

Kernspaltungskraftwerke- ein Auslaufmodell – eine Brücken- oder gar Zukunftstechnologie ?

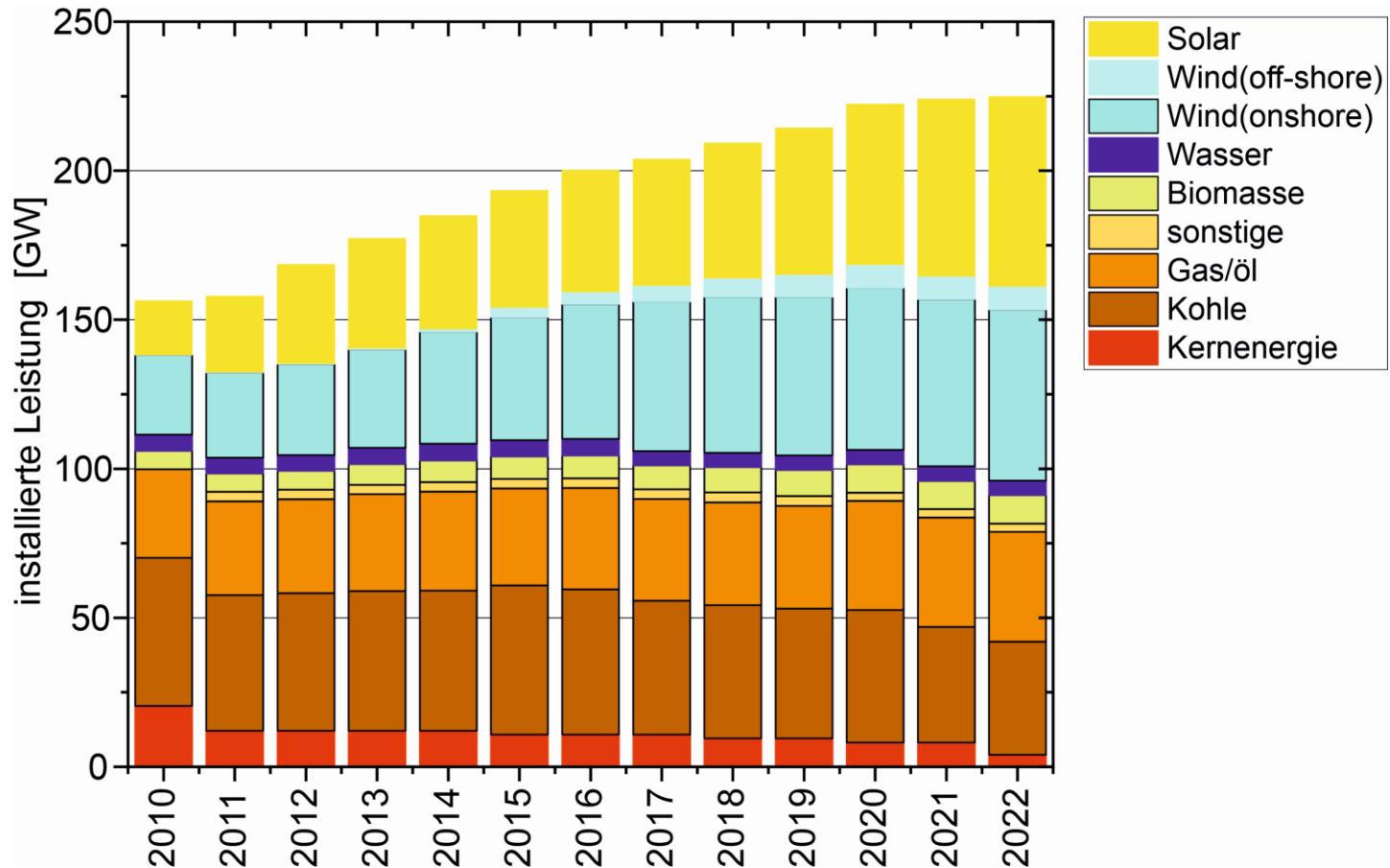
R. Stieglitz, Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik (INR)



- **NetZero - das Dilemma der CO_2 -Rechnung ?**
- **Stand Kernenergie heute**
- **Randbedingungen für Kernkraftwerke oder die Frage große Kraftwerke vs. flexible kleine Reaktoren (Grundlast) - (small medium sized reactors -SMR)**
 - **Ökonomie - Was kosten Reaktoren ?**
 - **Randbedingungen zur Nutzung der Kernspaltung ?**
- **Sicherheit von Kernkraftwerken**
 - **Sicherheitsnachweis und Designsicherheit**
 - **Robustheit gegen schwere Störfälle**
- **Aktuelle Reaktortrends (Leichtwasserreaktoren, SMR, Generation-4)**
- **Radioaktiver Abfall (Wieviel endlagern, was bietet Transmutation?)**
- **Feststellungen und Perspektiven**

Ein Blick nach Deutschland –letzte Dekade

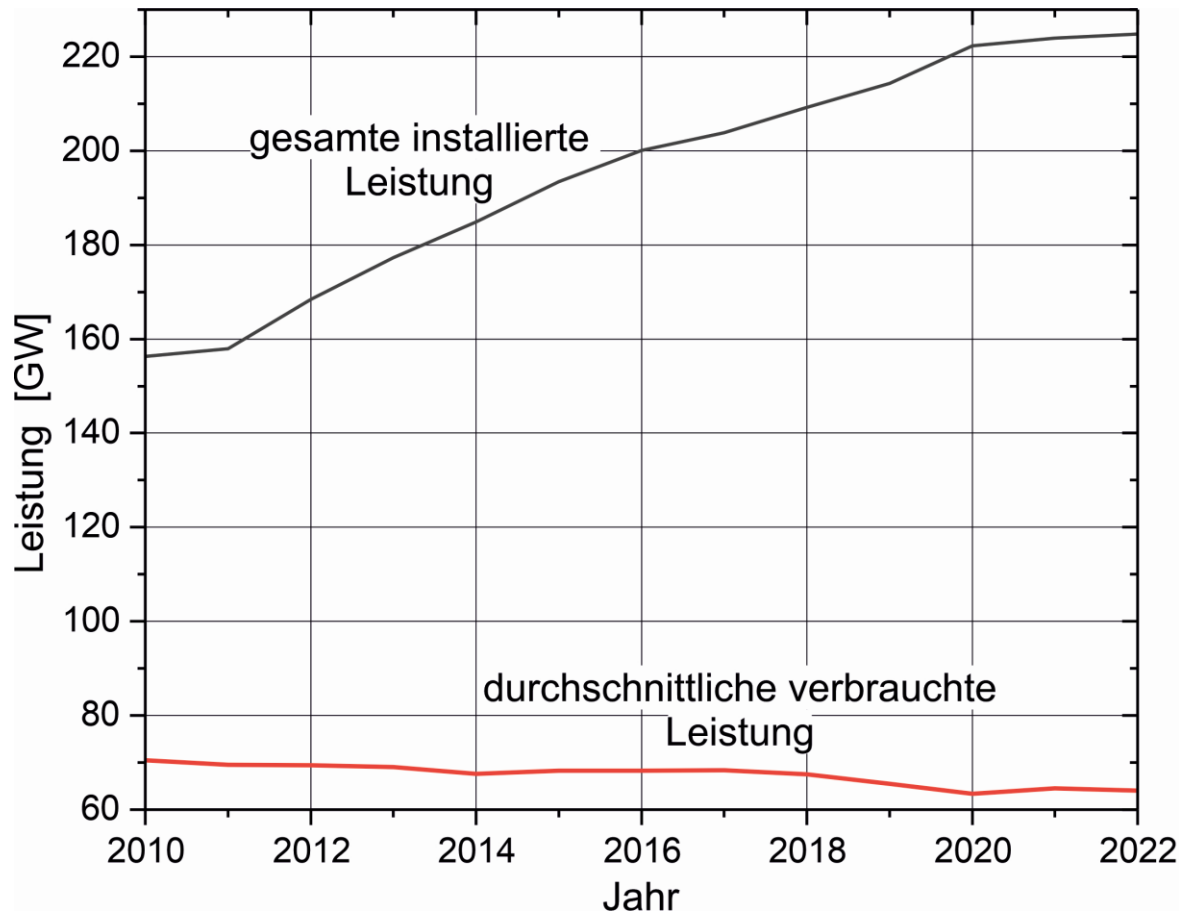
■ Entwicklung der installierten Stromerzeugungsleistung



