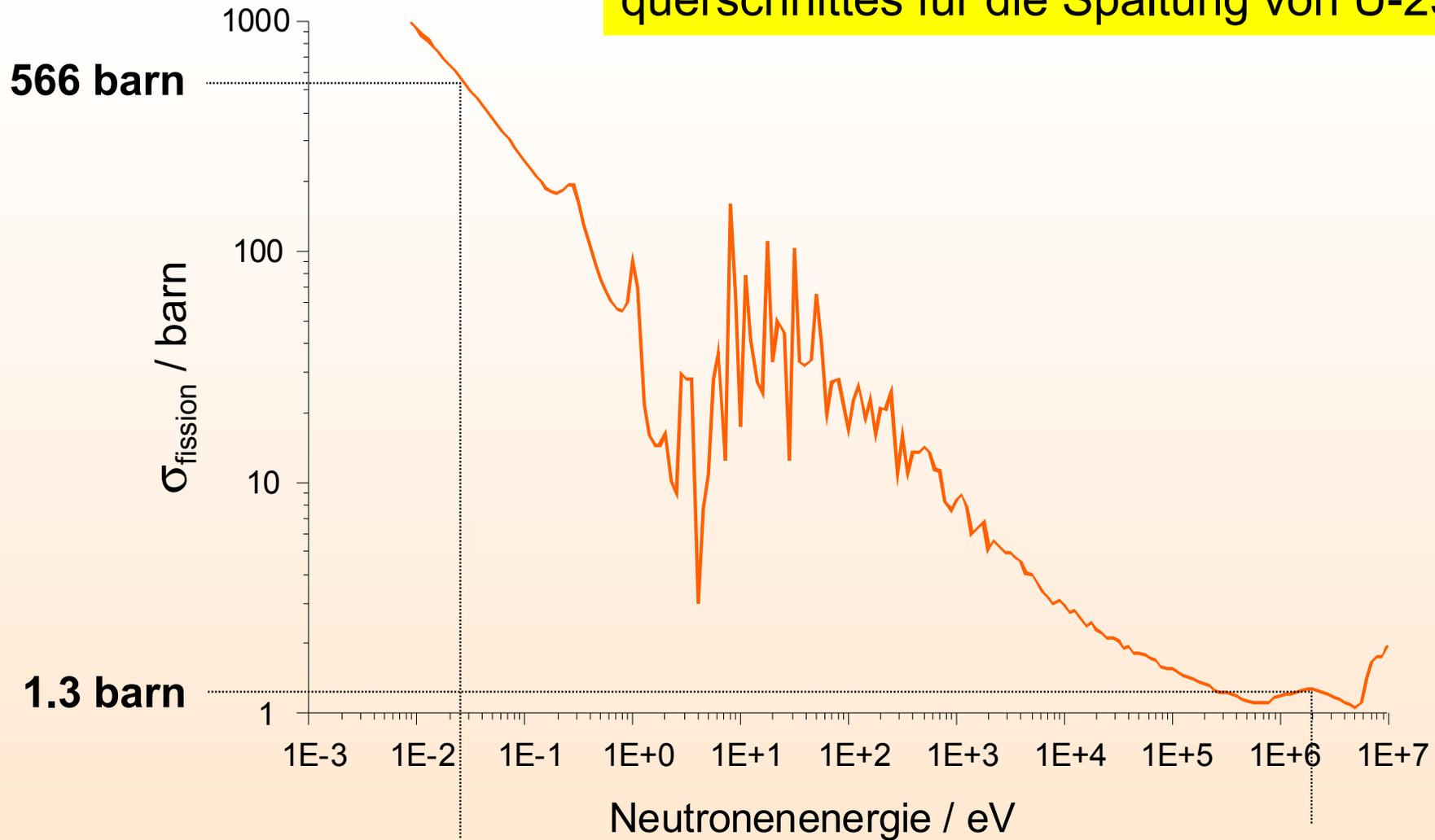
Spaltprodukte	175 MeV
prompte Neutronen	5 MeV
prompte Gammastrahlung	7 MeV
β -Strahlung aus Spaltprodukten	7 MeV
γ -Strahlung aus Spaltprodukten	6 MeV
Neutrino	10 MeV
gesamt	210 MeV

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



$E_n = 0.025$ eV
(thermische Neutronen)

← **Abbremsung**
= Moderation

$E_n = 2$ 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
Bremsvermögen $\xi \cdot \Sigma_s$	1.53	0.170	0.178	0.061
Bremsverhältnis $\xi \cdot \Sigma_s / \Sigma_a$	70	5200	162	235

Verzögerte Neutronen

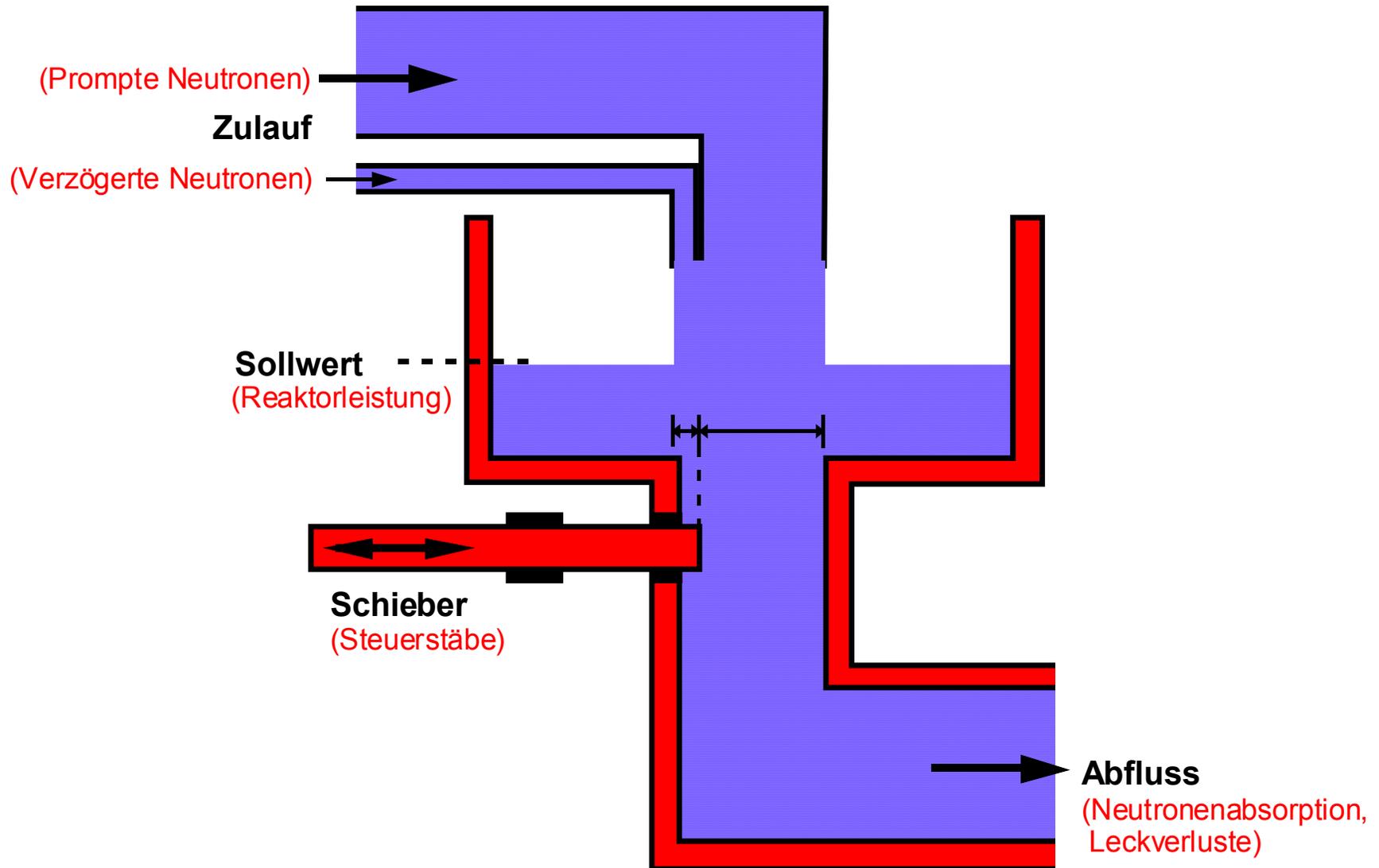
i	1	2	3	4	5	6
T_2 / s	0,2	0,6	2,3	6,2	23	56
$a_i = \beta_i / \beta$	0,042	0,115	0,395	0,196	0,219	0,033
Mutterkern	?	?	?	Br-89	J-137	Br-87
n pro 10^3 Spaltungen (U-235)	0,7	1,8	6,2	3,1	3,5	0,5

