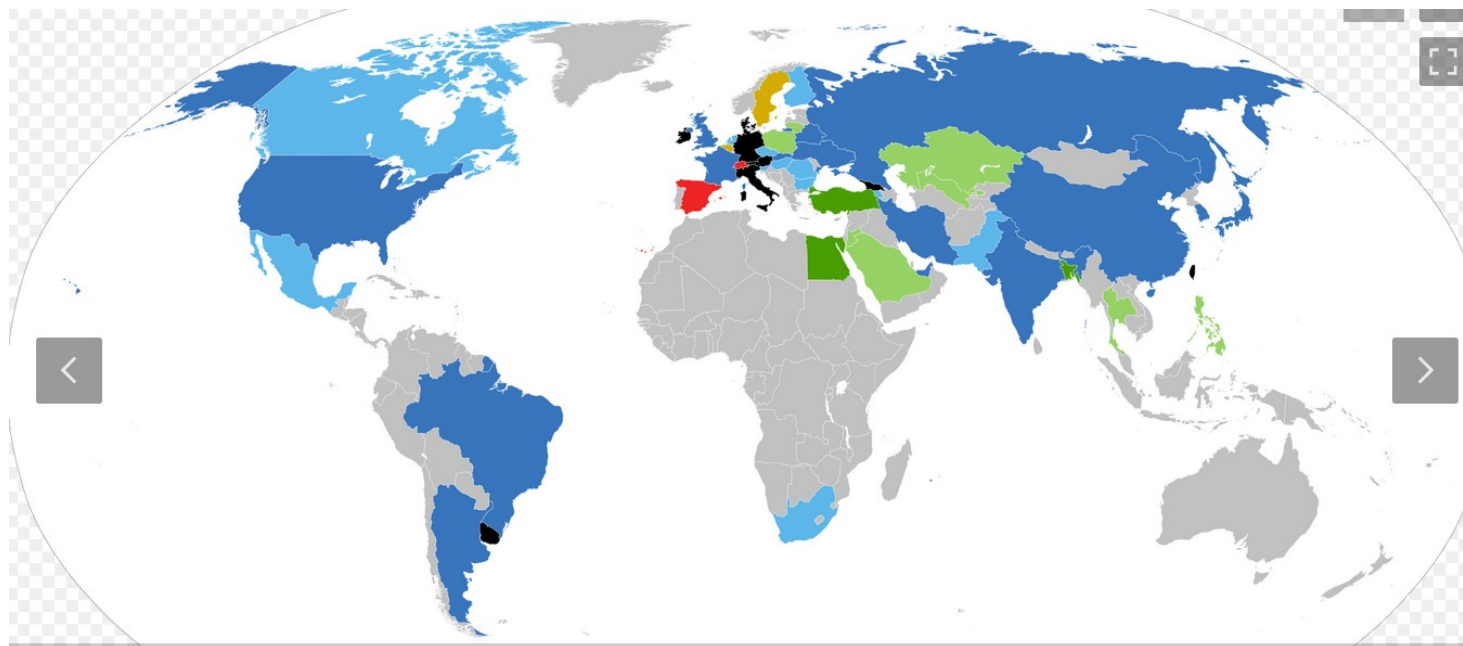


Tagung Bürger für Technik, 25. / 26. Okt. 2025, Magdeburg

Heinrich Lindner

## Kernenergie: Rückblick und Blick in die Zukunft

# Weltweite Nutzung der Kernenergie



Stand der wirtschaftlichen Kernenergienutzung weltweit:

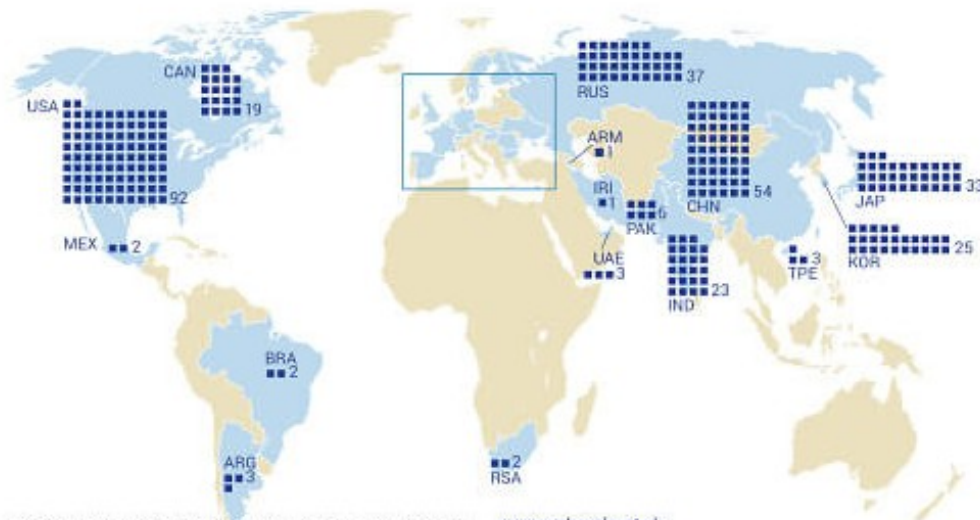
- Laufende Kraftwerke, neue im Bau
- Laufende Kraftwerke, neue in Planung
- Keine Kraftwerke, neue im Bau
- Keine Kraftwerke, neue in Planung
- Laufende Kraftwerke, stabil
- Laufende Kraftwerke, Ausstieg beschlossen
- Zivile Atomkraft illegal
- Keine Kraftwerke

 [Weitere Einzelheiten](#)

## Kernkraftwerke weltweit

### Les centrales nucléaires dans le monde

Stand 31.12.2022\* / État au 31 décembre 2022\*



\* Aktuelle Daten zu den Kernkraftwerken und Lagern der Welt auf:  
Les données relatives aux centrales nucléaires et aux dépôts de déchets radioactifs dans le monde entier sont mises à jour sur:

[www.nuclearplanet.ch](http://www.nuclearplanet.ch)



Ganze Welt  
Monde entier



438 393 600 MW



10%



# Kernkraftwerke China



Deutschlands Strategie ist unverändert

- 100 % erneuerbare Energien, Wind, Sonne, Biomasse
- vorübergehend Gaskraftwerke, zügig auf grünen Wasserstoff umstellen
- Klimaneutralität bis 2045 oder eher

Kein Land folgt unserem Beispiel (angeblich “Vorreiter”),  
wir sind isoliert



© Der Energieparks Witznitz bei Leipzig hat eine Leistung von 650 MWp. Grafik: MOVE ON Energy