➔ massiver Anstieg der installierten Leistung der erneuerbaren Energien

Ein Blick nach Deutschland –letzte Dekade

- Bisher im wesentlichen Substituierung fossiler Träger



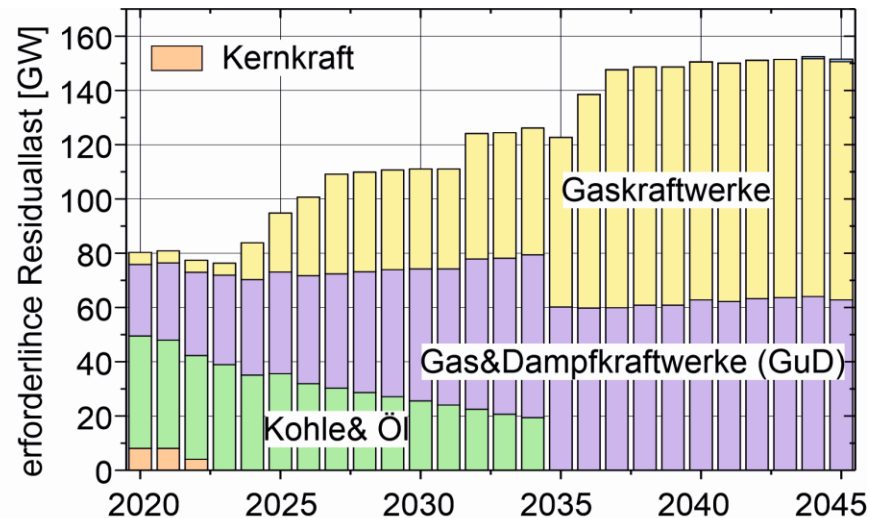
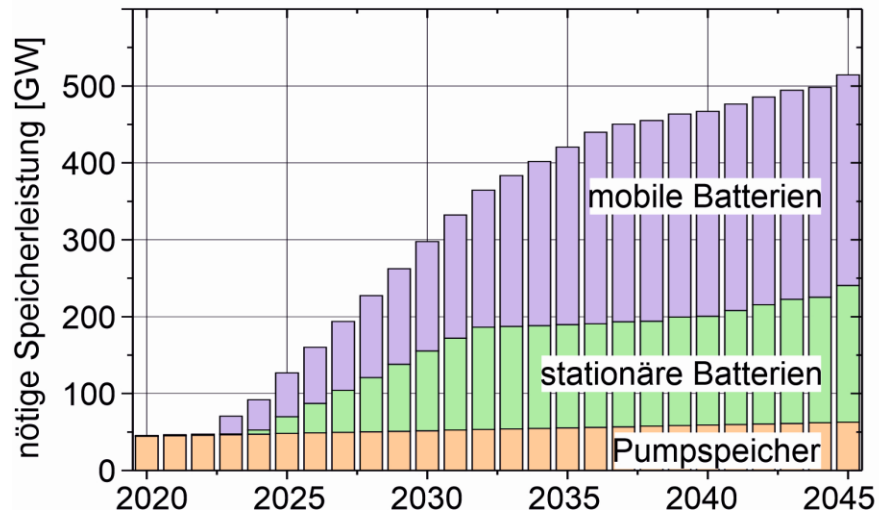
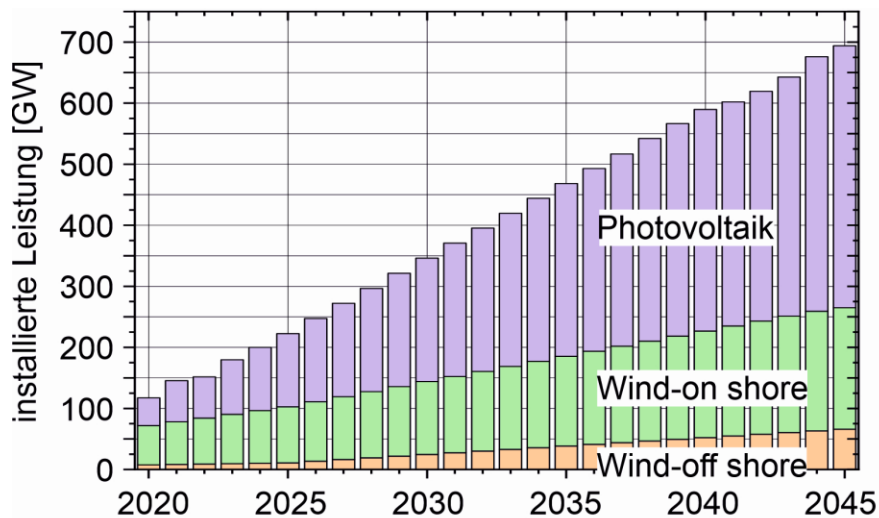
- marginale Einsparungen (trotz Produktivitätssteigerungen)
- dramatischer Zuwachs installierter elektr. Leistung

- Einhaltung der Klimaziele (Paris –Abkommen zum 1.5°C Ziel 2050)
- massiver Ausbau der Erneuerbaren Energien
- ➔ Elektrifizierung der Sektoren (Industrie, Verkehr, Handel & Dienstleistung)
- ➔ Sektorkopplung (Power to Heat-P2H, Power to Gas Liquid-P2G/L)
- ➔ Back-up durch Ausbau Speichertechnologien
- ➔ Umbau der Wärmeversorgung (Haushalte & Industrie)

Zusätzliches Bonbon für Deutschland

- + spezifische deutsche Randbedingungen
 - Kernenergieausstieg 2022
 - Kohleausstieg 2038 (forciertes Ausstiegziel bis 2030)

