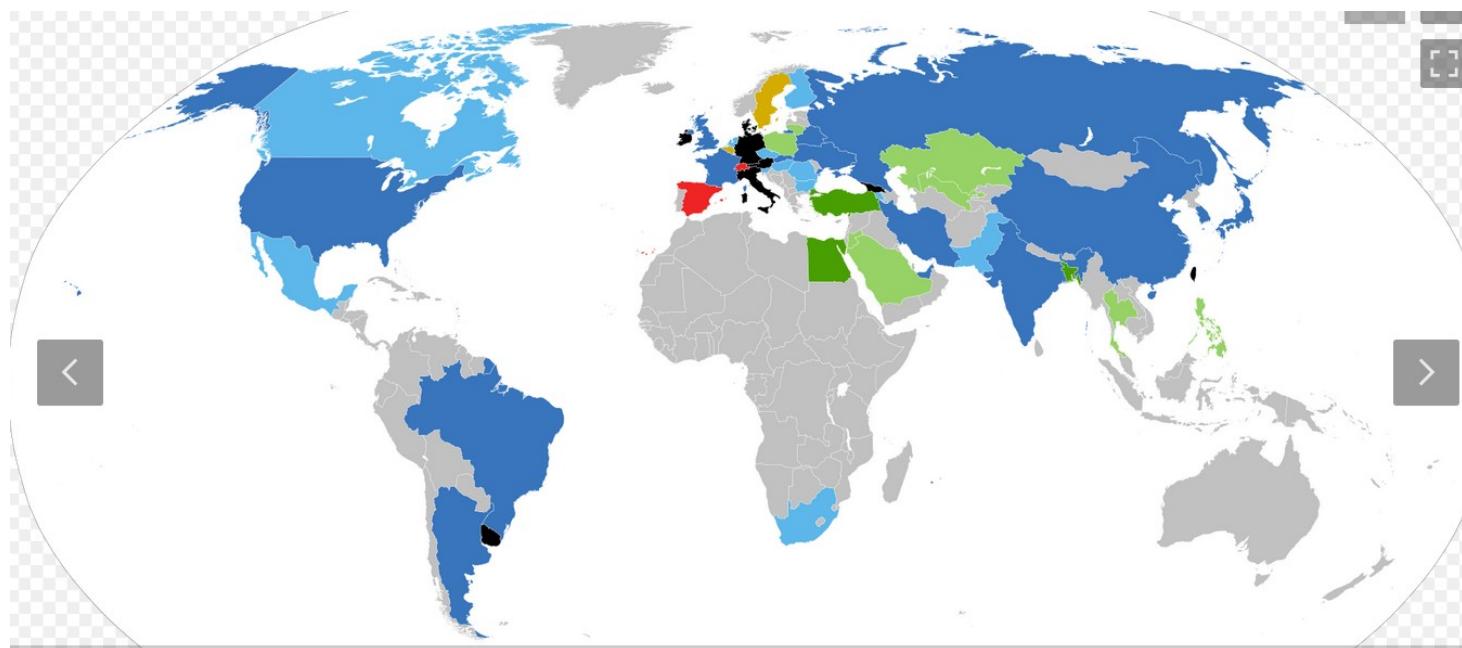


Tagung Bürger für Technik, 25. / 26. Okt. 2025, Magdeburg

Heinrich Lindner

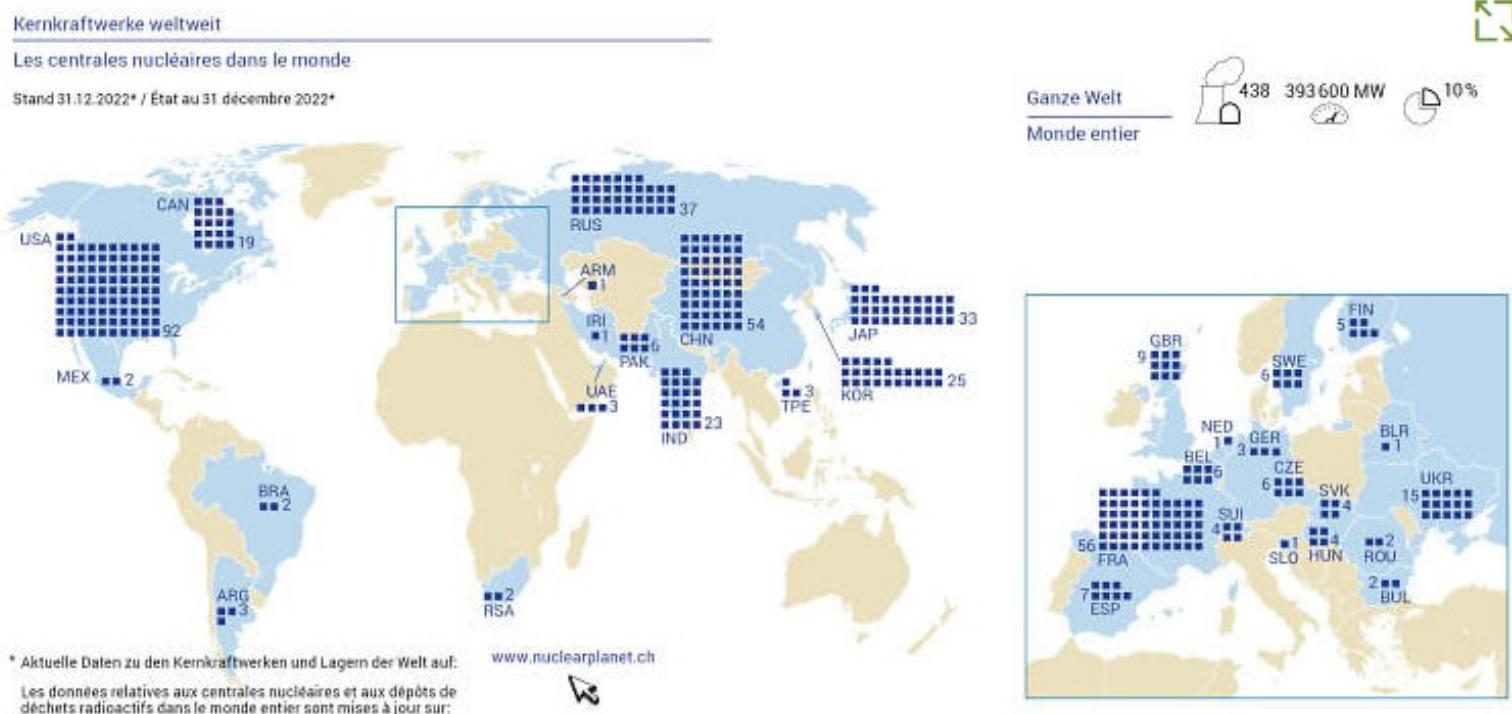
Kernenergie: Rückblick und Blick in die Zukunft