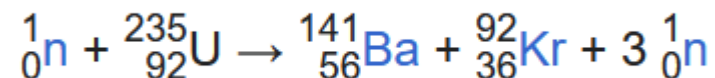
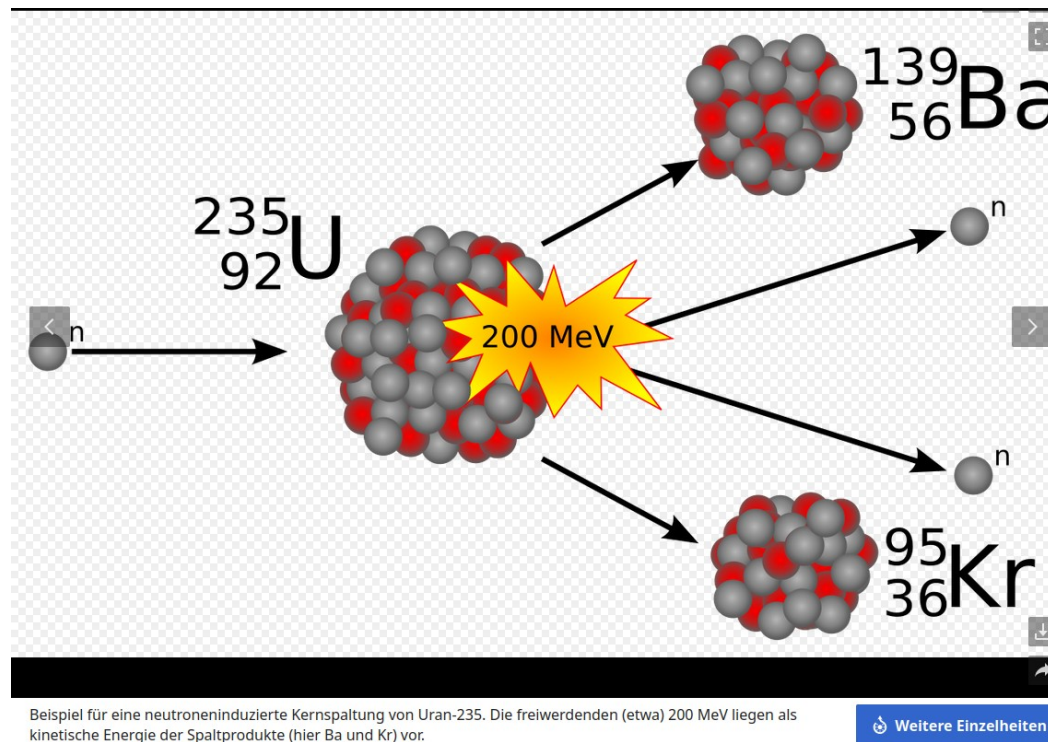
## Die Physik lässt sich nicht aufheben

- großer Flächen- und Materialverbrauch
- wetterabhängig / zufällig => Flatterstrom
- nicht marktfähig, nur existent durch staatlich / ideologischen Zwang
- weltweit höchste Strompreise

Ungeeignet für ein dichtbesiedeltes Industrieland

Kurze Erinnerung an die Kernphysik:  
**induzierte** Kernspaltung;  
Kettenreaktion wegen  $n \rightarrow 2 n$  oder  $3 n$

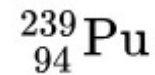
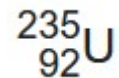
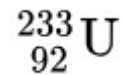
Entdeckung Otto Hahn / Fritz Strassmann / Lise Meitner 1938



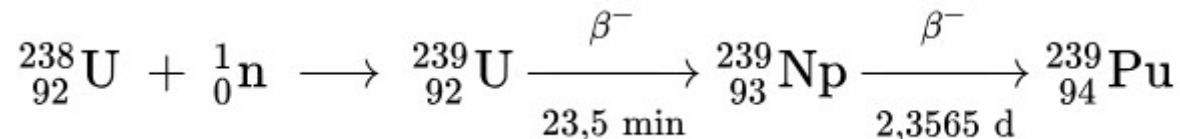
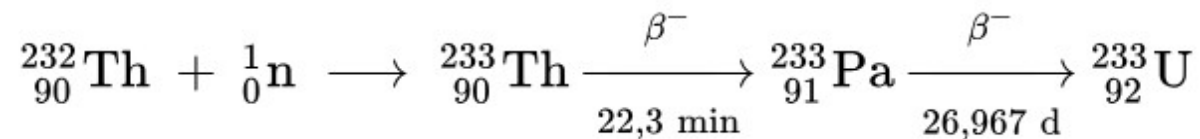


U-235 nur zu 0,7 % im Natur-Uran enthalten,  
99,3 % U-238 nicht induziert spaltbar

Induziert spaltbare Kerne:



U-233 lässt sich aus Th-232, Pu-239 lässt sich aus U-238 erbrüten;  
Neutronenquelle dabei zum “Anschub” U-235;  
damit 100 mal mehr spaltbares Material => schnelle Brüter



## Nuklearprojekte zweiter Weltkrieg

- 1942 erster Kernreaktor, Enrico Fermi, Chicago Pile No. 1 (CP1)
- 1942, 1945 Manhattan-Projekt, U235- und Pu239-Bombe

## Militärische Projekte danach

- Nuclear marine propulsion, U-Boote und Flugzeugträger => Druckwasser-Reaktoren (“Nautilus”)  
=> **diese Technik (“Brennstäbe”) setzte sich auch für zivile Anwendungen durch**
- 1946-1951 Aircraft Nuclear Propulsion (ANP) => Flüssigsalz- und Flüssig-Na-Reaktoren

1964 – 1969 ANP wurde (zivile Anwendung!!) fortgesetzt als Molten-Salt Reactor Experiment (MSRE); OakRidge National Laboratory (ORNL) / Tennessee:

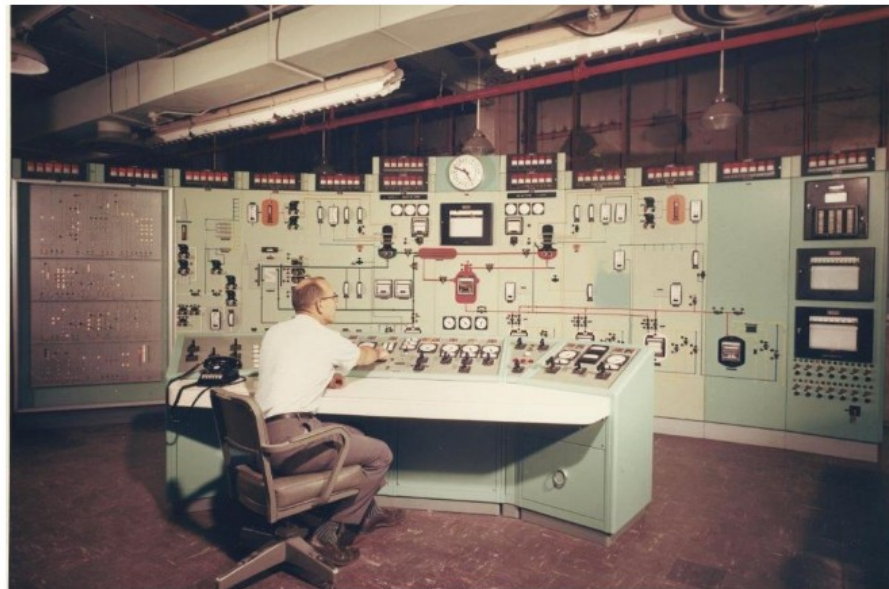
1. Flüssigsalz / Brennstoff LiF-BeF<sub>2</sub>-ZrF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub> (65-29.1-5-0.9 mole %)
2. Spezial-Legierung Hastelloy-N (Chrom / Nickel / Molybdän), korrosionsbeständig
3. 10 Mwth / 650 Celsius

“MSR feasibility proven” : Machbarkeit bewiesen !