$$\Rightarrow \Sigma = 1$$

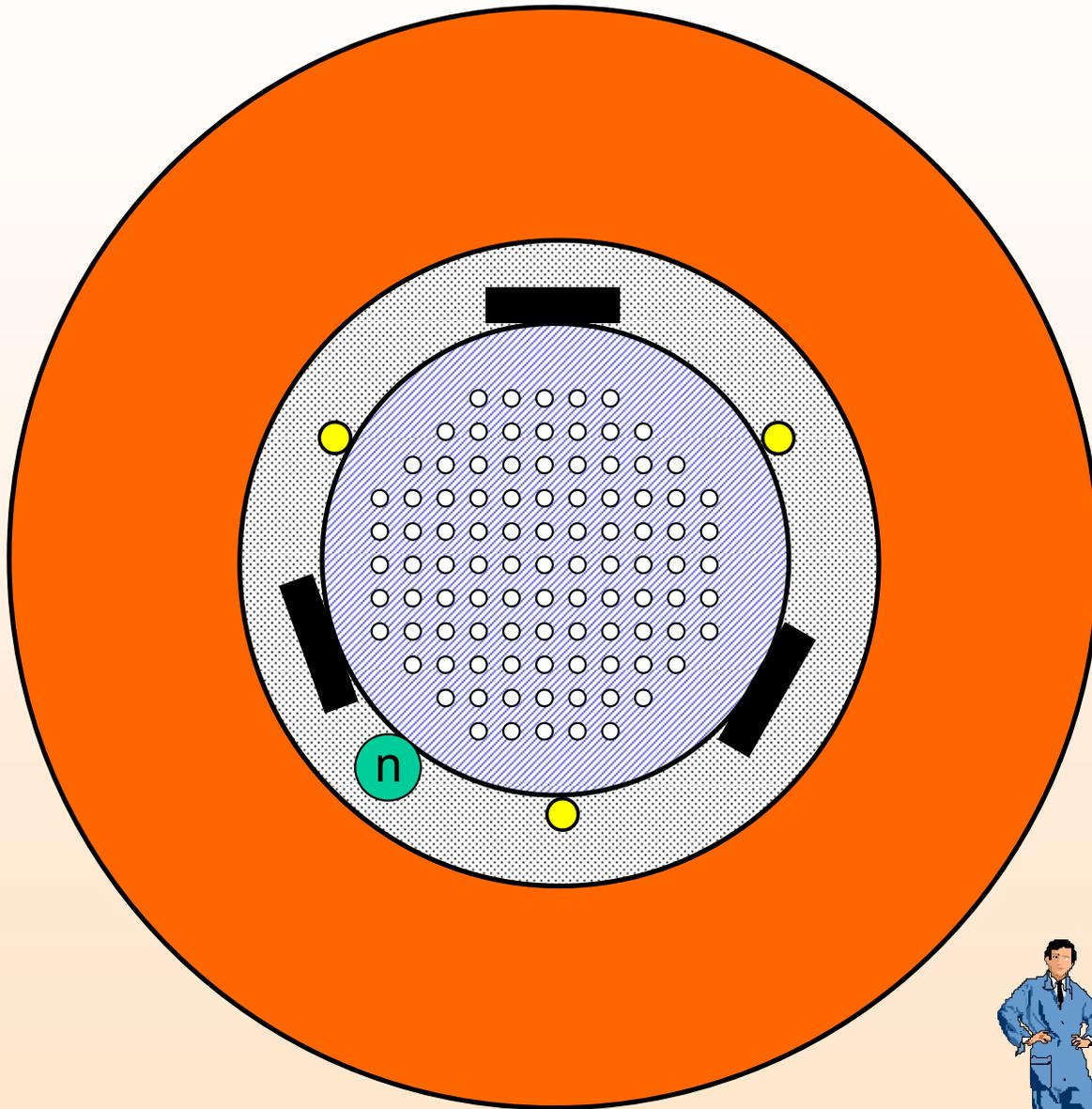
$$\Rightarrow \Sigma = 15,8$$

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

Wassermodell zur Erklärung der Neutronensteuerung im Kernreaktor



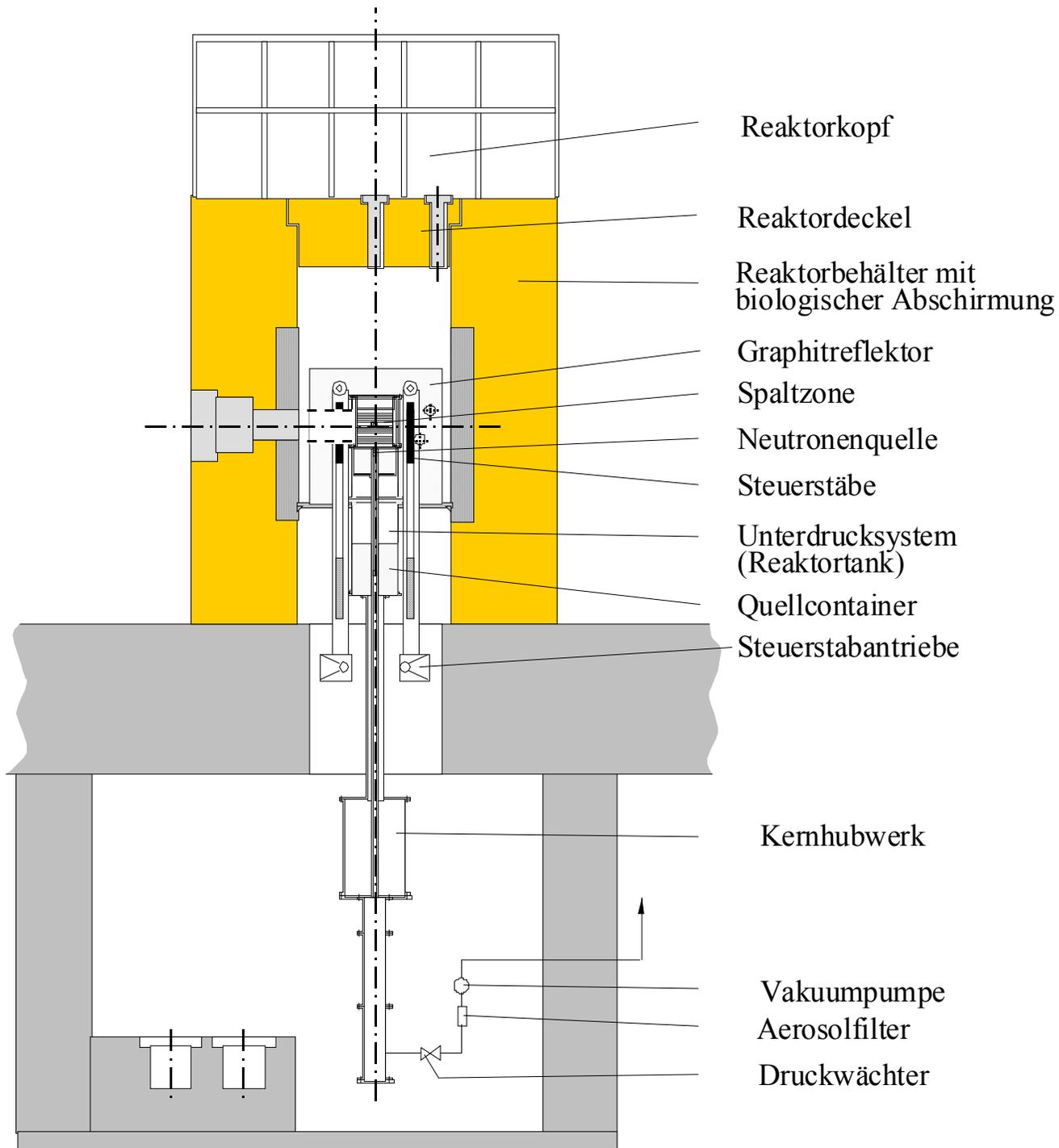
Prinzipaufbau eines Kernreaktors