Erforderliches Ausbauprogramm zur CO_2 -Emissionsreduktion



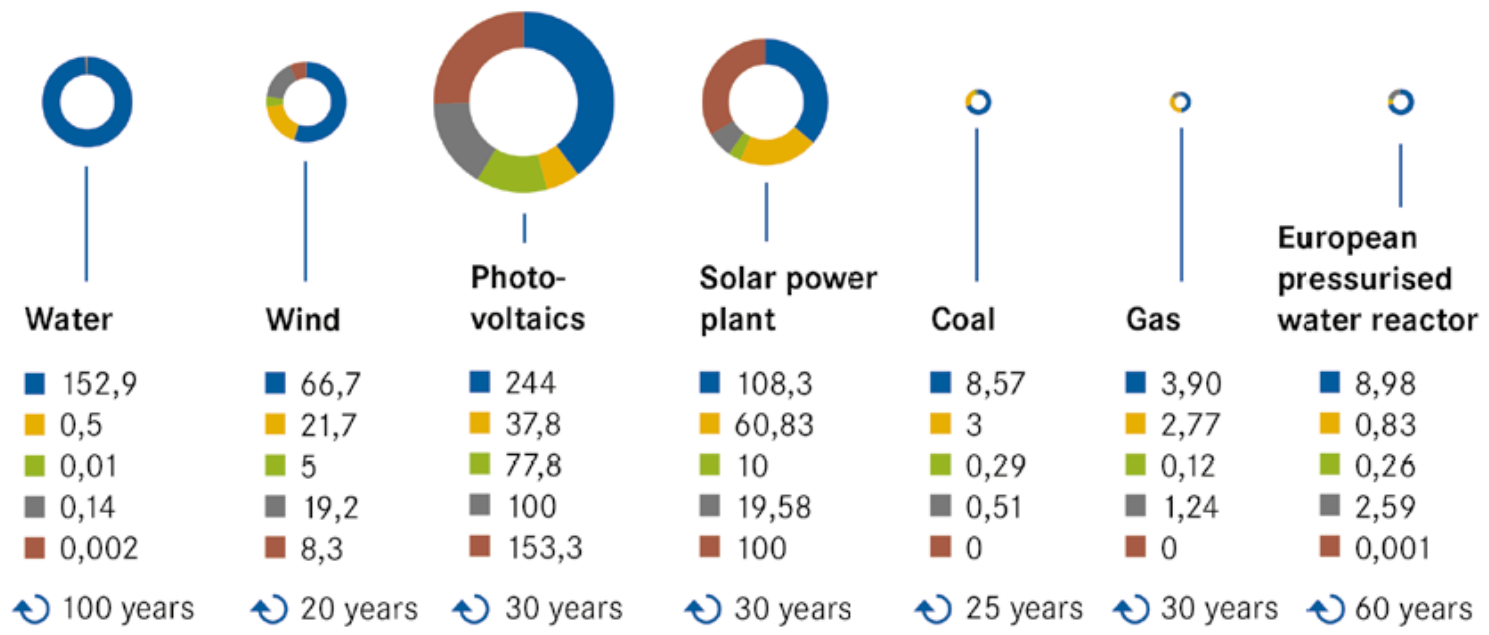
Erreichung der Klimaziele sofern

- Zubau von mind. $30GW/a$ an EE
- Aufstockung Gaskraftwerke um Faktor 5
- Etablierung Speicherarchitektur in erheblichen Umfang
- Einführung Wasserstoffwirtschaft
- ➔ **Ist das Klimaneutral ?**

Jede Erzeugungstechnologie hat einen CO₂-Fussabdruck

Grundlage (von der „Wiege bis zur Bahre“ Prinzip)

- jedes Produkt hat einen CO₂-Wert (graue Energie des Rohstoffvektors)
- Rohstoffvektor der jeweiligen Erzeugungstechnologie (t/MW_a)

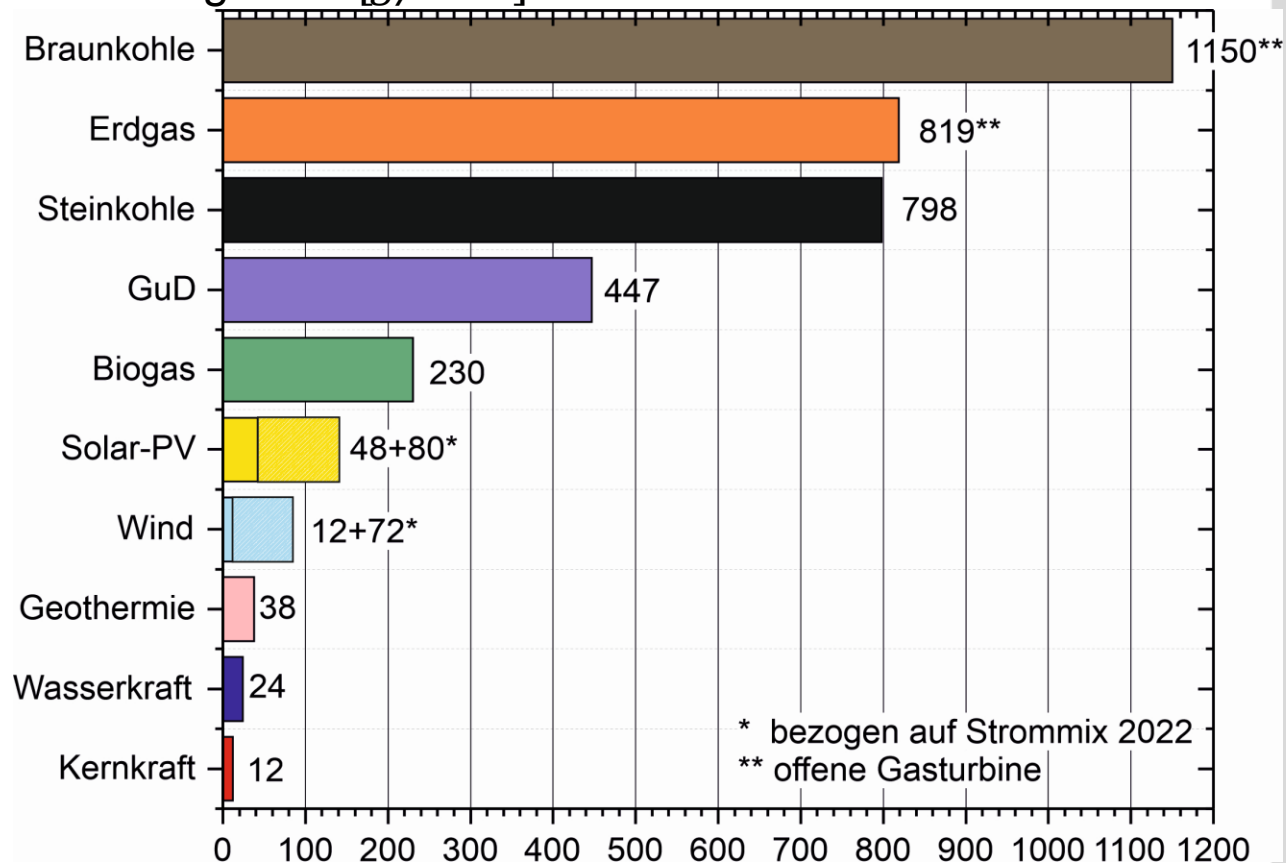


■ Concrete ■ Iron ■ Aluminium (x10) ■ Copper (x100) ■ Glass (x10) Data in t/MW*year | ↻ Lifespan