Eisenhower 1953: “Atoms for peace”

Flüssigsalzreaktor (MSRE) lief schon 1965 -1968 erfolgreich  
Oakridge National Laboratory / Tennessy

### Time Warp: Molten Salt Reactor Experiment— Alvin Weinberg's magnum opus

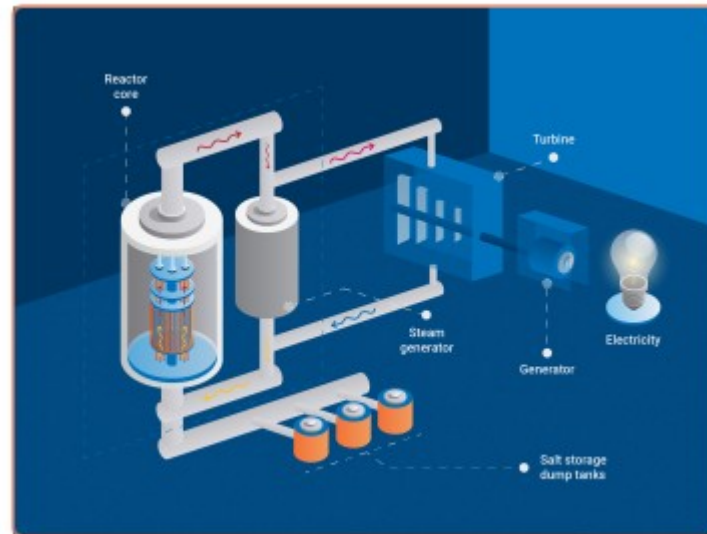


*The MSRE control room.*

Flüssigsalzreaktor-Konzept zugunsten der  
Druck-/Siedewasser-Reaktoren zunächst aufgegeben (schade!!)

# Prinzip Flüssigsalzreaktor

- Salzschnelze / Fluoride
- Salzschnelze mit Pumpe umgewälzt => Abtransport Wärme
- Spaltbares Material / Uranoxid in der Salzschnelze gelöst, keine Brennstäbe



Fast alle heute weltweit betriebenen Kernreaktoren entsprechen Generation II, III, III+ sind noch keine Brutreaktoren (außer russische BN-Reihe)

Jahrzehntelange Erfahrung mit unterschiedlichen Reaktoren:

- Druck- und Siedewasser-Reaktoren
- gasgekühlte Reaktoren: England
- Schwerwasser-Reaktoren: Canada / Candu
- Thorium-Hochtemperatur-Reaktor: THTR, Elektrizität und Prozesswärme (noch kein Brutreaktor, aber fast, Thorium-232),

Bundesrepublik 1973 Ölkrise: politisches Ziel 40 Kernkraftwerke, am Ende 19 gebaut

## Auch fast alle Reaktor-Neubauten sind Druck- oder Siedewasser-Reaktoren

# Anbieter, Typ, Leistung

# Druckwasser-Reaktoren

- Westinghouse AP 1000
- Korea Nuclear Power APR 1400
- China General Nuclear Power ACPR1000
- Areva EPR 1600
- Rosatom WWER 1000
- Areva / Mitsubishi Atmea1 1000

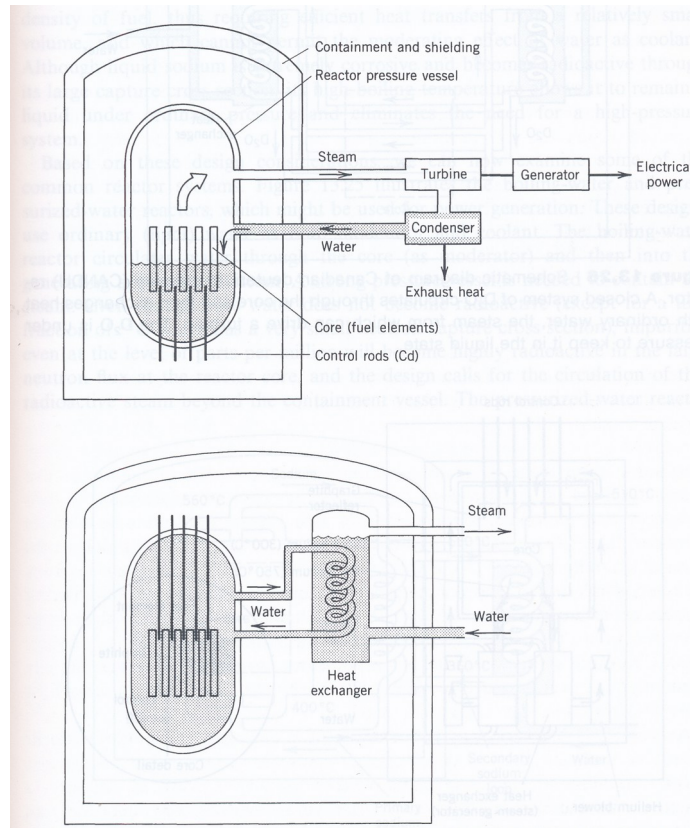
# Siedewasser-Reaktoren

- GeneralElectric / Hitachi / Toshiba ABWR 1000
- General Electric / Hitachi ESBWR 1500

K.D.Humpich:“AP1000 / Westinghouse fortgeschrittenster GenIII+Reaktor”



oben : Siedewasser-Reaktor (z.B. KKW Grundremmingen)  
unten: Druckwasser-Reaktor (z.B. KKW Isar-Block2)  
schematisch, Leichtwasser als Moderator und zur Kühlung



Durch jahrzehntelange Forschung:

- umfangreiche kernphysikalische Datenbasis
- Nuclidkarten: für jedes Nuclid umfangreiche Daten

### Das Periodensystem der Elemente online

[Startseite](#) [Nuclidkarte](#) [Rechenhilfen](#) [Listen](#)

Element im Periodensystem

Allgemeine Element-Informationen

Allgemeine Gruppen-Informationen

Atomare Eigenschaften

Modifikationen / Physikalische Eigenschaften

Ionisierung

Thermodynamik

Oxidation und Reduktion

Säure-Base-Verhalten

Massenwirkungsgesetz

Isotope

Verbreitung

Geschichte

Verbindungen

## 92, Uran (U)

*Uranium, Uranos (gr. Mythologie), Planet Uranus*

**Isotope:**

**Nuklide:**

Anzahl bekannter Nuklide: 34

Anzahl Kernisomere: 8

Anzahl natürlicher Nuklide: 3


Anzahl stabiler Nuklide: 0

**Stabilität:**

Maximale Bindungsenergie:  $^{218}\text{U}$  (7.641 MeV/u)