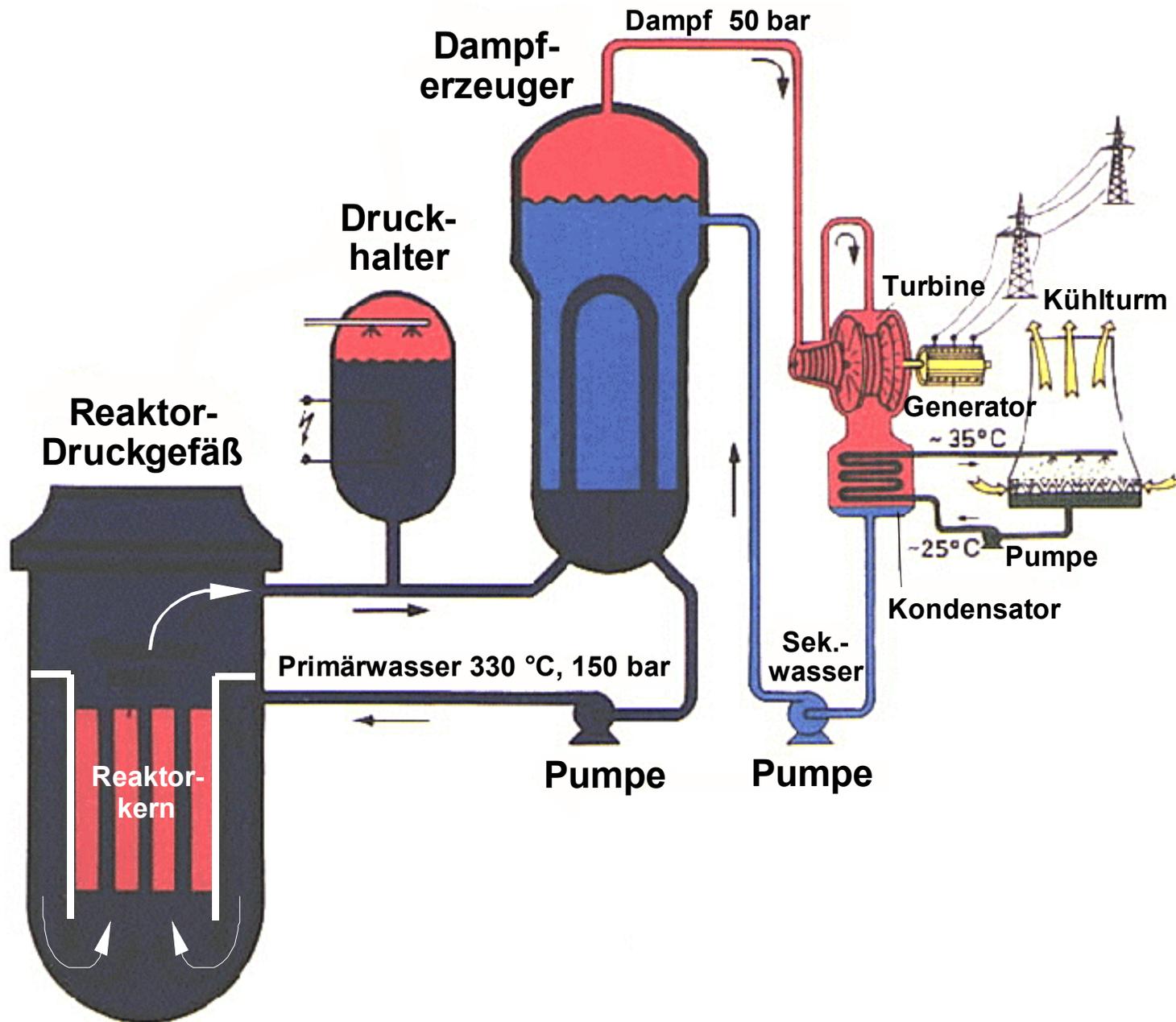
- **Kernbrennstoff**
- **Moderator** (H_2O , D_2O , Graphit, PE)
- **Reaktorgefäß**
- **Reflektor** (H_2O , D_2O , Be, Graphit)
- **Strahlenabschirmung** (Schwerbeton)
- **Regelstäbe** (Cd, B, Hf, Sm)
- **Neutronendetektoren**
- **Neutronenquelle**
(nur bei Forschungsreaktoren
kleiner Leistung)