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 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





12

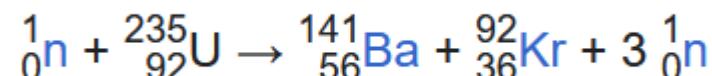
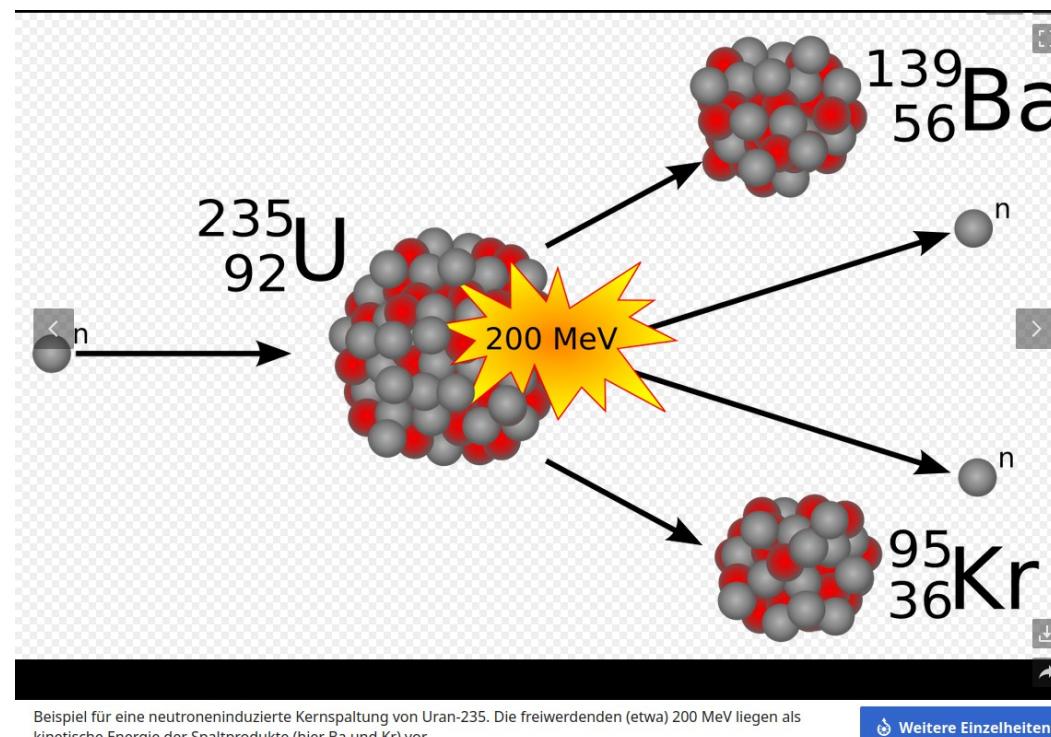
Die Physik lässt sich nicht aufheben