**Liste der Nuklide:**

|  |                  |   |  |                  |  |  |  |
|--|------------------|---|--|------------------|--|--|--|
| $^{217}\text{U}$                       | $^{218}\text{U}$ | $^{218\text{m}}\text{U}$<br>(2.105 MeV) | $^{219}\text{U}$                         | $^{220}\text{U}$ | $^{221}\text{U}$                         | $^{222}\text{U}$                         | $^{223}\text{U}$                         |
| $^{224}\text{U}$                       | $^{225}\text{U}$ | $^{226}\text{U}$                        | $^{227}\text{U}$                         | $^{228}\text{U}$ | $^{229}\text{U}$                         | $^{230}\text{U}$                         | $^{231}\text{U}$                         |
| $^{232}\text{U}$                       | $^{233}\text{U}$ | $^{234}\text{U}$                        | $^{234\text{m}}\text{U}$<br>(1.4213 MeV) | $^{235}\text{U}$ | $^{235\text{m}}\text{U}$<br>(0.0765 MeV) | $^{236}\text{U}$                         | $^{236\text{m}}\text{U}$<br>(1.0529 MeV) |
| $^{236\text{m}}\text{U}$<br>(2.75 MeV) | $^{237}\text{U}$ | $^{238}\text{U}$                        | $^{238\text{m}}\text{U}$<br>(2.5579 MeV) | $^{239}\text{U}$ | $^{239\text{m}}\text{U}$<br>(0.02 MeV)   | $^{239\text{m}}\text{U}$<br>(0.1338 MeV) | $^{240}\text{U}$                         |
| $^{241}\text{U}$                       | $^{242}\text{U}$ |   |  |                  |  |  |  |



|  |    |    |    |  |
|--|----|----|----|--|
|  |    |    |    |  |
|  | Pr | Nd | Pm |  |
|  | Pa | U  | Np |  |
|  |    |    |    |  |
|  |    |    |    |  |

**Legende:**

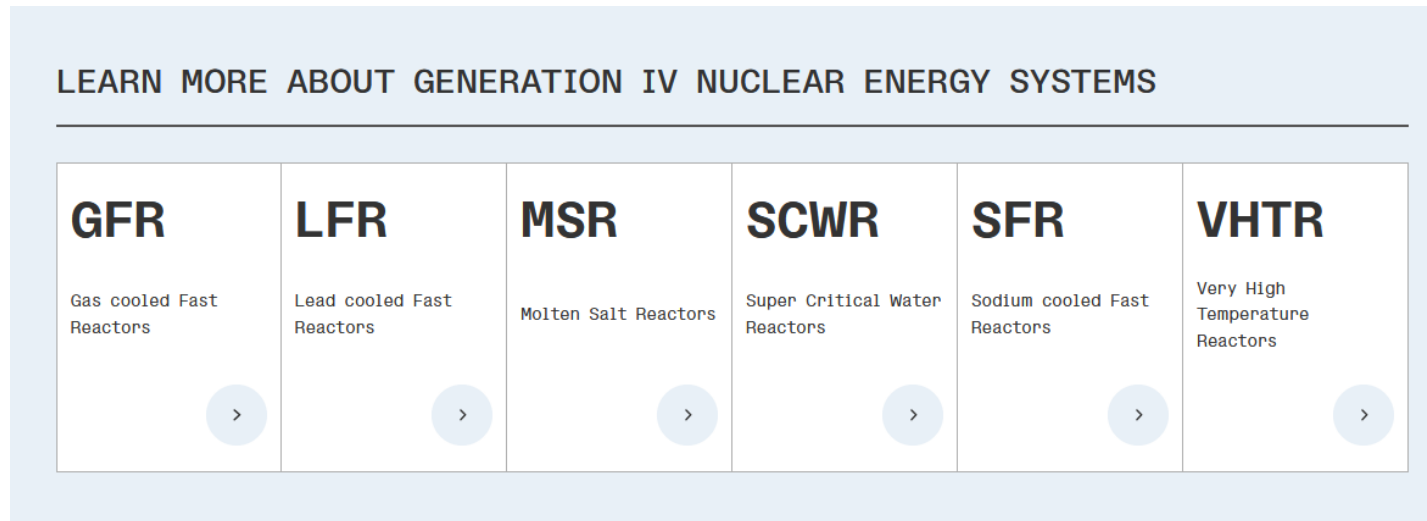
|  |                          |                 |                                 |                                 |                   |                 |                 |
|--|--------------------------|-----------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| $\beta^+$ -Emitter<br>p-Emitter<br>K-Einfänger | Doppelter<br>K-Einfänger | Stabiles Nuklid | Doppelter<br>$\beta^-$ -Emitter | $\beta^-$ -Emitter<br>n-Emitter | $\alpha$ -Emitter | Cluster-Emitter | Spontanspaltung |
|--|--------------------------|-----------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|

# Kernreaktoren der Generation IV

- effizientere Nutzung (vor allem Brüter-Technik)
- höherer Wirkungsgrad => höhere Temperaturen
- erweiterte Anwendungen: Prozesswärme, Wasserstoff, Meerwasserentsalzung
- geringere Menge radioaktiver Abfallstoffe („closed cycle“), kein Endlager erforderlich
- Sicherheit (Lehren aus TMI, Fukushima, Tschernobyl), inhärent sicher
- erschwerter Missbrauch für Kernwaffenproduktion („proliferation resistance“)

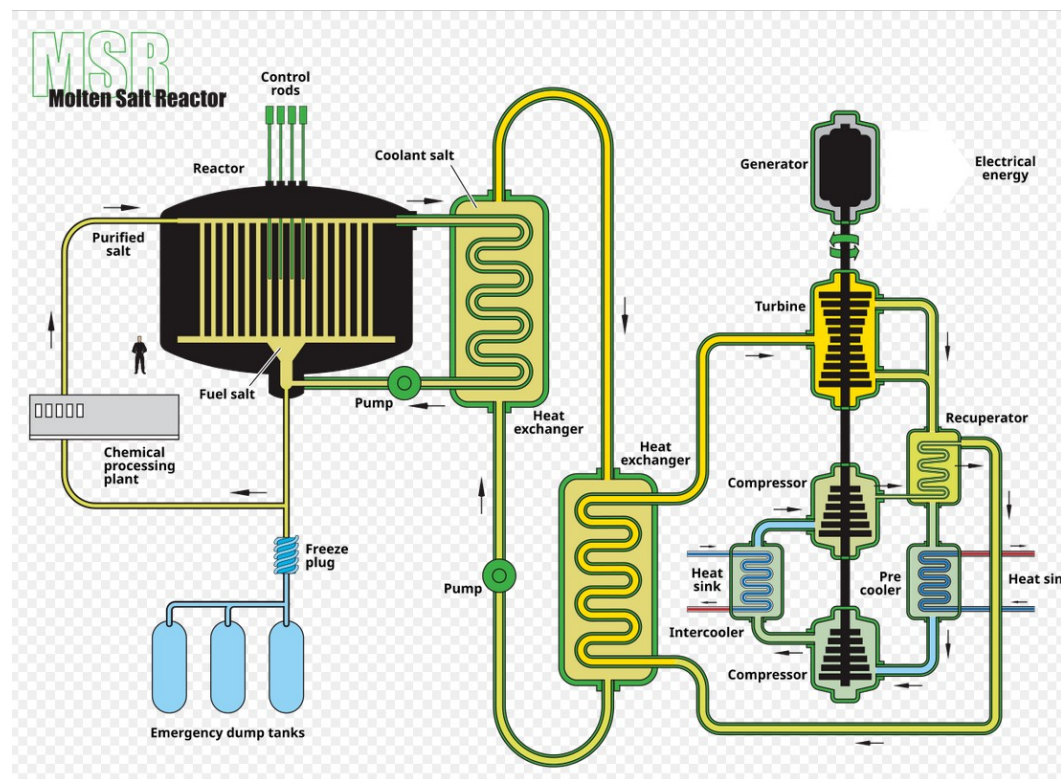
Generation IV International Forum,

- gegründet 2000, offen zur Mitarbeit
- sechs Reaktorkonzepte ausgewählt



SFR: Na-gekühlter schneller Brüter; weltweite Forschung, verwirklicht als BN 1200 / russische Föderation