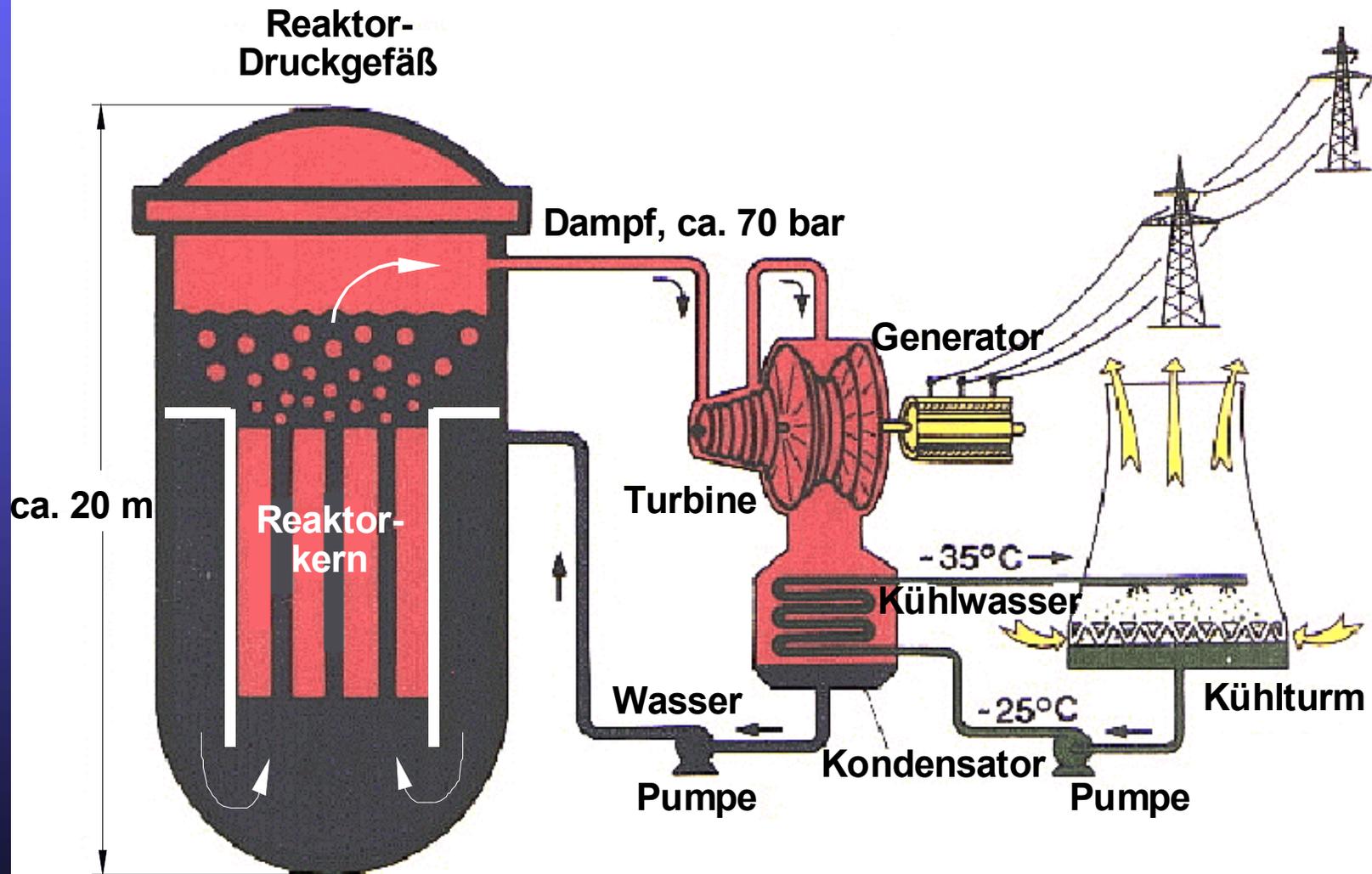
Aufbau des AKR



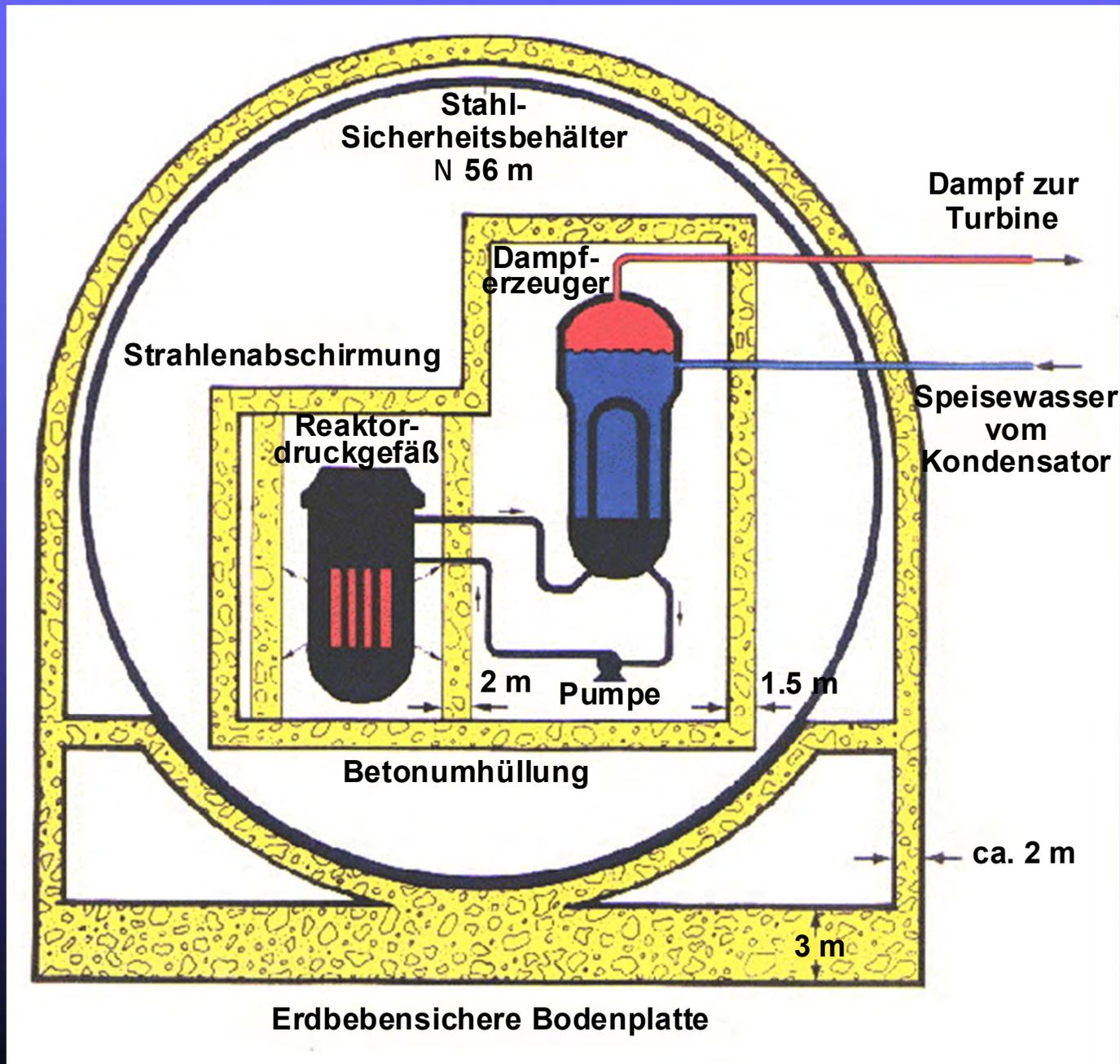
KKW mit Druckwasserreaktor



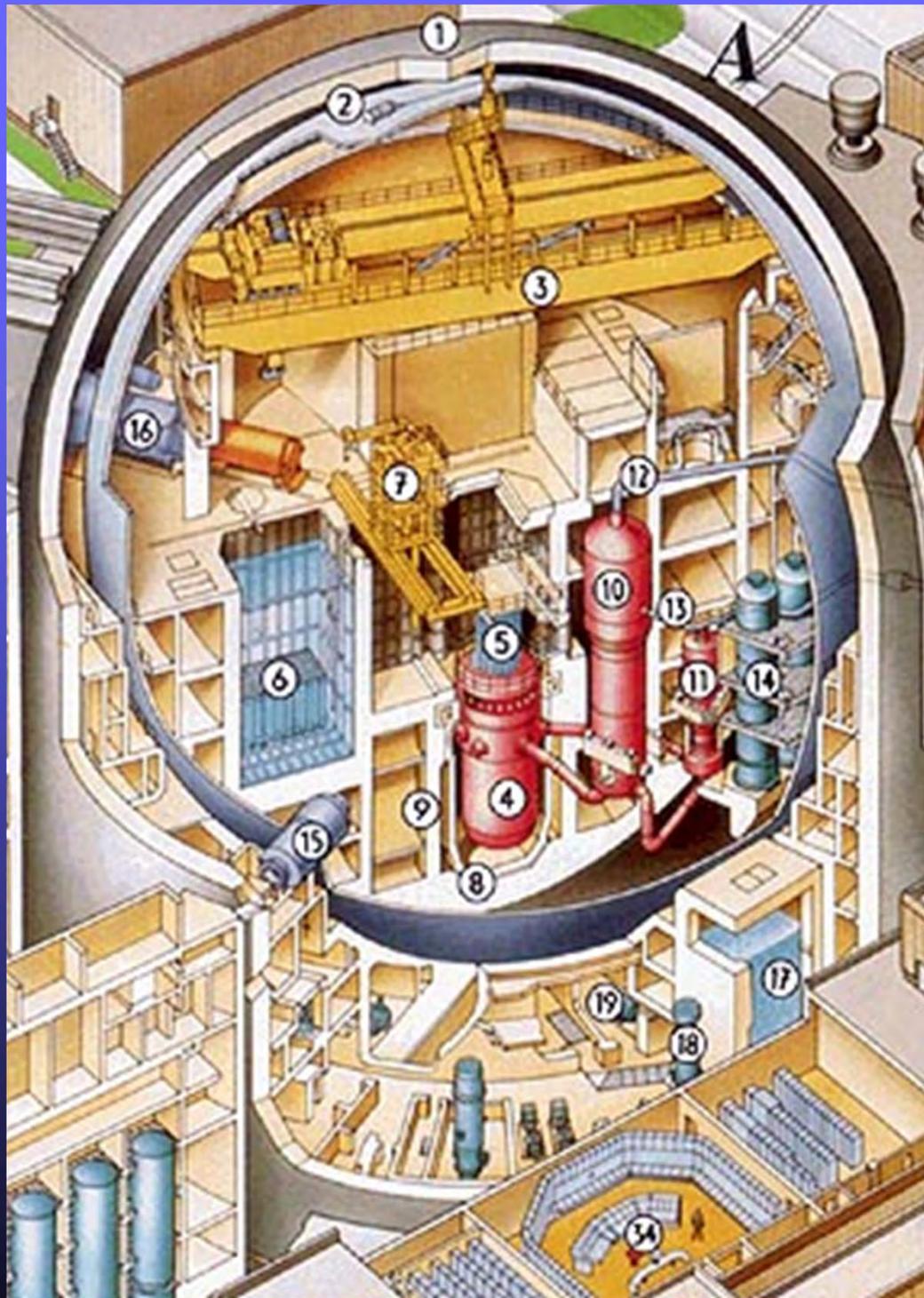