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

Ungeeignet für ein dichtbesiedeltes Industrieland

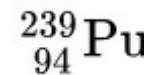
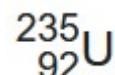
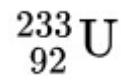
Kurze Erinnerung an die Kernphysik:
induzierte Kernspaltung;
Kettenreaktion wegen $n \rightarrow 2 n$ oder $3 n$

Entdeckung Otto Hahn / Fritz Strassmann / Lise Meitner 1938

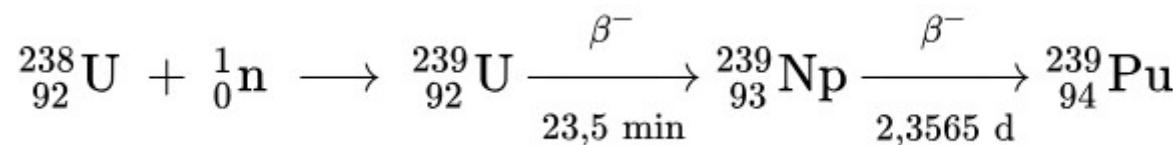
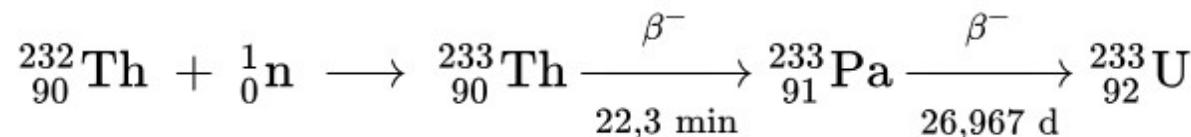


U-235 nur zu 0,7 % im Natur-Uran enthalten,
99,3 % U-238 nicht induziert spaltbar

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-BeF₂-ZrF₄-UF₄ (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 / Tennessee

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

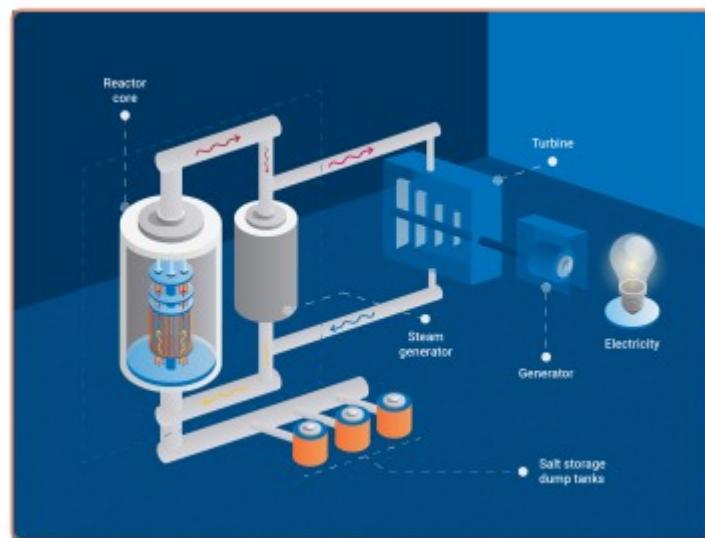


The MSRE control room.

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

Prinzip Flüssigsalzreaktor

- Salzschorze / Fluoride
- Salzschorze mit Pumpe umgewälzt => Abtransport Wärme
- Spaltbares Material / Uranoxid in der Salzschorze 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
GenIII+Reaktor”