■ Kernkraft bei CO₂-armen Technologien beim Rohstoffvektor kompetitiv

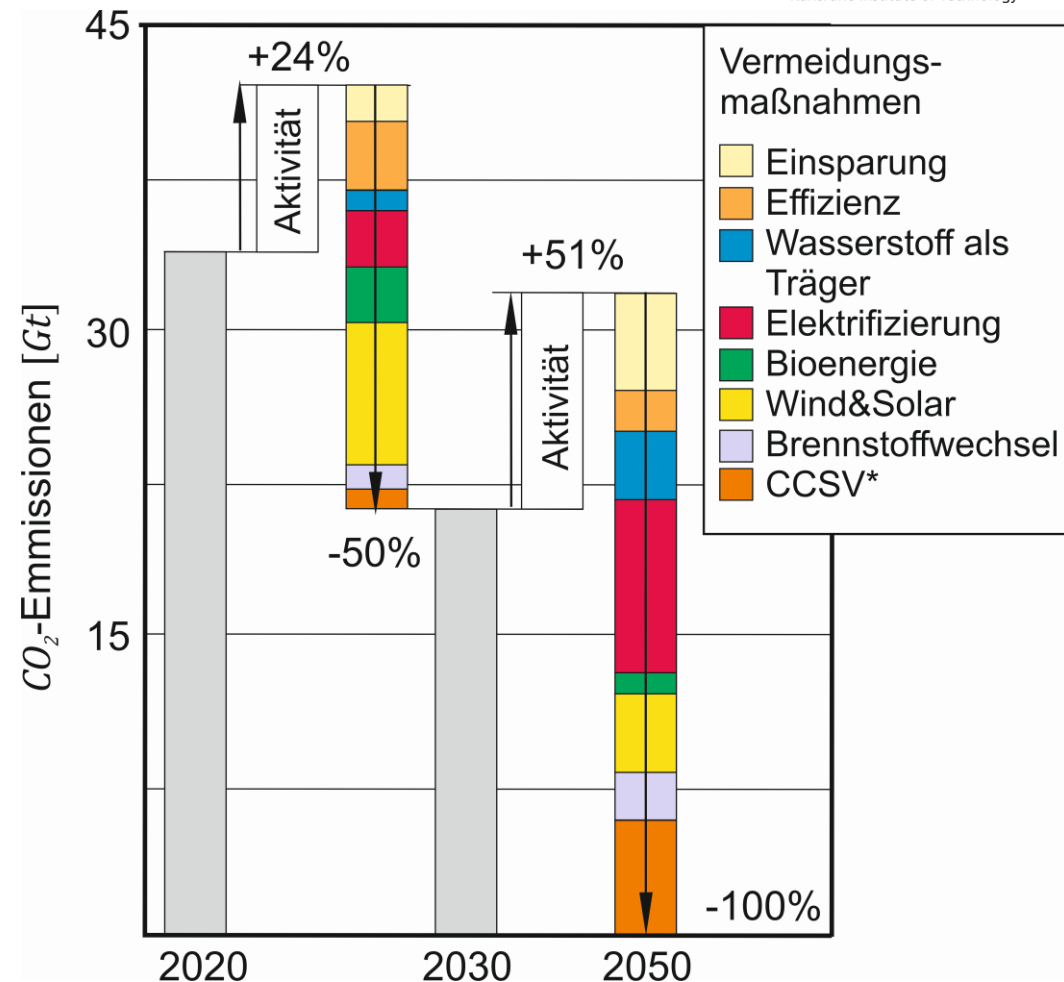
CO₂-Fussabdruck erneuerbarer Energien

- Versorgungssicherheit bedeutet 24/7 -Stromverfügbarkeit
 - Treibhausgas-Emissionen erneuerbarer Energien erhöhen sich durch residuale (fossile) Kraftwerke (Bereitstellung Residuallast)
 - CO₂-Fussabdruck der Speichertechnologien
 - Netzausbau-, verlustanteile
- Reale CO₂-Emission* der Technologien in [g/kWh]



International-Was bedeutet Netto Null- CO_2 -Emission ?

- Lediglich über **kombinierte Maßnahmen** erreichbar

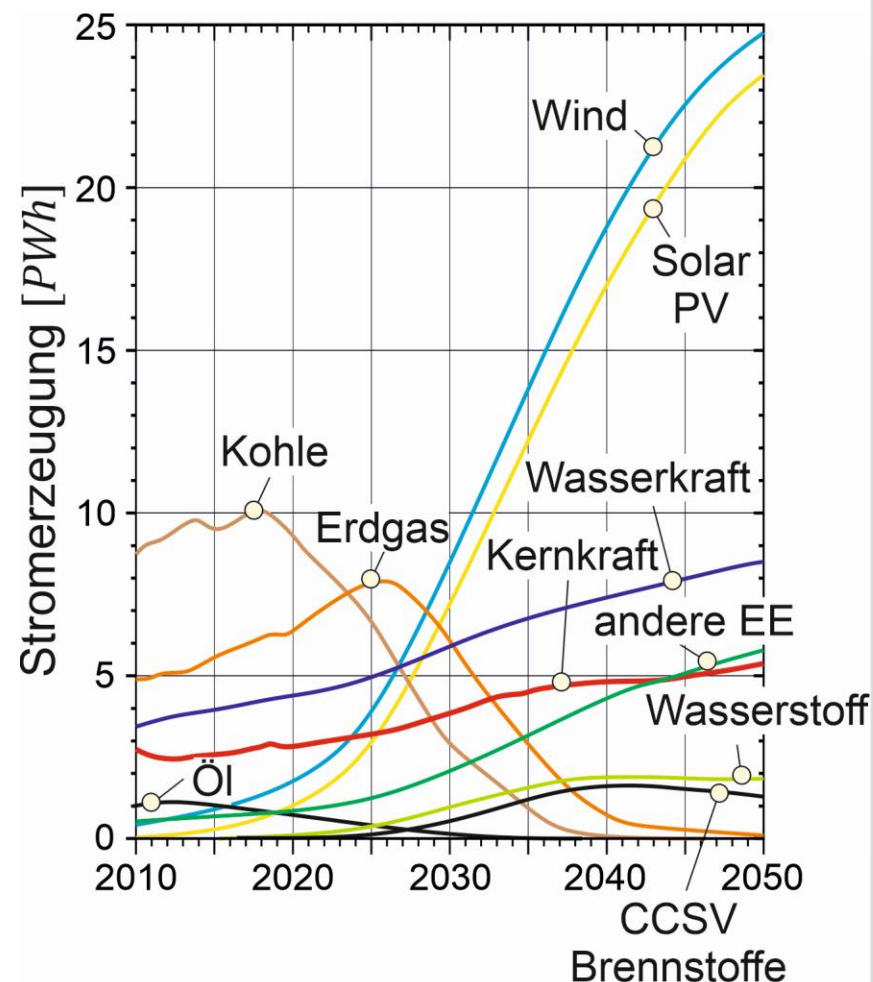


Konsequenzen:

- mit zunehmender Nähe zu 2050 wird die Elektrifizierung wichtiger
- Eliminierung einer (beliebigen CO_2 -armen) Technologie erschwert Erreichung des Klimaziels

International – NetZero beinhaltet Kernenergie !

- Kernenergie = bedeutenden Beitrag zu NetZero
 - ➔ 40% Steigerung des AKW Baus bis 2030 ,
 - ➔ Verdoppelung bis 2050, aber
 - ➔ Anteil an Stromerzeugung $\approx 10\%$.
- Ausbau EE + Netztransformation erfordert in Industriestaaten Konzentration auf kleine modulare Reaktoren (SMR)
 - ➔ dabei sinkender Nuklearanteil bis 2050 auf $\approx 10\%$.
- 2/3 der neuen Kernkraftkapazitäten in Schwellen- und Entwicklungsländern (vor allem Großreaktoren)
 - ➔ Vervielfachung der Reaktorflotte bis 2050.
- Kernreaktoren nicht nur Stromerzeuger, sondern auch Wärmebereitstellung $\geq 4\%$ des kommerziellen Wärmebedarfs
 - ➔ in 2050 keine Nur-Stromreaktoren



Studienergebnis*:

- Ausklammern oder Verzögern von Entscheidungen bei Kernenergie und CCSV bedeutet → erheblicher Kostenanstieg NetZero-Emissionspfad
- Kapazitätsaufbau installierte Leistung für Solar PV& Wind um mind. Faktor 2,5 größer (erste zu Beginn Energiewende aufgebaute erreichen Lebensdauerende)
- massiver Aufbau von Batteriekapazität (Ressourcenproblem)
- weitere Forcierung der Netzausbaus
- zusätzliche Integration disponilber Stromquellen (Biomasse, Wasserstoff)

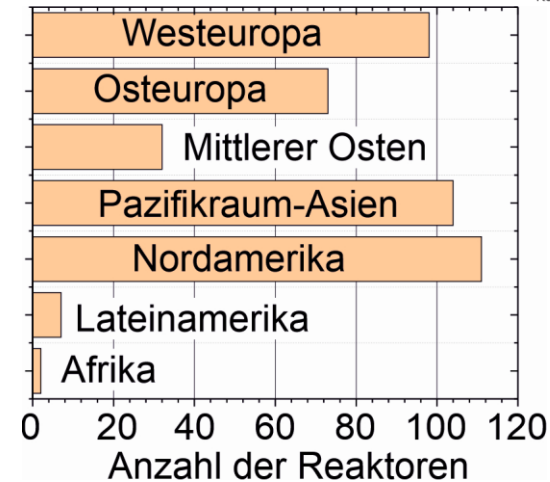
Für die Kernenergie sind 4 wichtige Entscheidungen zu treffen:

- Laufzeitverlängerung für laufende Kraftwerke bis zum techn. Ende (sowie Power-uprating);
- Forcierung des Neubautempos (2011-2020 nur $6GW/a$, mit **langen Bauzeiten**)
- Fortschritte in der Kernkrafttechnologie (Generation 3, Generation-4, SMR, Multifunktionsreaktoren- Strom+Wärme) + Wiederaufbereitung (Brennstoff, Transmutation).
- effizientere Konzepte zu Zwischen- und Endlagerung (Technologie) .