KKW mit Siedewasserreaktor



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

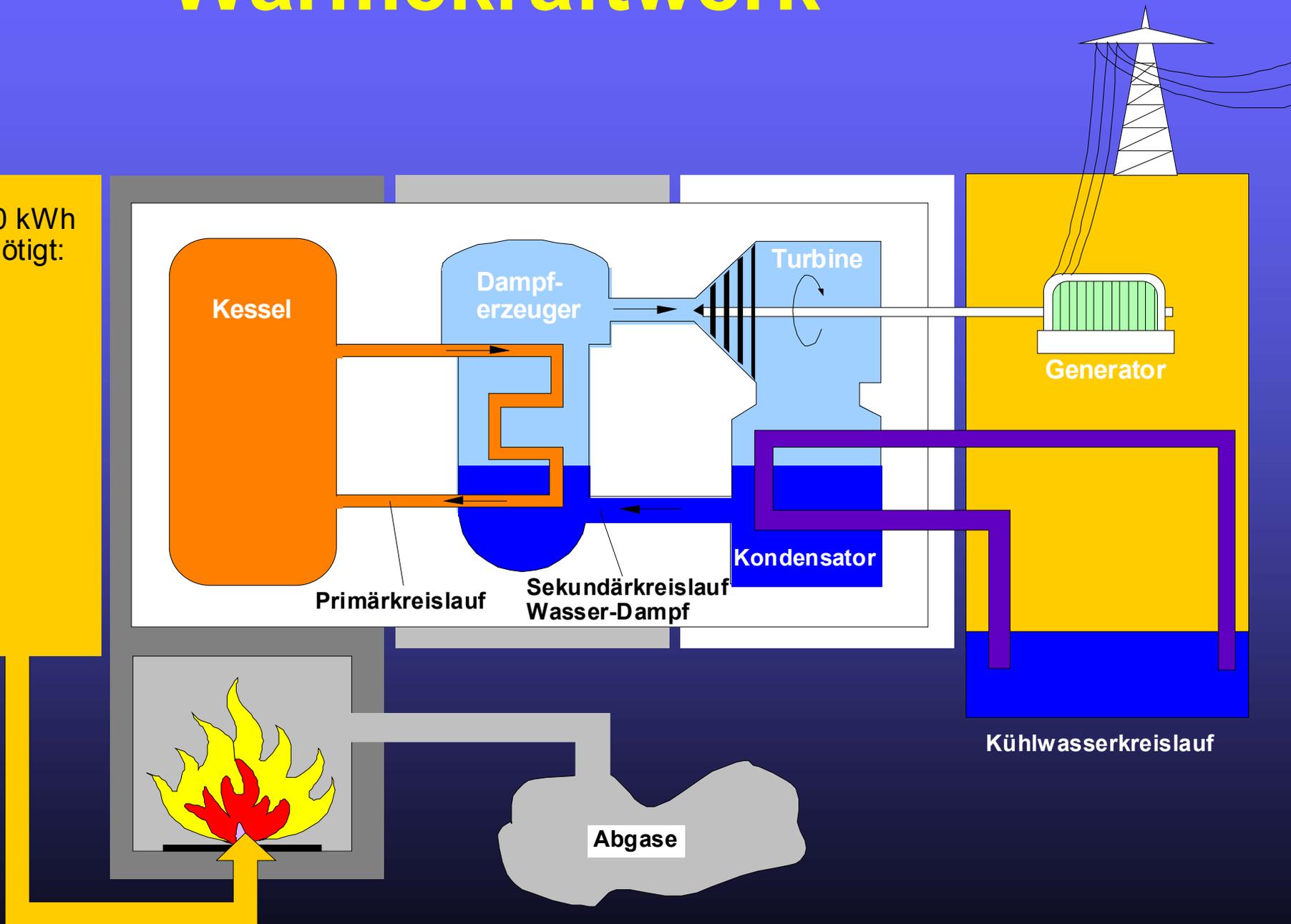
Kernkraftwerk Biblis



Wärmekraftwerk

Für 250 000 kWh
werden benötigt:

80 t
Steinkohle
oder
55 t
Erdöl
oder
75000 m³
Erdgas

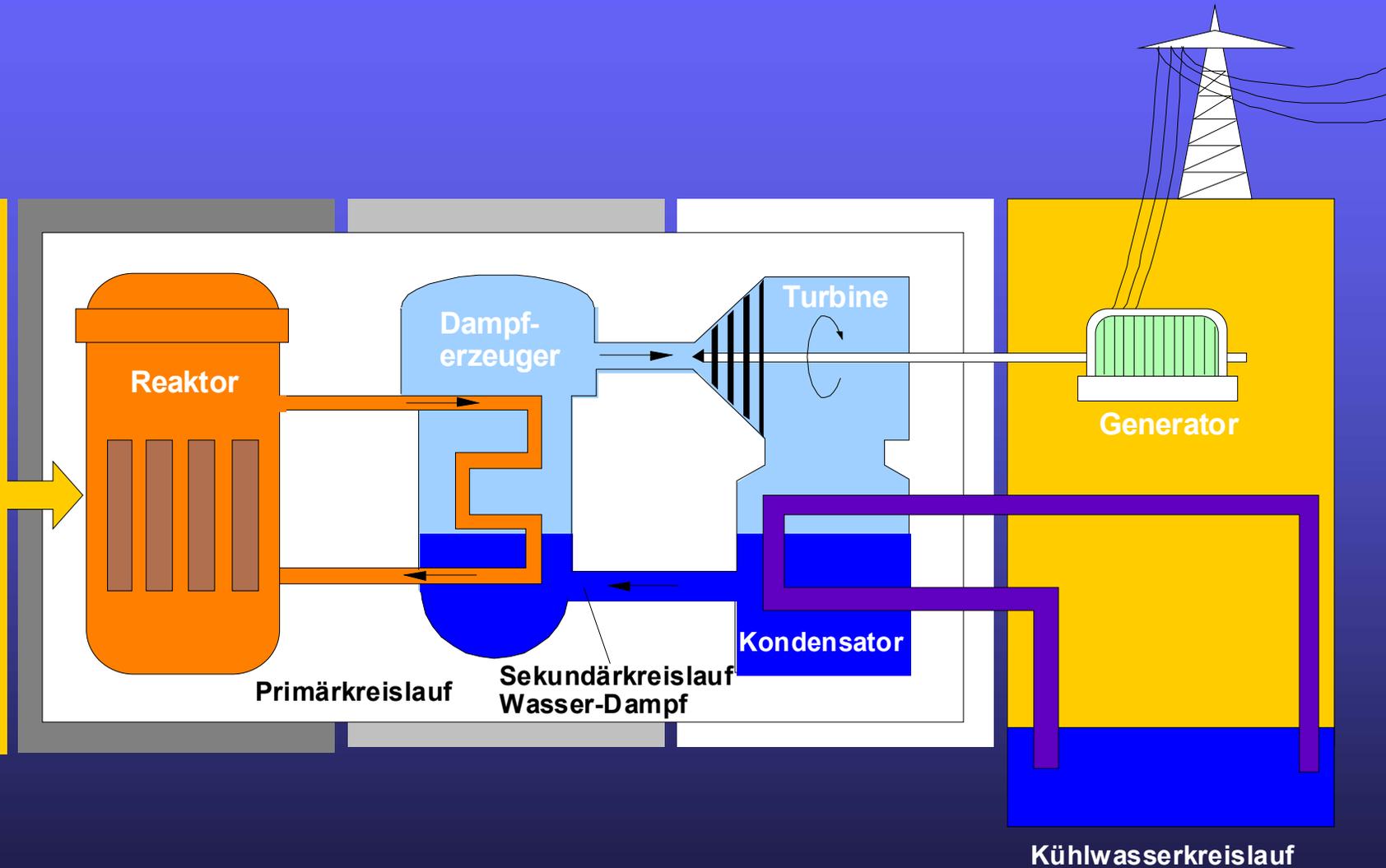


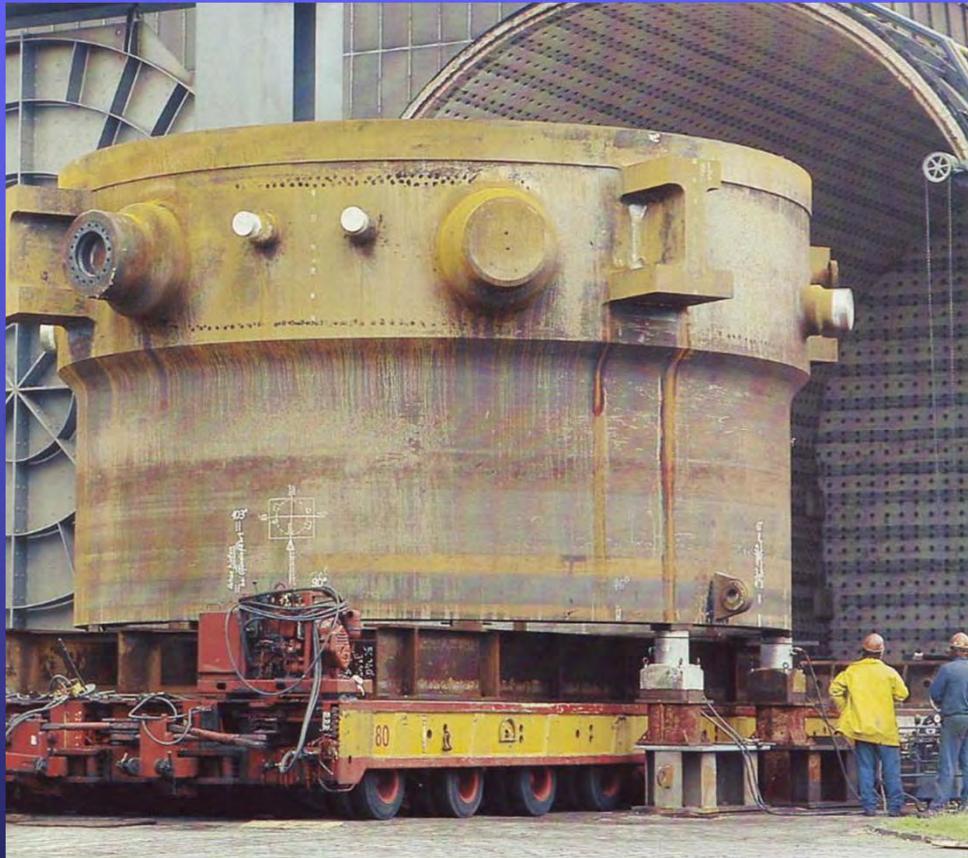
Kernkraftwerk

Für 250 000 kWh
werden benötigt:

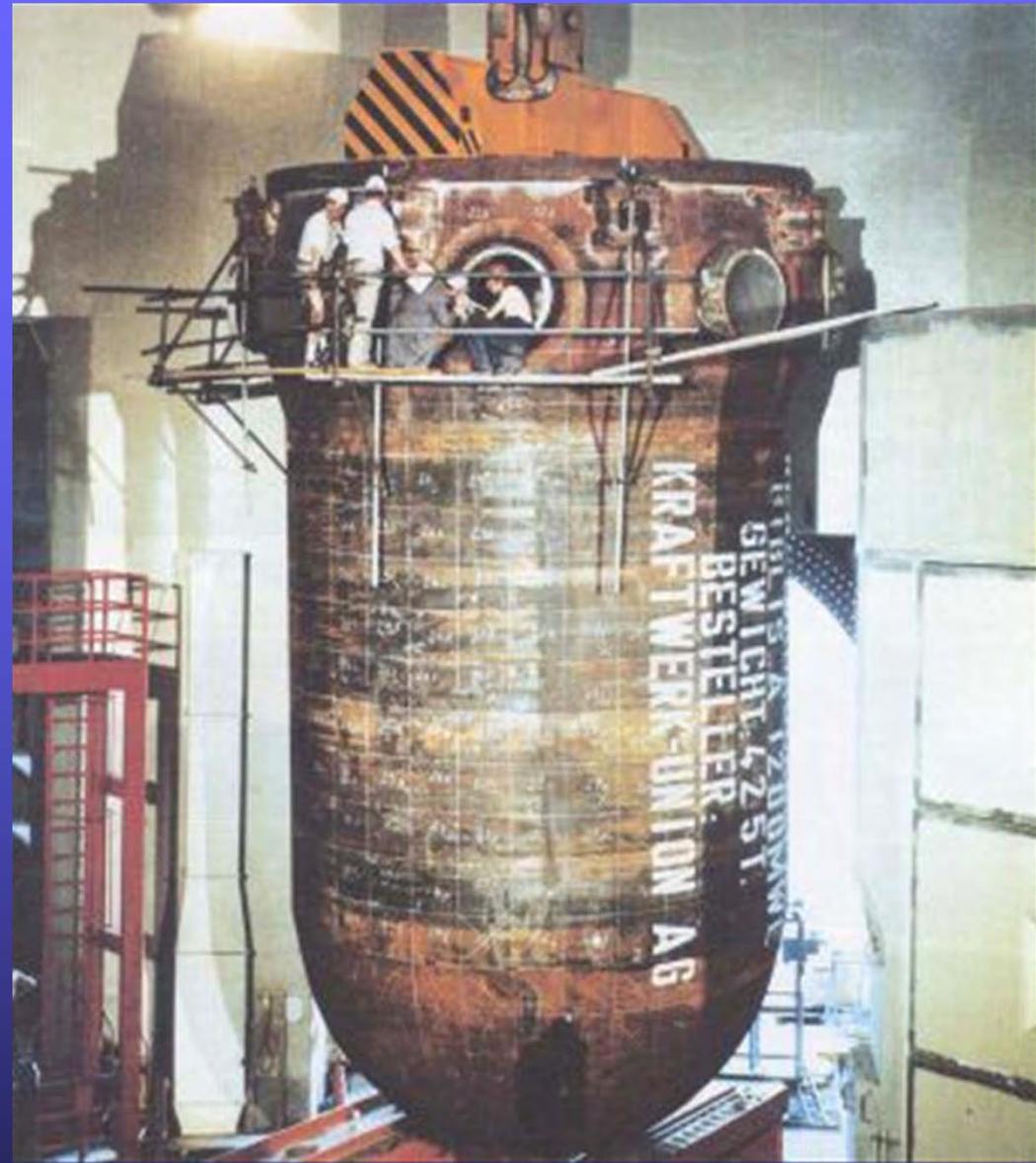
1 kg
angereichertes
Uran

(entspricht
ca. 6 kg
Natururan)