/

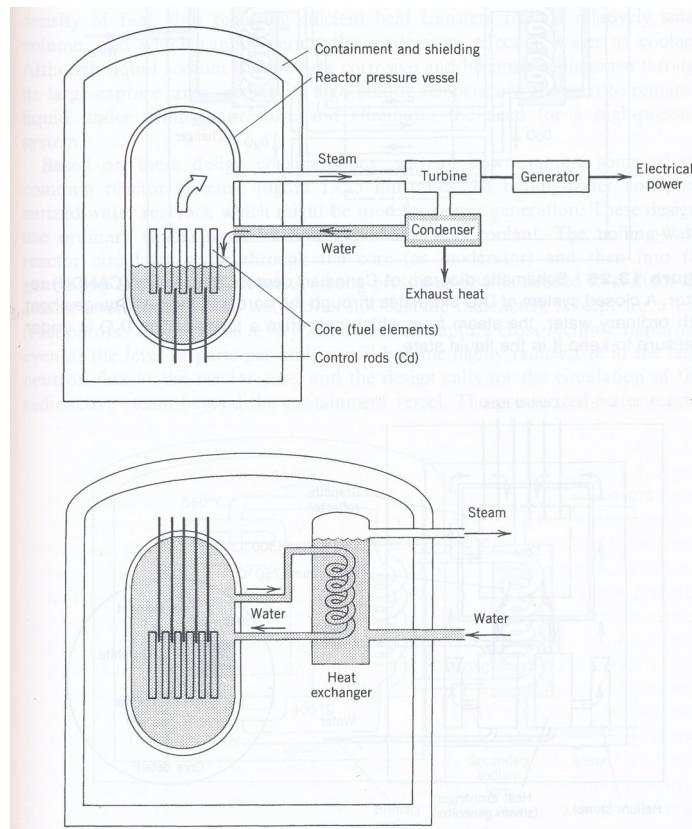
Westinghouse

fortgeschrittenster

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 Nuklidkarte 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

Verteilung

Geschichte

Verbindungen

92, Uran (U)

Uranium, Uranos (gr. Mythologie), Planet Uranus

Isotope:

Anzahl bekannter Nuklide: 34

Anzahl Kernisomere: 8

Anzahl natürlicher Nuklide: 3

Anzahl stabiler Nuklide: 0

Stabilität:

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

>Liste der Nuklide:

^{217}U	^{218}U	^{218m}U (2.105 MeV)	^{219}U	^{220}U	^{221}U	^{222}U	^{223}U
^{224}U	^{225}U	^{226}U	^{227}U	^{228}U	^{229}U	^{230}U	^{231}U
^{232}U	^{233}U	^{234}U	^{234m}U (1.4213 MeV)	^{235}U	^{235m}U (0.0785 MeV)	^{236}U	^{236m}U (1.0529 MeV)
^{236m}U (2.75 MeV)	^{237}U	^{238}U	^{238m}U (2.5579 MeV)	^{239}U	^{239m}U (0.02 MeV)	^{239m}U (0.1338 MeV)	^{240}U
^{241}U	^{242}U						

Legende:

β^+ -Emitter μ -Emitter K-Einfänger	Doppelter K-Einfänger	Stabiles Nuklid	Doppelter β^- -Emitter	β^- -Emitter μ -Emitter	α -Emitter	Cluster-Emitter	Spontanspaltung
---	-----------------------	-----------------	------------------------------	--------------------------------------	-------------------	-----------------	-----------------