MSR: Flüssigsalz-Reaktor; darauf ausführlicher im folgenden



- nuklearer Brennstoff in Flüssigsalz gelöst, Flüssigsalz (Fluoride) zugleich Kühlkreislauf => “single fluid”, s. MSRE
- Start mit angereichertem Uran, später Brüten dann Th-230, U-238 => Brutprozess
- kein Überdruck
- keine Unterbrechung für Wartung und Inspektion
- hohe Temperatur 700 -900 Celsius
- Kreislauf im laufenden Betrieb zugänglich, Zugabe von Nucliden zur Transmutation
- keine Gase im Kreislauf: Wasserstoff oder Xenon
- inhärent sicher, keine Kernschmelze; negativer Temperaturkoeffizient; Schmelzsicherung
- Weitergabe von spaltbarem Material zur Kernwaffenproduktion erschwert (“non-proliferation”)

## Aktuelle MSR - Forschung weiterhin

- Oakridge Laboratory Tennessee
- Idaho National Laboratory
- China
- EURATOM / Frankreich

Zur Erinnerung: Vorläufer des MSR lief schon erfolgreich 1965 – 1968  
im ORNL / Tennessee



# Ergebnisse EURATOM-Studie SMR

## SMR mit folgenden Eigenschaften ist machbar:

**Table 7.1 Characteristics of the reference molten salt fast reactor**

|   |  |
|---|--|
| Thermal/electric power                                | 3000 MW <sub>th</sub> /1300 MW <sub>e</sub>  |
| Fuel salt temperature increase in the core (°C)       | 100  |
| Fuel molten salt, initial composition                 | LiF-ThF <sub>4</sub> -( <sup>233</sup> U or <sup>enr</sup> U)F <sub>4</sub> or<br>LiF-ThF <sub>4</sub> -(Pu-MA)F <sub>3</sub> with 77.5 mol% LiF |
| Fuel salt melting point (°C)                          | 565  |
| Mean fuel salt temperature (°C)                       | 700  |
| Fuel salt density (g/cm <sup>3</sup> )                | 4.1  |
| Fuel salt dilation coefficient (g/cm <sup>3</sup> °C) | $8.82 \times 10^{-4}$  |
| Fertile blanket salt, initial composition (mol%)      | LiF-ThF <sub>4</sub> (77.5–22.5%)  |
| Breeding ratio (steady-state)                         | 1.1  |
| Total feedback coefficient (pcm/°C)                   | –5   |
| Core dimensions (m)                                   | Radius: 1.1275<br>Height: 2.255  |
| Fuel salt volume (m <sup>3</sup> )                    | 18   |
| Total fuel salt cycle in the fuel circuit             | 3.9 s  |

# Euratom-Studie SMR Strategie über die Zeit

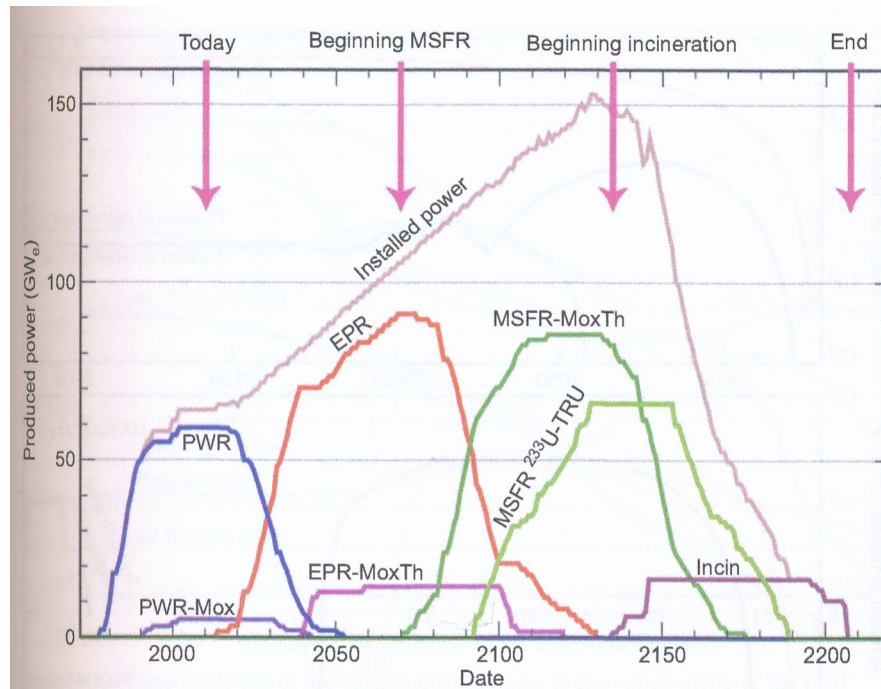


Figure 7.10 French nuclear power deployment exercise based on pressurized water reactors (PWRs), evolutionary power reactors (EPRs), and molten salt fast reactors (MSFRs).

# Dual-Fluid-Reaktor

Grundgedanke: Single-Fluid-Reaktor benutzt ein Medium in einem Kreislauf für **Brennstoffzufuhr** und **Wärmeabfuhr**, dadurch Kompromiss zwischen beiden Anforderungen (englisch: fuel and coolant)

Zwei getrennte Medien in **getrennten** Kreisläufen für **Brennstoffzufuhr** (etwa Flüssigsalz) und **Wärmeabfuhr** (etwa Flüssigblei), dadurch jeweilige getrennte Optimierung