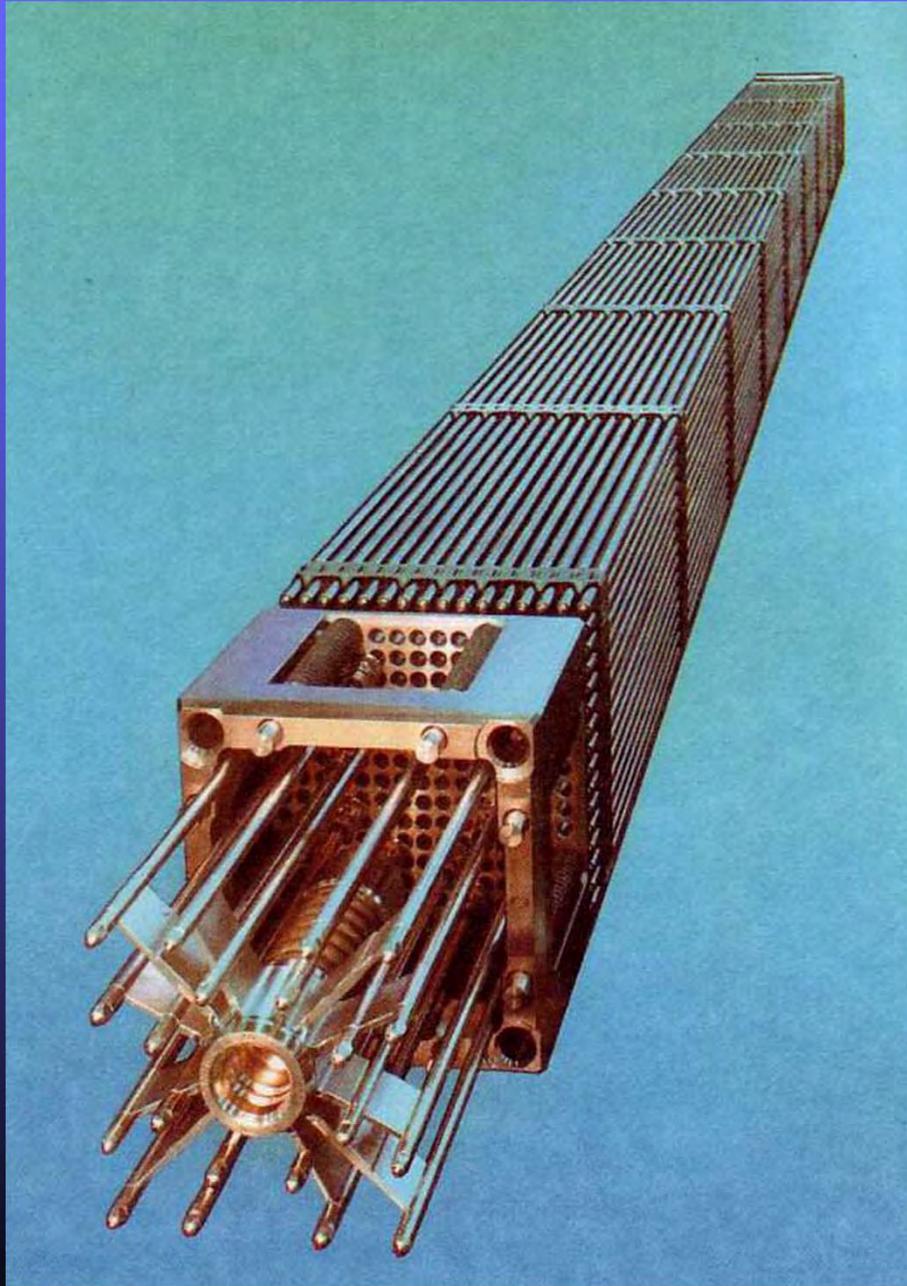
Oberteil



vor dem Einbau

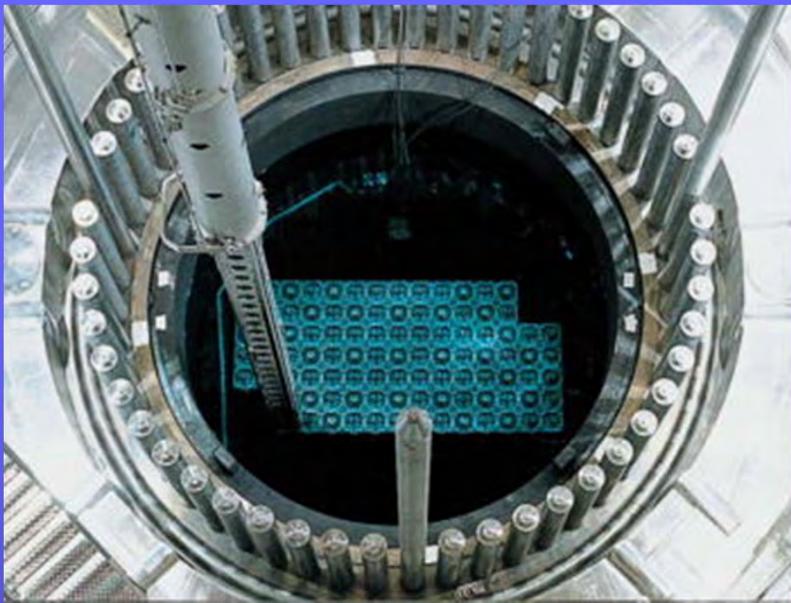
Reaktordruckbehälter

Brennelement eines Druckwasserreaktors

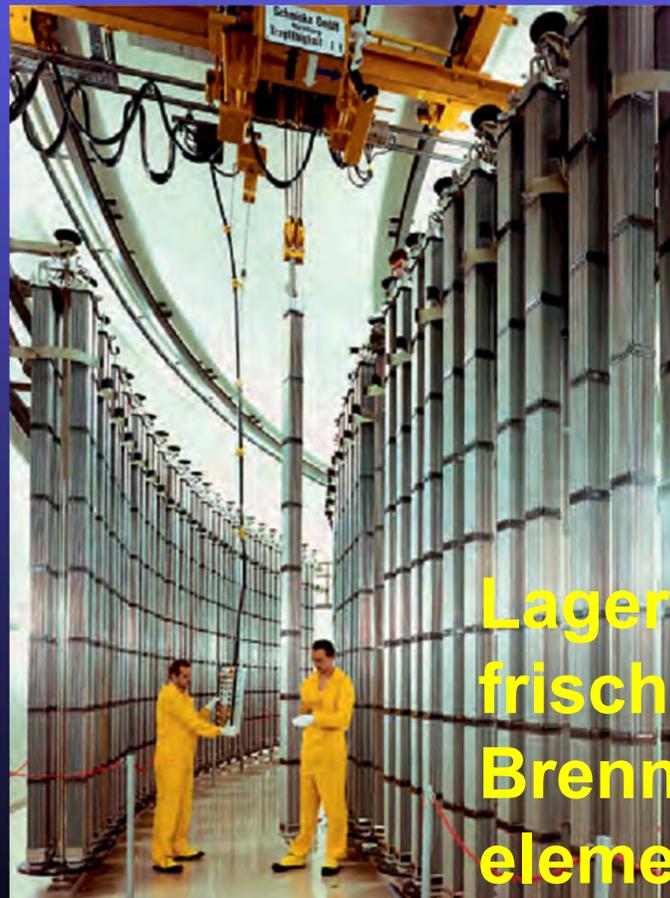
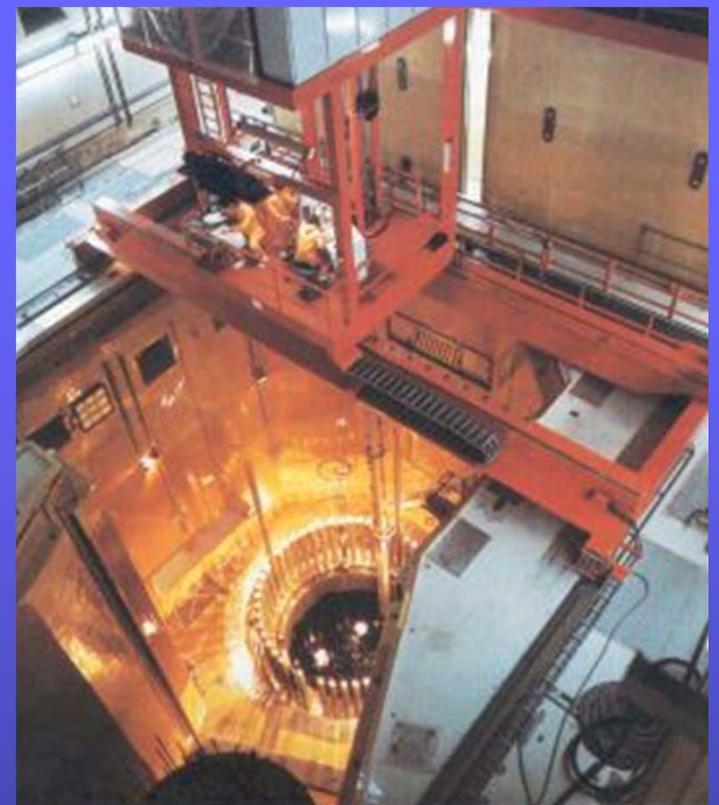