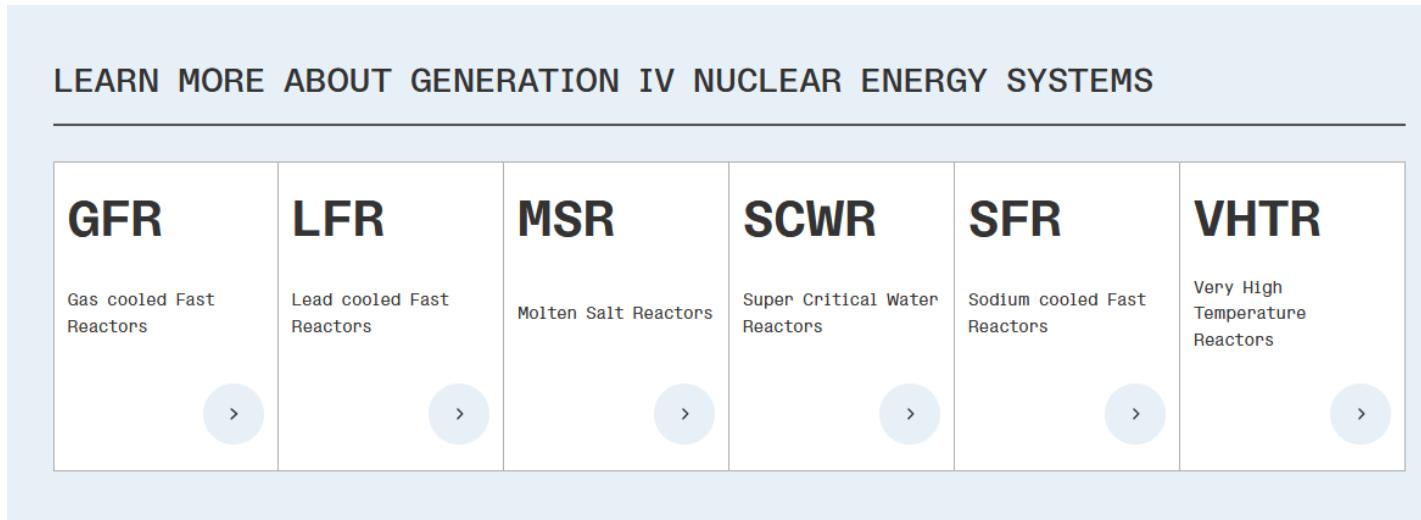
Pr	Nd	Pm
Pa	U	Np

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“)