Kernkraft heute –Weltweit

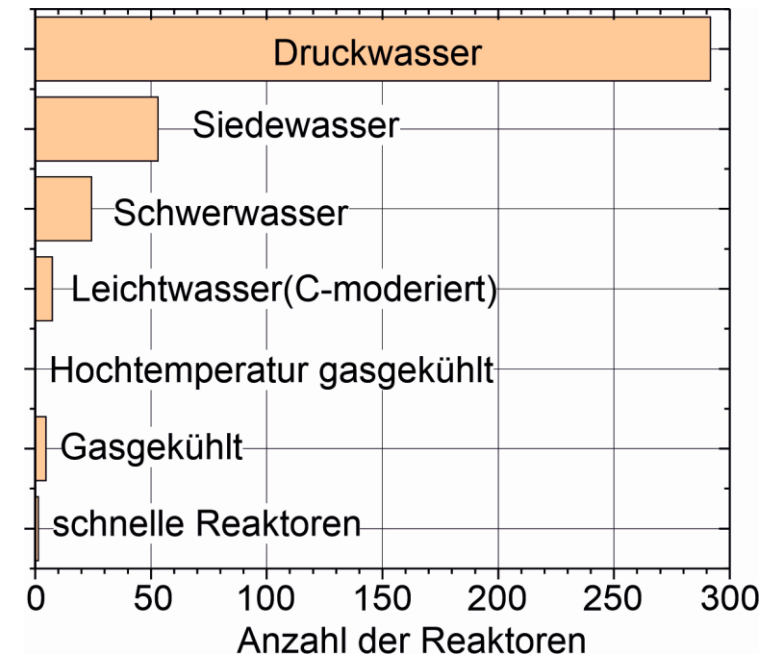
■ Reaktoren –Weltweit (427, 383 GW_{el}^*)

- ➔ 56 Neubauten
 - ➔ 48 Druckwasserreaktoren
 - ➔ 3 schnelle Reaktoren
- = 58 GW_{el} (6 GW_{el}/a)



■ Installierte Reaktortypen

- ➔ fast nur Druckwasserreaktoren (PWR)
- ➔ kaum Portfolio für Mischeinsatz (Strom + Wärme)
- ➔ marginale Aktivitäten für Transmutation



Kernkraft heute –Weltweit

■ Reaktoren - Altersverteilung

- mittleres Alter ~36 Jahre
- ➔ meiste Reaktoren Generation-II

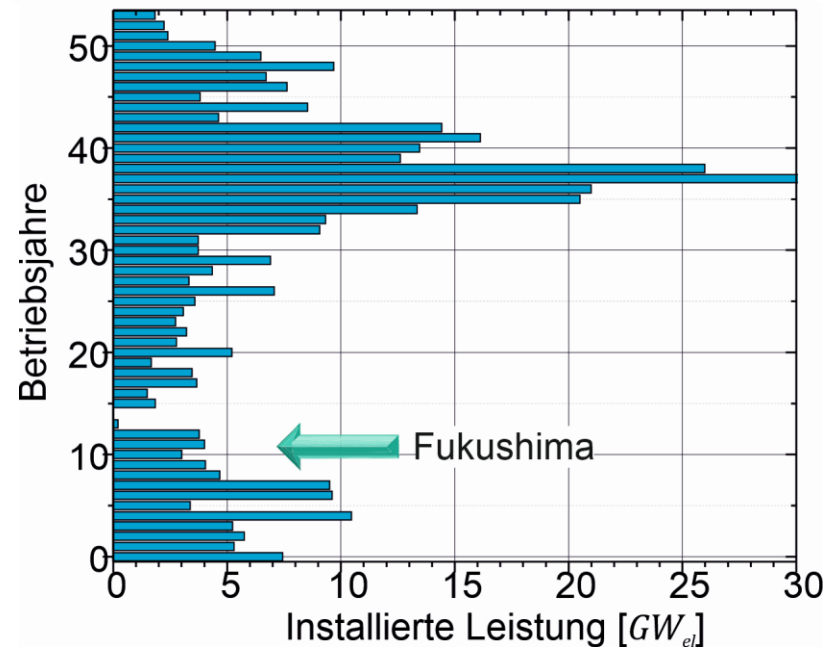
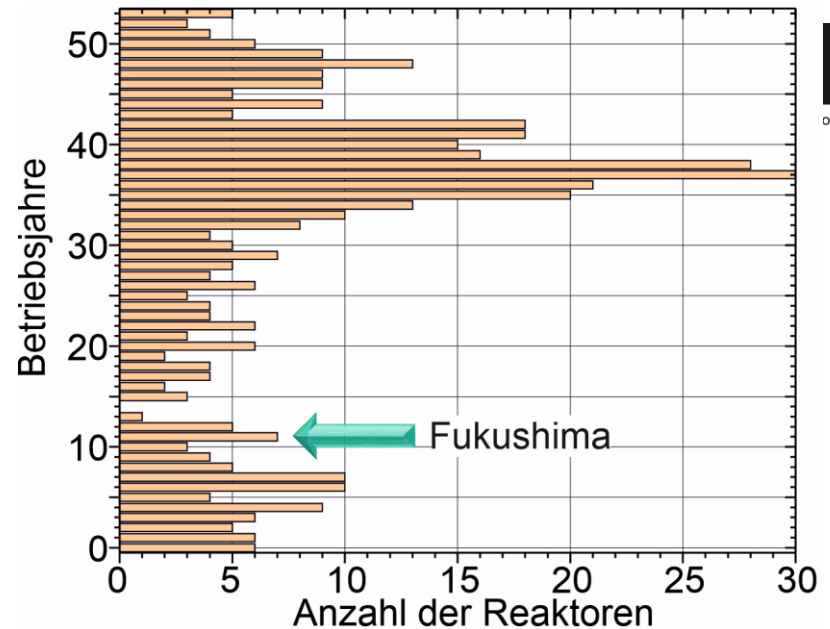
■ Maßnahmen weltweit

- ➔ Laufzeitverlängerung
- ➔ Leistungserhöhung
- ➔ Ersatzreaktorenbau

■ Reaktorpark -aktuell

- fast nur große Reaktoren installierte mittlere Leistung $> 1 \text{ GW}_{el}$
- Betriebsweise Grundlast

- kein Trend zu Reaktoren kompatibel zur Energiewende (in der Praxis) zu erkennen !!!!