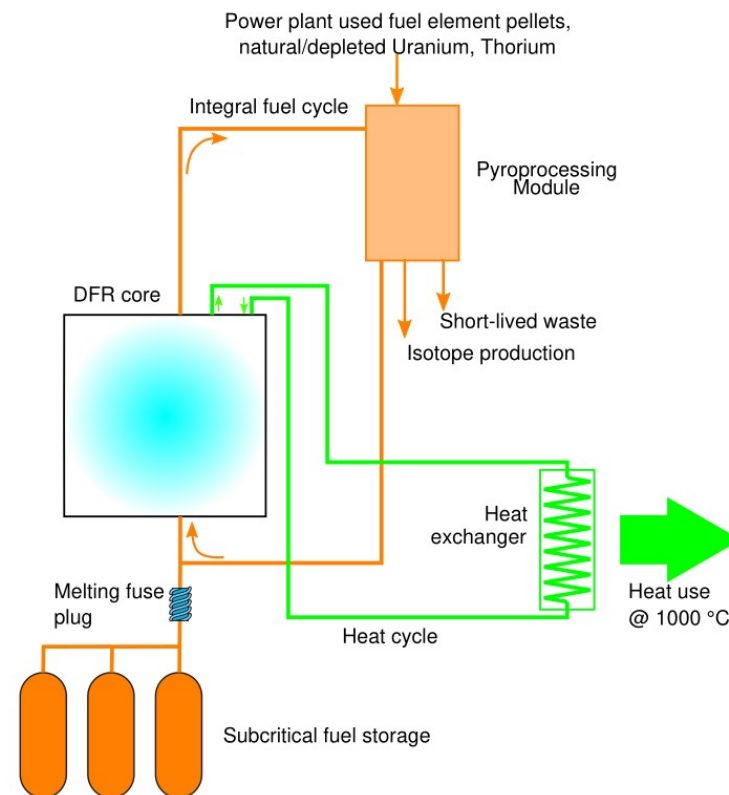
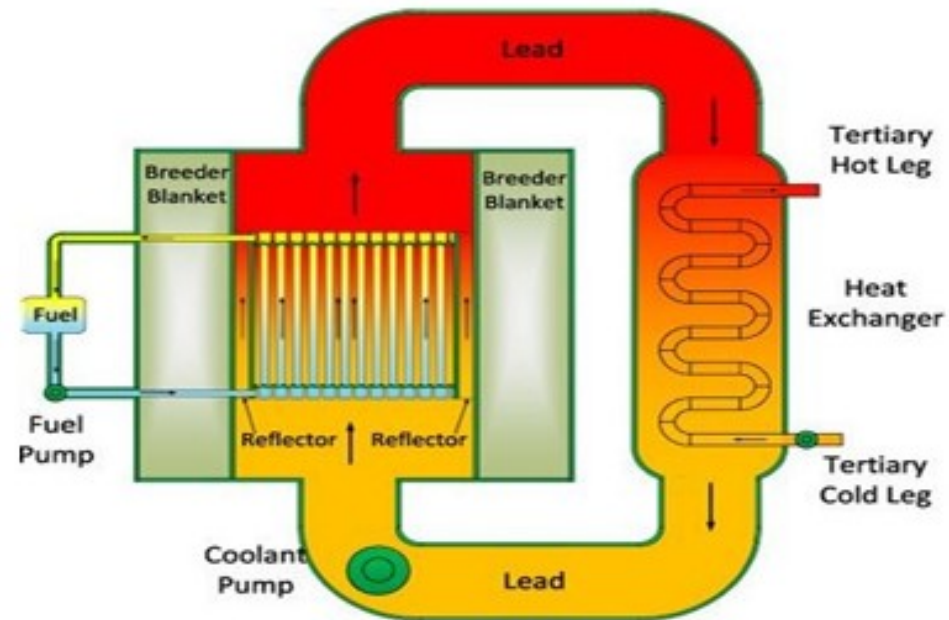


Figure 2. Dual Fluid reactor physical control loops

## Nochmals DualFluid-Reaktor, Core



# Projektplan, Dual-Fluid-Reaktor

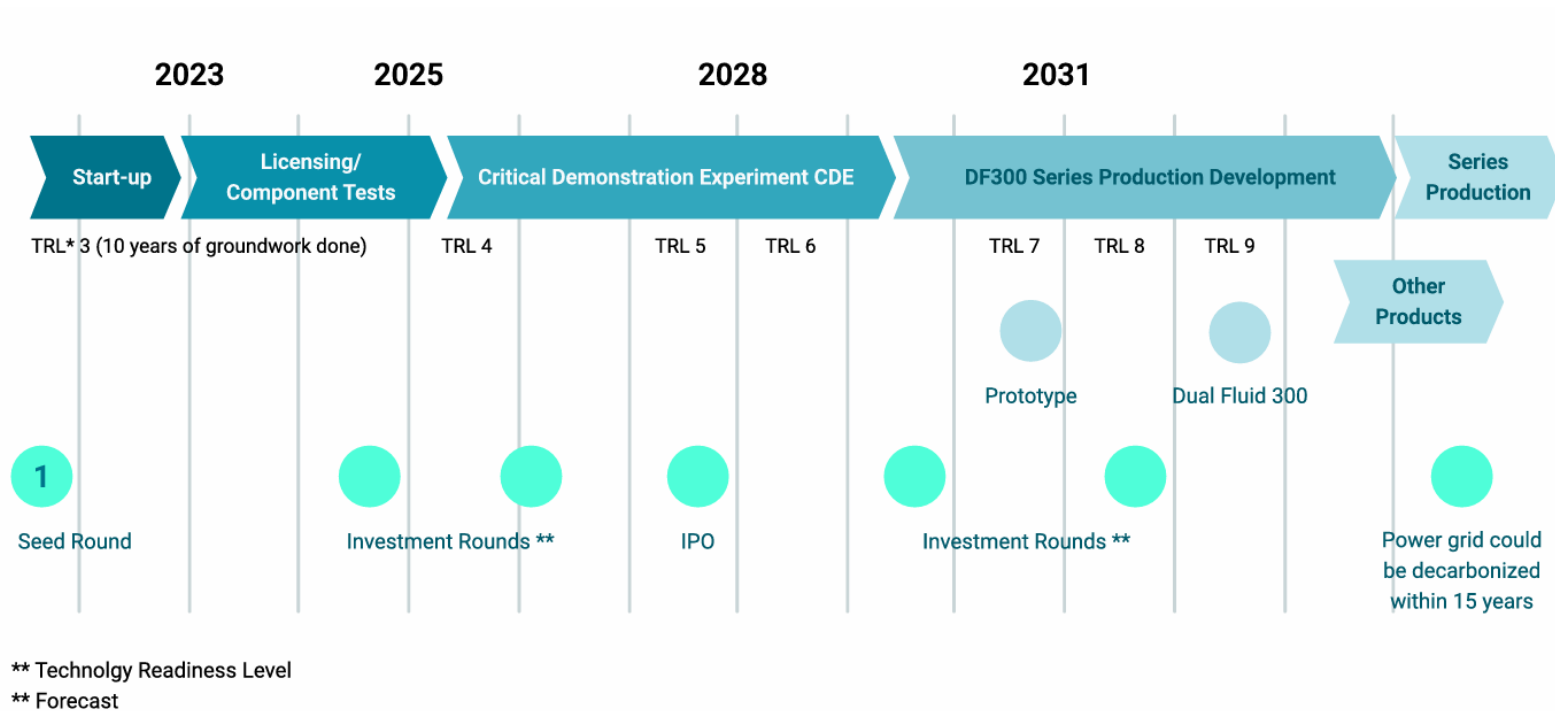
Erfindung: Institut für Festkörperphysik / Berlin