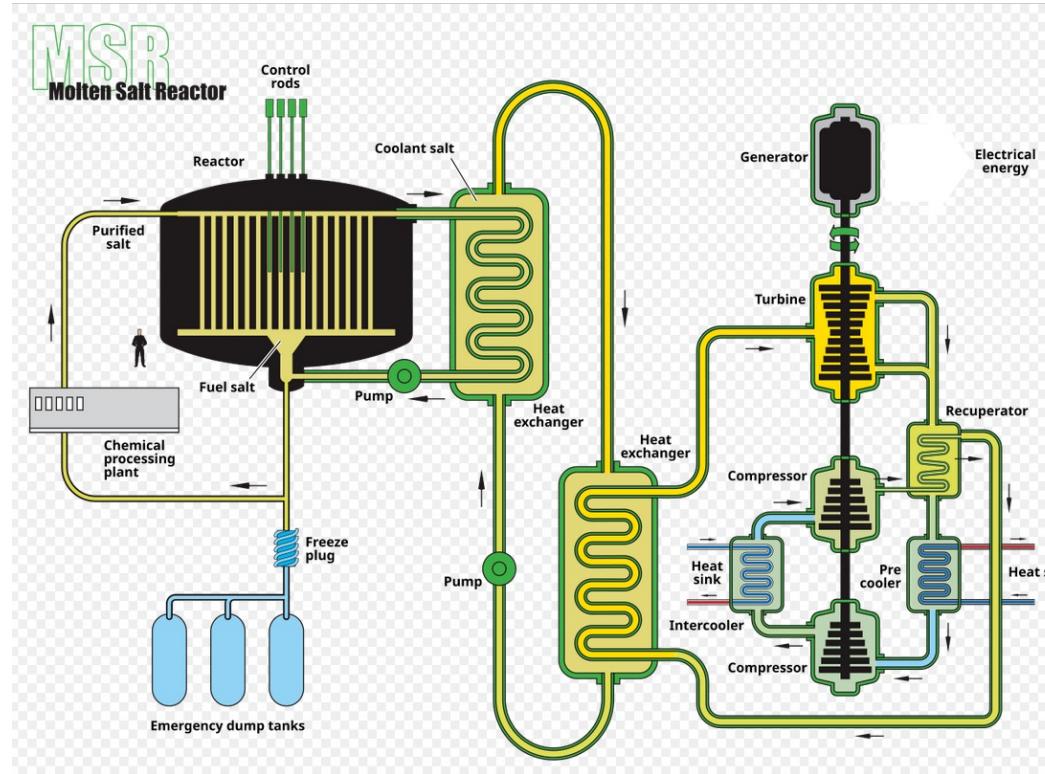
Generation IV International Forum,

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

Euratom-Studie SMR

Strategie über die Zeit

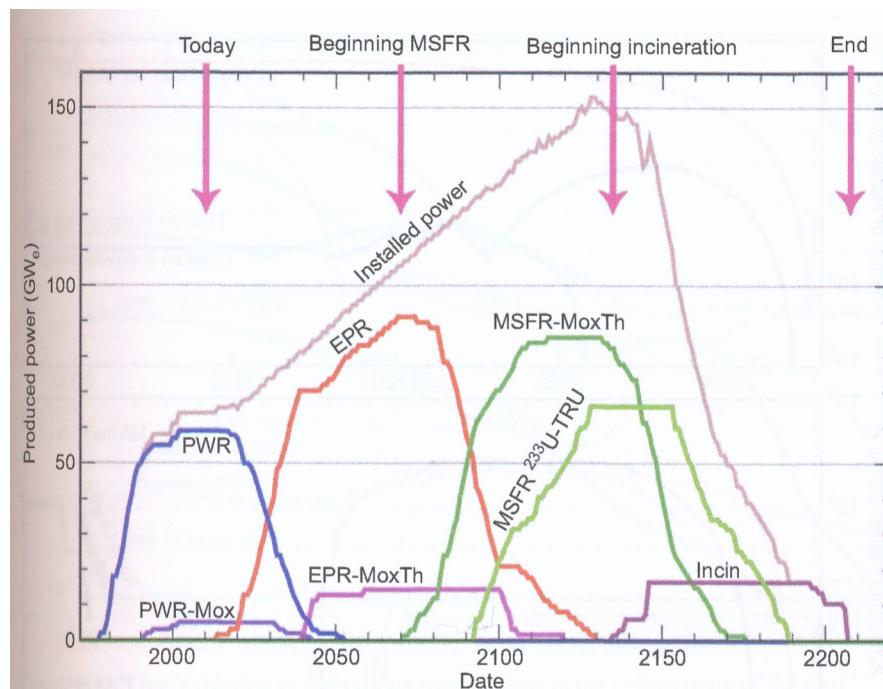


Figure 7.10 French nuclear power deployment exercise based on pressurized water reactors (PWRs), evolutionary power reactors (EPRs), and molten salt fast reactors (MSFRs).

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

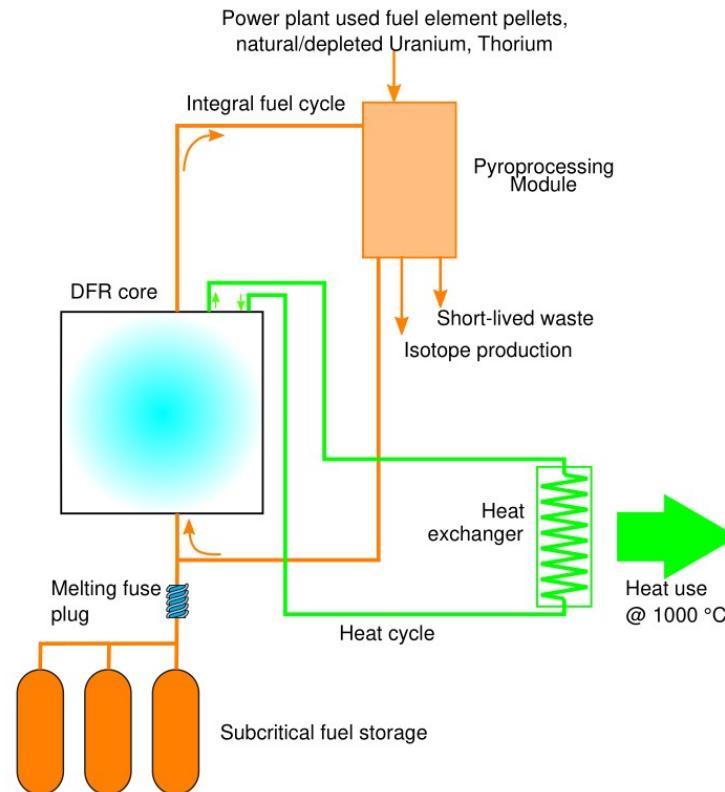
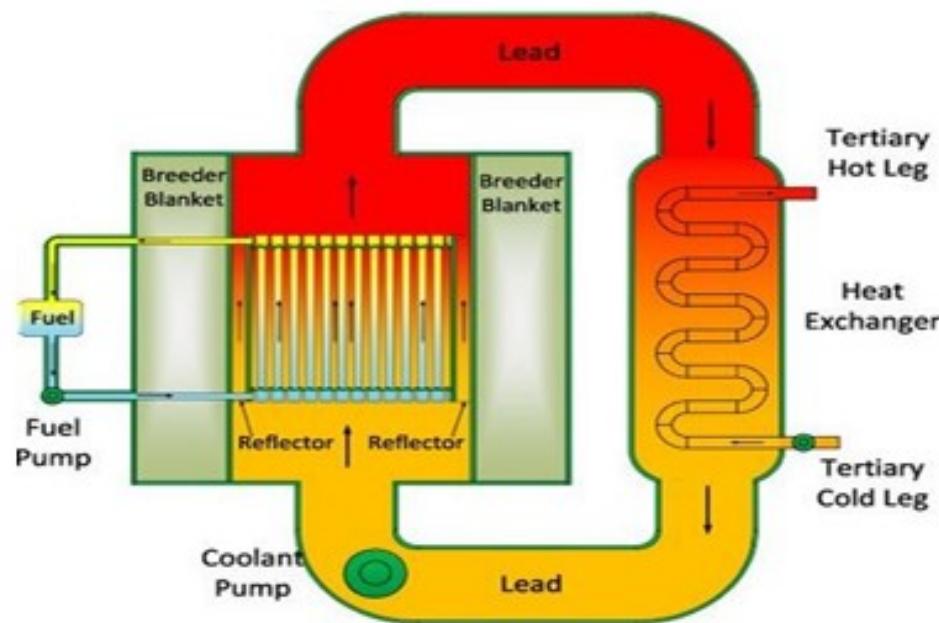