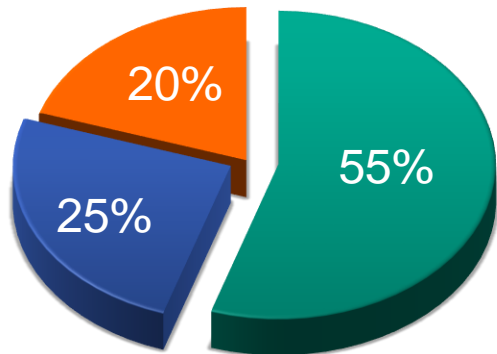
Randbedingungen für den Reaktorbau

■ Wesentlich gesteuert durch nationale Argumente

- Netzaufbau/-architektur → Autarkie (Ressourcen, Verfügbarkeit,...)
- Wirtschaftspolitik → Wertschöpfung durch Industrie
- soziale Entwicklung → Akzeptanz & Wahrnehmung
- technologische Basis → Reifegrad, Sicherheit, Infrastrukturen

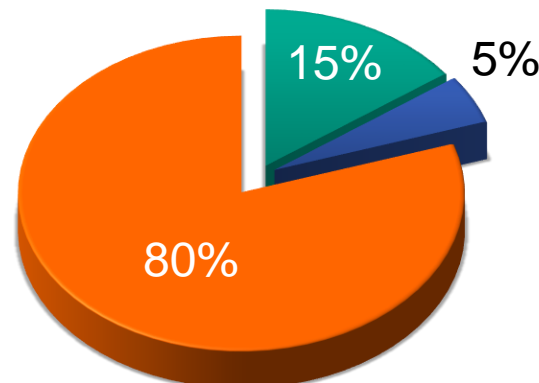
■ Langfristperspektive: **Brückentechnologie** (→ längere Entscheidungsspielräume)

■ Kostenstrukturen großer Reaktoren

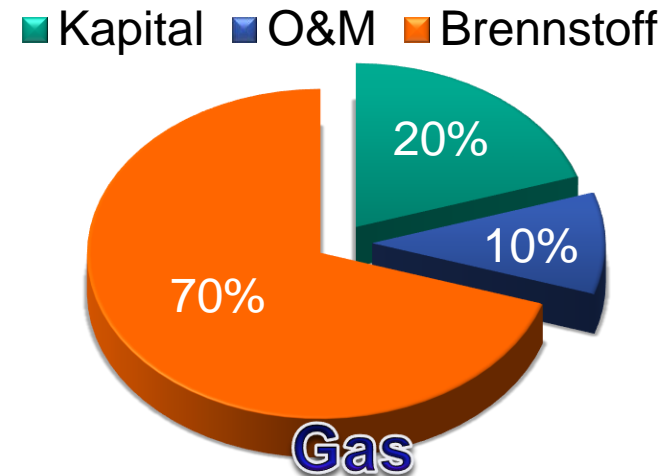


Kernkraft

(inklusive Dekommissioning & Abfallaufbereitung: +3/+6%)



Kohle



Gas

© M. Ricotti, Polytec. Milan, 2015

Randbedingungen für den Reaktorbau

- hohe Kapitalkosten
- lange Herstellungszeiten



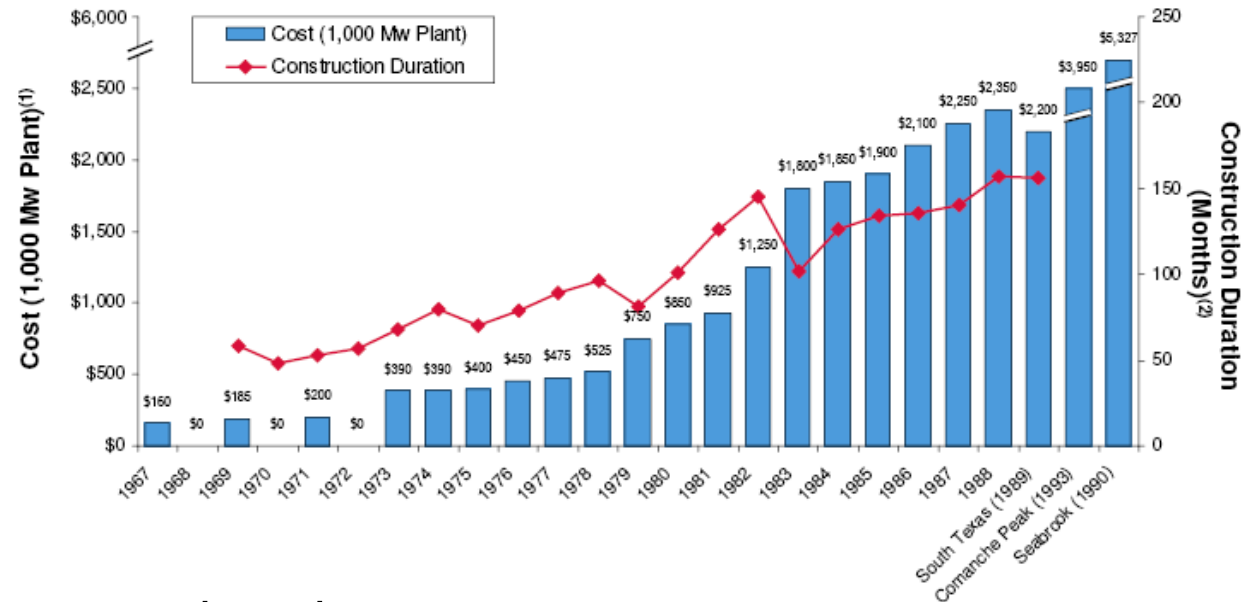
- hohes finanzielles Risiko
- lange « Pay Back » Zeit



Konsequenz

- langfristige Investmentstrategie mit
- stabilen energiepolitischen Randbedingungen bei gleichzeitig
- sozialer und ökonomischer Stabilität und
- Technologieakzeptanz
- insbesondere für private Betreiber in liberalisierten, auf Wettbewerb basierenden Märkten mehr als problematisch

© Booz & Company, 2009



Randbedingungen für den Reaktorbau

- große Reaktoren oder kleine Reaktoren (SMR) ?

Argumente für SMR

- flexible Stromerzeugung, breiterer Nutzer-/Anwendungsbereich
- CO_2 -armer Ersatz von fossil befeuerten Kraftwerken
- größere Sicherheitsmarge durch inhärente und/oder passive Sicherheitsmerkmale
- bessere Erschwinglichkeit - Freiheit bei der Leistungsaufrüstung
- Kraft-Wärme-Kopplung und nicht elektrische Anwendungen (Entsalzung - Prozesswärme),
- Hybride Energiesysteme, die aus Kernenergie + erneuerbaren Energien bestehen