DualFluid Firmensitz in Vancouver / Canada

Versuchsreaktor in Ruanda / Ostafrika

Entwicklung von DF300 (300 MW SMR, Small Modular Reactor); DF1500, 1500 MW)

Projektplan



## Sehr attraktive Eigenschaften des DFR

- sehr kompakte Bauweise
- vereinigt Eigenschaften von Flüssigsalz- und Hochtemperatur-Reaktor
- inhärent sicher
- Transmutation langlebiger Nuklide (“Atom-Müll” zur Energiegewinnung)
- vielseitige Nutzung: Prozesswärme, Meerwasserentsalzung, synthetische Kraftstoffe, Nuklide für Nuklearmedizin
- SMR-Version möglich (small modular reactor, 300 MW)

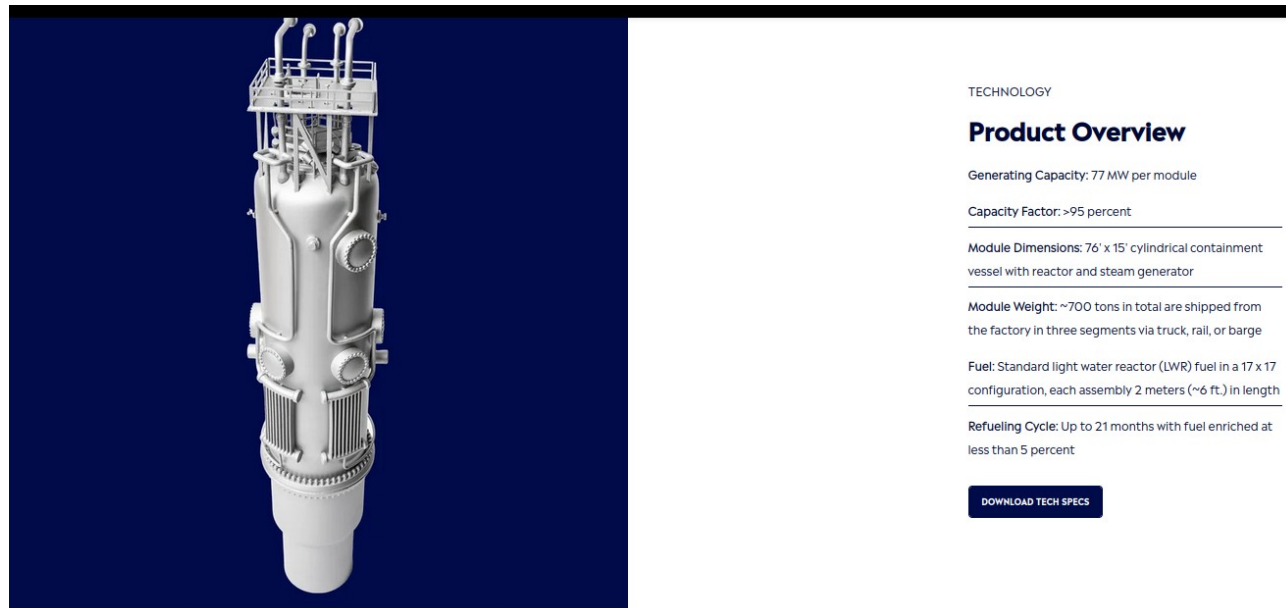


# Small Modular Reactors SMR Grundgedanke:

- “Small”: 5 MW bis 300 MW im Gegensatz zu üblichem Kraftwerksblock 1000 bis 1600 MW, lassen sich in einer Fabrik fertigen, große Stückzahl, Transport zum Einsatzort / Montage
- “Modular”: erweiterbar durch Hinzufügen weiterer Module, nach Bedarf
- Elektrizitätsversorgung direkt am Einsatzort: Rechenzentren (KI, Google, Amazon)
- entlegene Einsatzorte: Prozesswärme / Chemie; Militär / entlegene Einsatzorte; transportable Reaktoren
- Investition geringer: durch Wirtschaftsunternehmen, nicht unbedingt staatlich

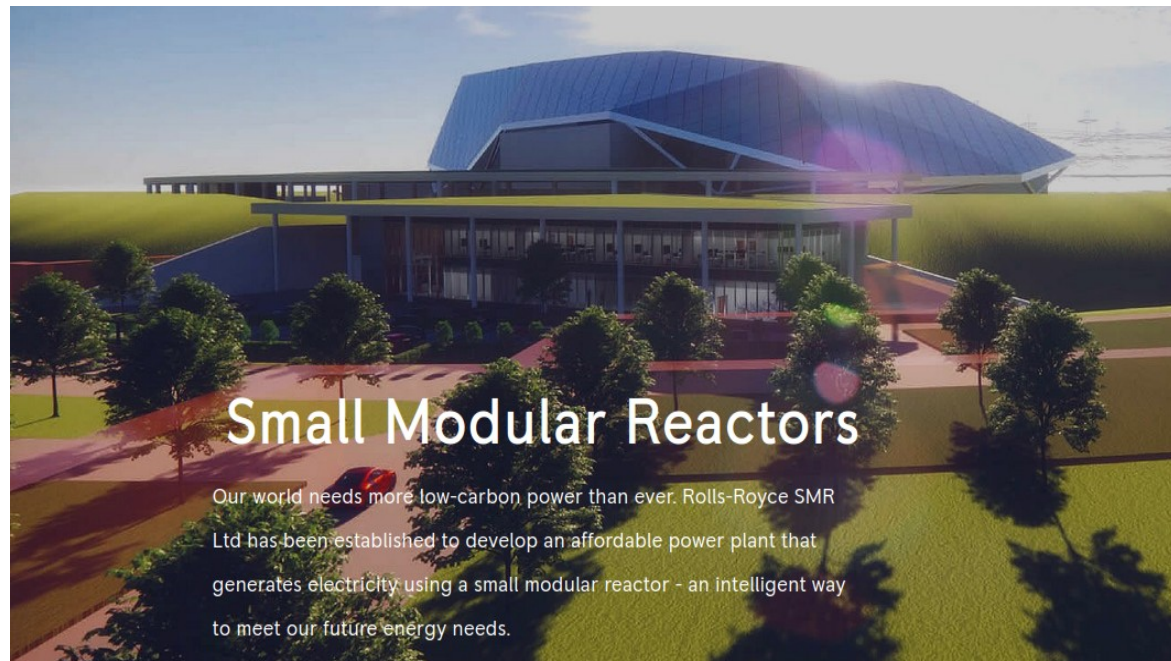
Eines der ersten zugelassenen SMR; Nuscale

77 MWe  
23 m x 4,6 m  
UO<sub>2</sub>, 4,5 % angereichert  
Druckwasser-Reaktor



Inzwischen zahlreiche Entwickler, Start-ups, Kooperationen

- Rolls-Royce / UK-Regierung / SiemensEnergy; Interesse aus Polen, Tschechien, Schweden
- GeneralElectric / Hitachi
- Google / Kairos-Power
- Amazon / Dominion Energy



# SMR-Entwicklung Übersicht

## SMR-Hersteller

---

SMRs werden sowohl von bekannten als auch von neuen Unternehmen angeboten und beworben. Dazu zählen z. B.,