Figure 2. Dual Fluid reactor physical control loops

Nochmals DualFluid-Reaktor, Core



Projektplan, Dual-Fluid-Reaktor

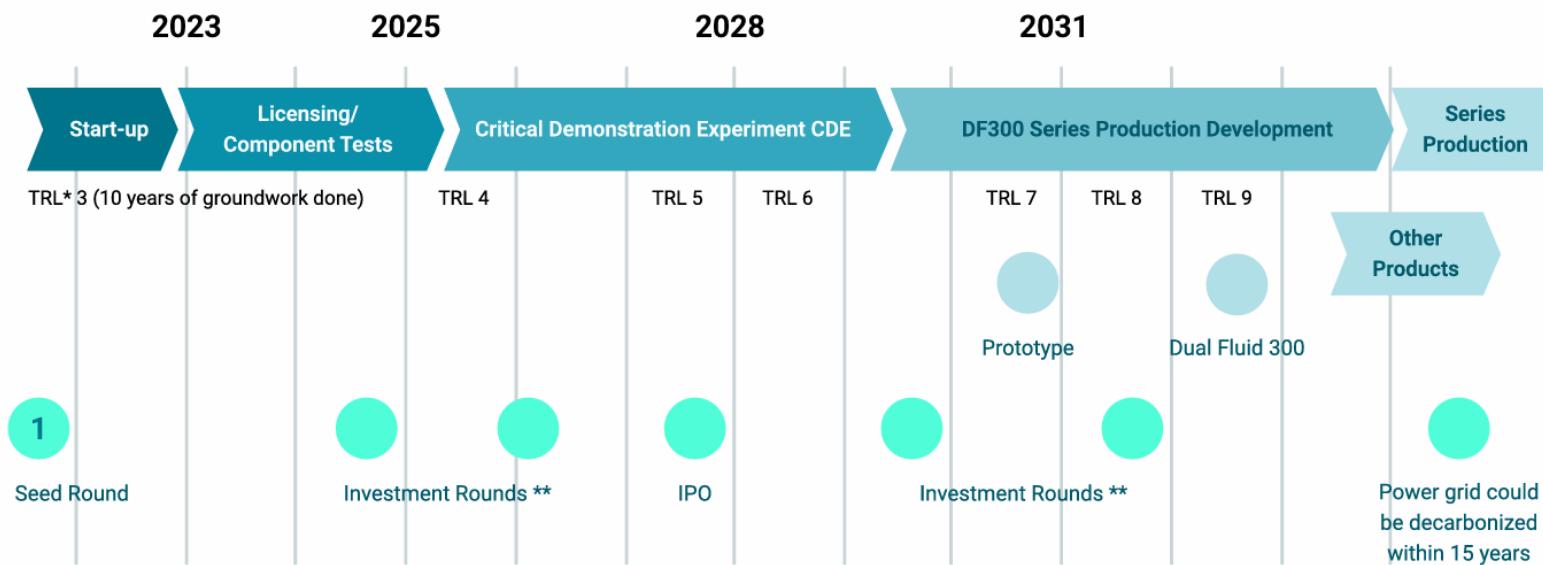
Erfindung: Institut für Festkörperphysik / Berlin

DualFluid Firmensitz in Vancouver / Canada

Versuchsreaktor in Ruanda / Ostafrika

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

Projektplan



** Technology Readiness Level

** Forecast

Sehr attraktive Eigenschaften des DFR

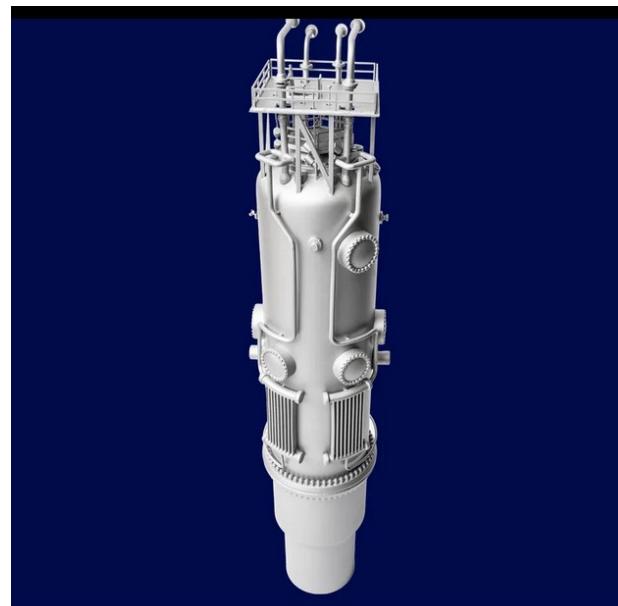
- sehr kompakte Bauweise
- vereinigt Eigenschaften von Flüssigsalz- und Hochtemperatur-Reaktor
- inhärent sicher
- Transmutation langlebiger Nuklide (“Atom-Müll” zur Energiegewinnung)
- vielseitige Nutzung: Prozesswärme, Meerwasserentsalzung, synthetische Kraftstoffe, Nuklide für Nuklearmedizin
- SMR-Version 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
UO₂, 4,5 % angereichert
Druckwasser-Reaktor