Aber Einsatz & Technologie von SMR sind nicht



einfache Skalenreduktion



=



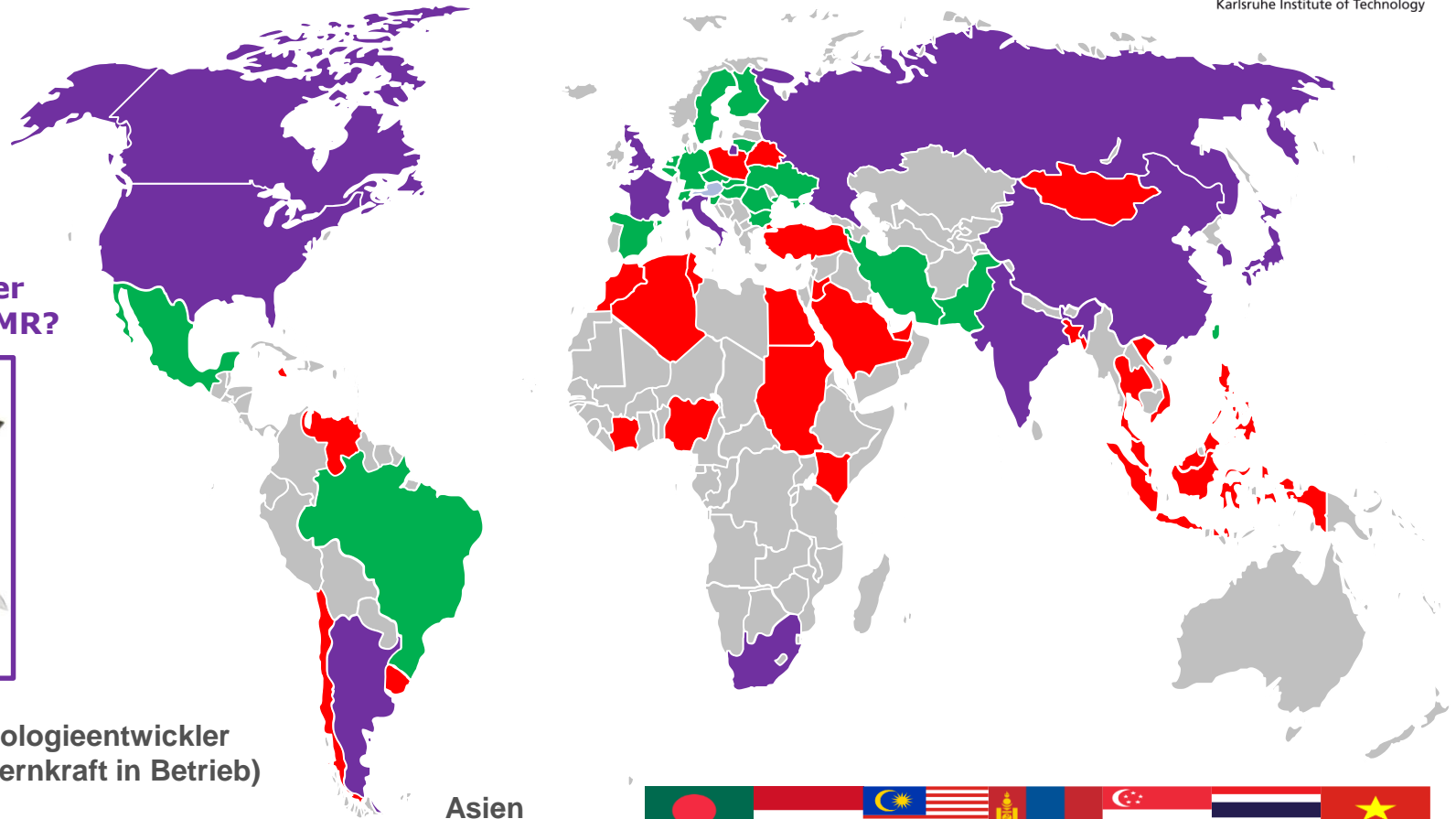
Summe der Module



= **anderes Produkt & Technologie**

Länder mit Initiativen zur Kernreaktorentwicklung

Welche Länder entwickeln SMR?



 Technologieentwickler (mit Kernkraft in Betrieb)

 Länder mit Kernkraft

 "Newcomer" Länder



Asien



Europa



Afrika



Lateinamerika



© Subki, IAEA, 2017

Wichtige Aspekte für den Bau von Kernreaktoren

■ Gegenwärtig Bau von großen Generation III –Reaktoren

Sind sie neu im Vergleich zu laufenden Generation-II-Typen? **-Nein**

➔ Evolutionäre Entwicklung the laufenden Generation-II Einheiten

Weshalb ?

■ kleines industrielles Risiko (Kapitalrisiko):

- Einbeziehung der Betriebserfahrung der laufenden Flotte
- entwickelt nach bewährten physikalischen Prinzipien
- kein Technologiesprung erforderlich

■ Leistung vs. Nachhaltigkeit entspricht Generation 2 (> 90% Verfügbarkeit, ausgereifte Lieferketten, Wartung, Betrieb)

ABER heute

■ Verschärfte Aulegungskriterien

- **nukleare Sicherheit** (Kernschmelzunfälle sind Bestandteil des Designs; Begrenzung der radiologischen Auswirkung -Core damage frequency $< 10^{-6}$ /Jahr, Integration externer Ereignisse in Sicherheitskonzepten)
- **gesellschaftliche Akzeptanz** (kein Gebiet, das der außerbetrieblichen Notfallplanung unterliegt, geringe Umweltauswirkungen bei Normalbetrieb und Auslegungstörfällen)

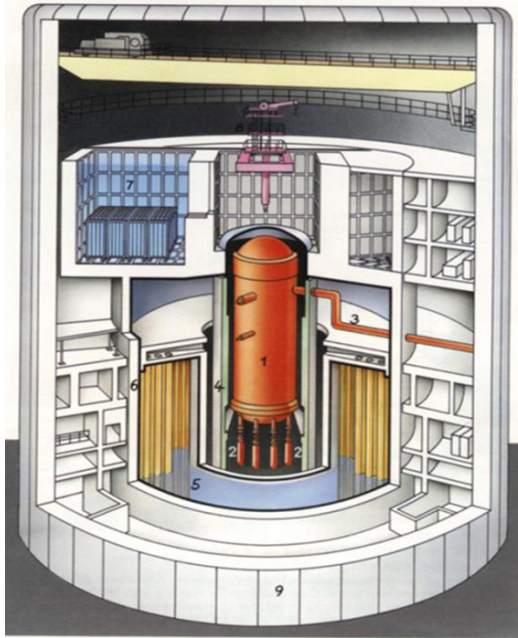
nach **Chernobyl (1986), New York (2001, 9/11) und Fukushima**

■ Verschärfte wirtschaftliche Entwicklungsziele (Wettbewerb mit anderen Quellen)

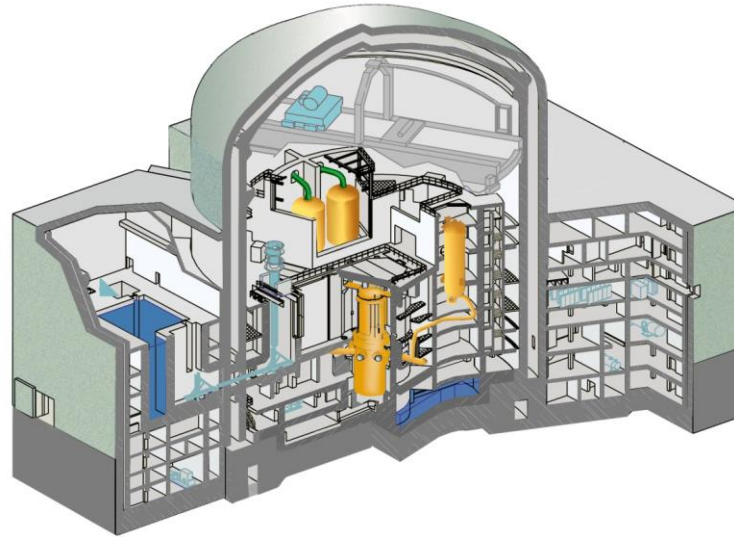
- **Projektrentabilität** (Verfügbarkeit > 90 % während der gesamten Lebensdauer, kurze Betriebsunterbrechungen, lange Zyklen, geringere Investitionen
 - ➔ große Abmessungen, vereinfachte Planung, Bauzeit)
- **Investitionsschutz** (Lebensdauer 60 – 80 Jahre, niedrige Rate schwer zu reparierender Ausfälle, niedrige Kernschmelzhäufigkeit $< 10^{-6}$ /Jahr,
 - ➔ bewährte Technologie keine Sprünge)

➔ **Generation-III Reaktoren sind keine Generation-4 !!!**

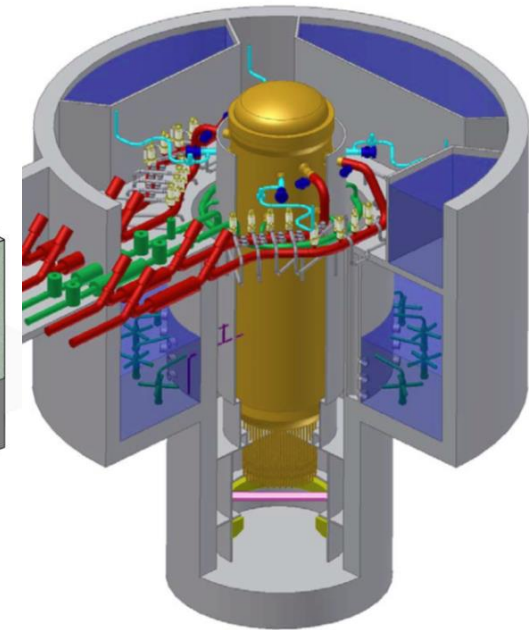
- **keine Auslegungsanforderungen für Nachhaltigkeit (Einsparung von U^{235})**
- **keine Verbrennung von langlebiger Spaltprodukte (Minoren Aktiniden)**