- *China Nuclear Power Engineering Group* (Teil der CNNC) (ACP100)<sup>[10][11]</sup>
- Die neue Firma Copenhagen Atomics arbeitet an einem kleinen, modularen Thorium-Flüssigsalzreaktor (100 MWth)<sup>[12]</sup>
- Doosan (SMART)<sup>[13]</sup>
- Framatome (LW-SMR)
- Holtec International (SMR-160)
- NuScale (VOYGR)<sup>[14]</sup>
- Rolls-Royce SMR
- Toshiba Energy Systems & Solutions (verschiedene Designs/Studien)<sup>[15]</sup>
- Westinghouse (AP300)<sup>[16]</sup>

## Reaktortypen

---

In der Studie GRS 376 (siehe unten) wurden über 69 SMR-Konzepte identifiziert, darunter die Verteilung auf die folgenden Reaktortypen:

- 32 Leichtwasserreaktoren (LWR)
- 22 flüssigmetallgekühlte Brutreaktoren (LMR)
- 2 Schwerwasserreaktoren (HWR)
- 9 gasgekühlte Hochtemperaturreaktoren (GCR)
- 4 Flüssigsalzreaktoren (MSR)

Rechenzentren / KI sehr stromintensiv; daher SMR unmittelbar vor Ort

ALLIANZ UM ATOMSTROM

## Google setzt auf Kernenergie

Von Roland Lindner

15.10.2024, 21:35 Lesezeit: 3 Min.



**Der Internetkonzern schließt ein Bündnis zum Bau kleiner Reaktoren. Es ist die jüngste in einer Serie von Initiativen rund um Atomstrom in der Technologiebranche.**

## Kritik:

- so “small” sind die zahlreichen SMR-Ansätze gar nicht
- noch erheblicher Entwicklungsaufwand erforderlich bis zur Serienreife
- technologisch immer noch Druck- und Siedewasser-Reaktortechniken

Es gibt auch GenerationIV-SMR-Konzepte

- copenhagenatomics / Thorium-Brutreaktor; s. BfT 2024
- Dual-Fluid-Reaktor DFR300

## **Schlussfolgerungen für unser Land**

- Wir sind energiepolitisch völlig isoliert, wir verlieren den Anschluss und die Wettbewerbsfähigkeit
- Aufhebung der politischen Blockade gegenüber Kernenergie dringend erforderlich
- unsere Energiewende ist gescheitert (an der Physik), Förderung und Ausbau der “Erneuerbaren” beenden

### **Wiedereinstieg in Kernenergie:**

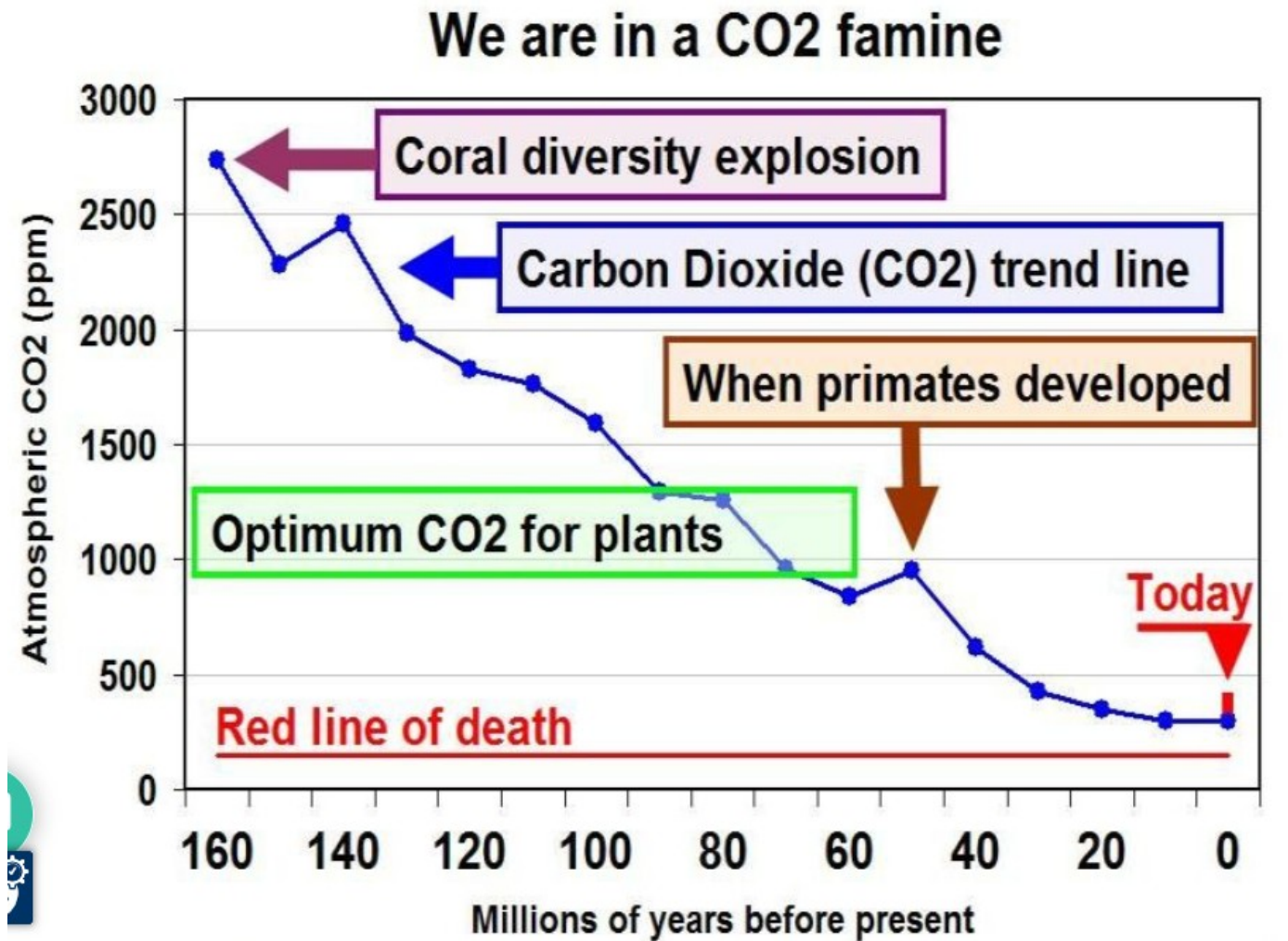
- Wieder-Inbetriebnahme abgeschalteter Kraftwerke oder Ersatz durch neuere GenIII+-Kraftwerke
- Zusammenarbeit weltweit und insbesondere mit europäischen Partnern => Vorbild Airbus

### **Besonders aussichtsreicher Pfad des Wiedereinstiegs**

- MSR (Flüssigsalzreaktor) entsprechend OakridgeNL /IdahoNL und Euratom
- DualFluidReaktor



## Nachtrag: CO<sub>2</sub> Verarmung über geologische Zeiträume



CO<sub>2</sub> data: Berner: 2001

created by: J. Shewchuk, 2025