TECHNOLOGY

Product Overview

Generating Capacity: 77 MW per module

Capacity Factor: >95 percent

Module Dimensions: 76' x 15' cylindrical containment vessel with reactor and steam generator

Module Weight: ~700 tons in total are shipped from the factory in three segments via truck, rail, or barge

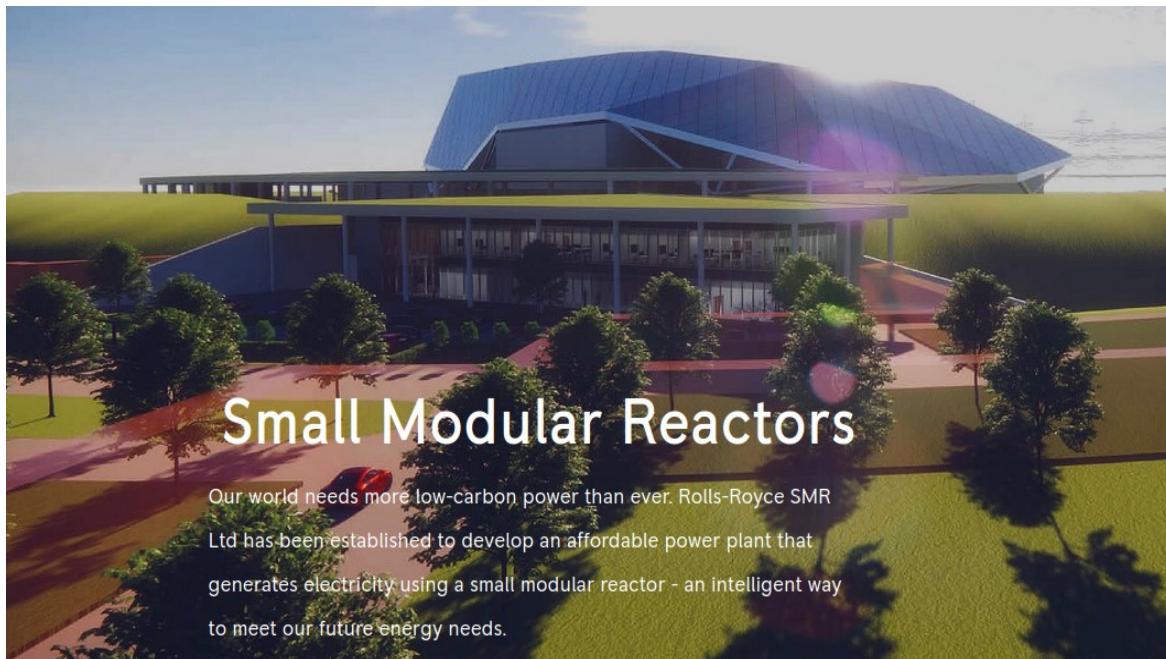
Fuel: Standard light water reactor (LWR) fuel in a 17 x 17 configuration, each assembly 2 meters (~6 ft.) in length

Refueling Cycle: Up to 21 months with fuel enriched at less than 5 percent

[DOWNLOAD TECH SPECS](#)

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)^{[10][11]}
- Die neue Firma *Copenhagen Atomics* arbeitet an einem kleinen, modularen *Thorium-Flüssigsalzreaktor* (100 MWth)^[12]
- *Doosan (SMART)*^[13]
- *Framatome (LW-SMR)*
- *Holtec International (SMR-160)*
- *NuScale (VOYGR)*^[14]
- *Rolls-Royce SMR*
- *Toshiba Energy Systems & Solutions* (verschiedene Designs/Studien)^[15]
- *Westinghouse (AP300)*^[16]

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

- copenhagenomics / 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: CO₂ Verarmung über geologische Zeiträume