- rechteckiges Stabbündel (16 x 16)
- Grundfläche 23 x 23 cm
- Masse ca. 750 kg
- knapp 5 m Höhe
- 236 Brennstäbe
- zusätzlich 20 Steuerstäbe (Cd)
- im Reaktor (z.B. Biblis A) befinden sich 193 dieser BE, d.h. 193 x 236 ~ 45500 Brennstäbe
- das sind 99,2 t Urangewicht

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



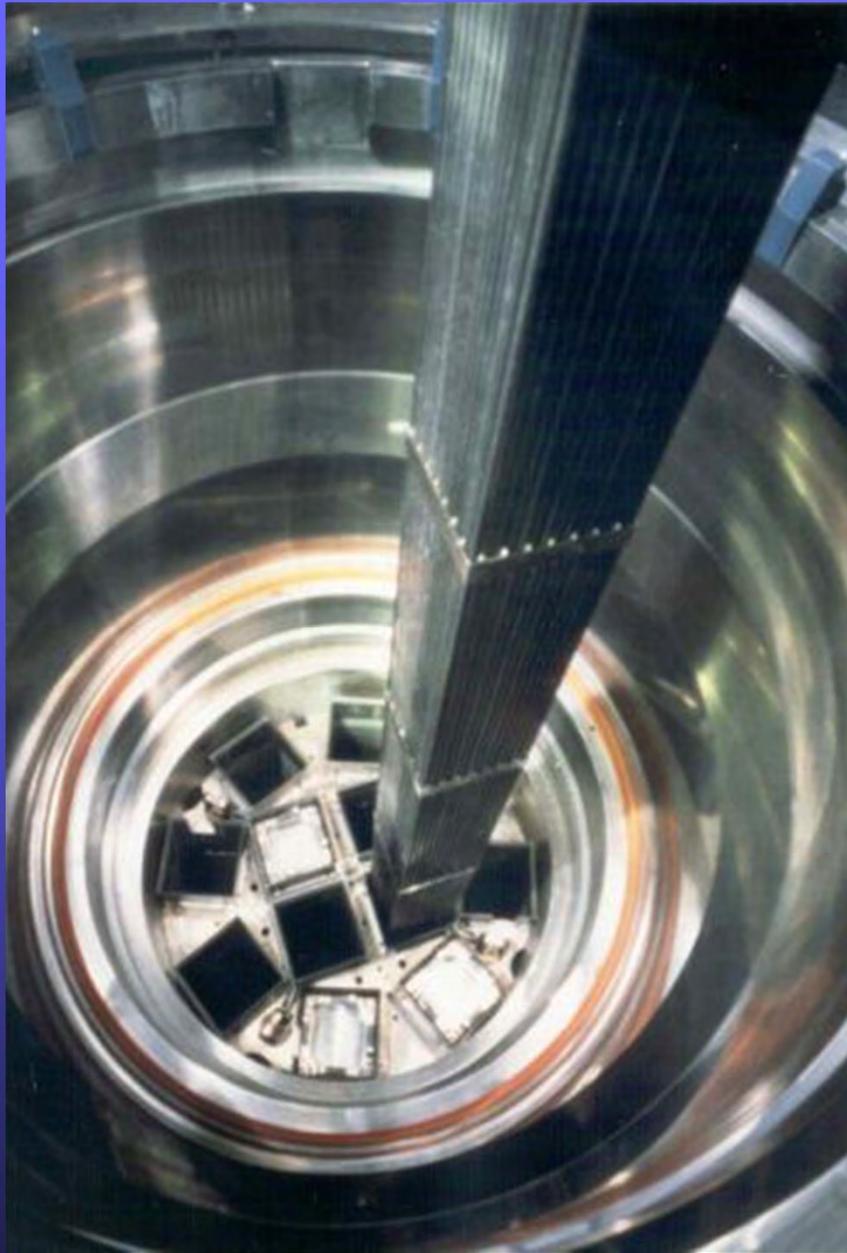
Umladung
von Brenn-
elementen



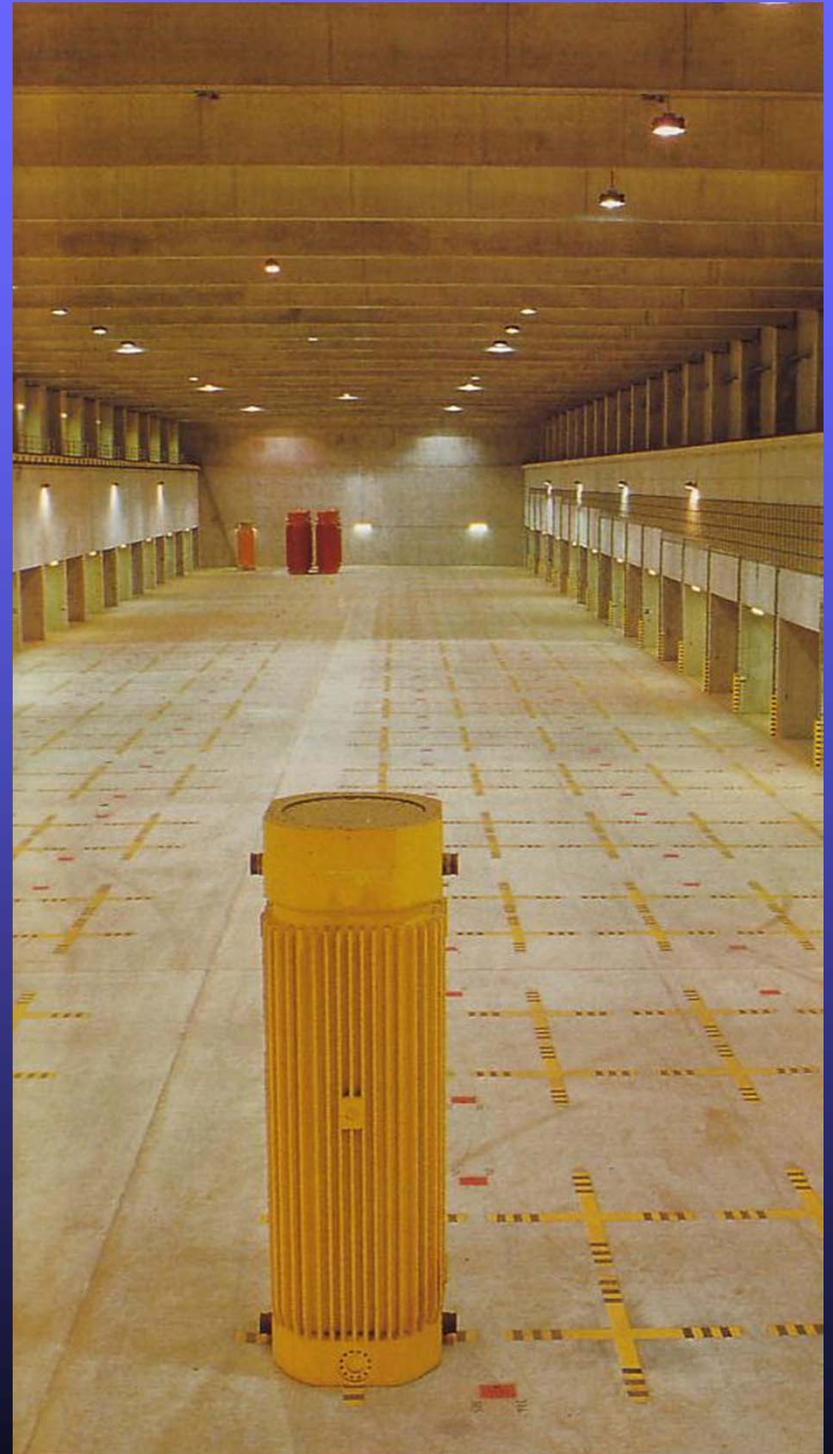
Lager für
frische
Brenn-
elemente



Abklingbecken



**CASTOR-Behälter mit
abgebrannten Brennelementen**



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



... und Freude am Praktikum