■ Siedewasser (BWR)



■ Druckwasser (EPR)



■ ESBWR

Komplexes System mit Multiphysik-/Multiskalen - Phänomenen

Wichtigste Herausforderungen für risikobasierte sicheres Design:

- Neutronik, Thermohydraulik, Mechanisches Design – **ALLE GEKOPPELT**
- Passive Sicherheitssysteme für Notkühlsysteme zur Nachzerfallswärmeabfuhr
- Beherrschung schwerer Unfälle (Core-Catcher, passive Containment-Kühlung, PAR)

Auslegungssicherheit

Erweiterte Rechenkapazitäten und -ressourcen ermöglichen

- ➔ detailliertere lokale Analysen bei der Reaktorauslegung
- ➔ verbesserte Auslegungssicherheit von Neuanlagen (Gen III)
- ➔ Nachrüstung laufender Anlagen (Gen II)
- ➔ Digitale Zwillinge (mit unterschiedlichen Detaillierungsgrad) sind Standard
 - Training
 - Betriebsplanung & Wartung aber auch bei
 - Design, Standortanpassung

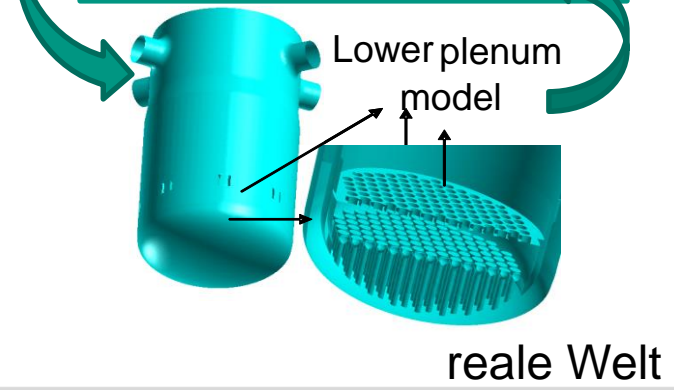
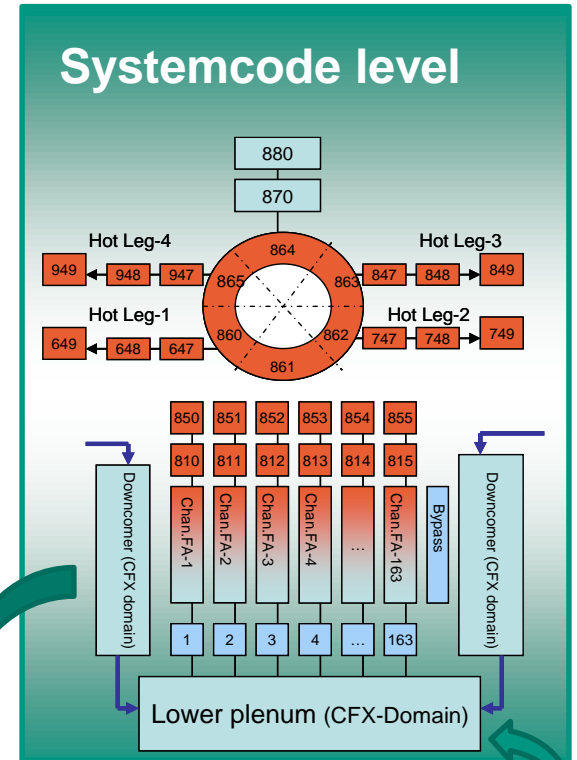
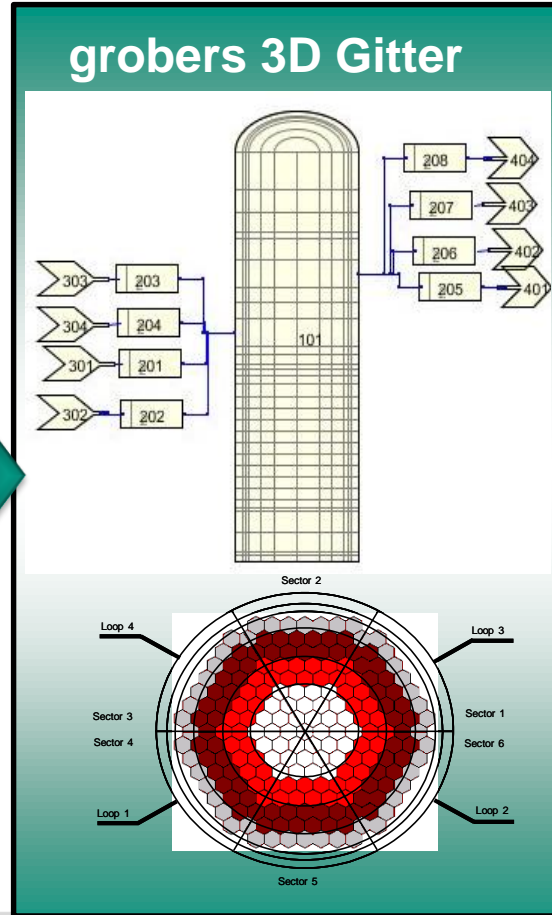
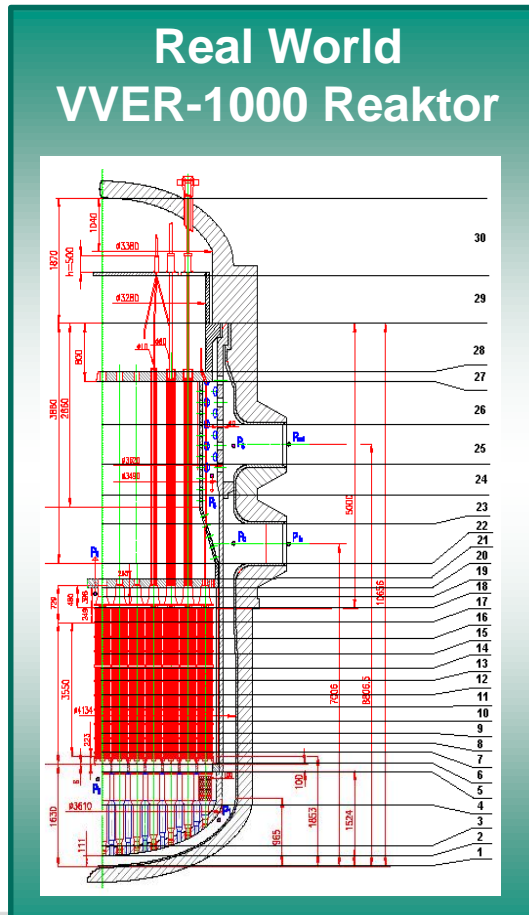
Rezepte zu immer verfeinerter Auflösung umfassen :

- paralleles High Performance Computing (HPC)
- Gebietszerlegungsmethoden (Domain- decomposition)
- Zeitabhängige MonteCarlo-Verfahren (Neutronik)
- Unsicherheitsquantifizierung und –propagation (VVUQ)
- ➔ **„quasi detailgetreue Erfassung“ aller gekopplerter Effekte**

Auslegungssicherheit

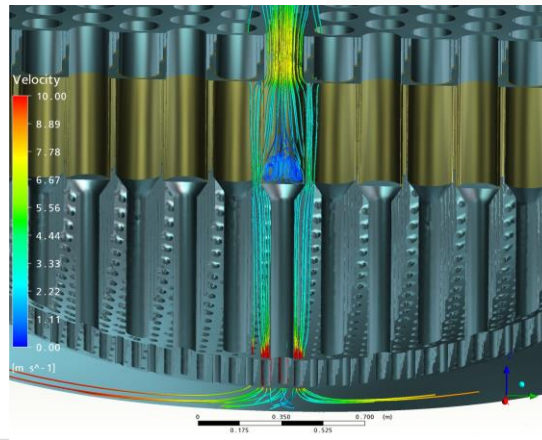
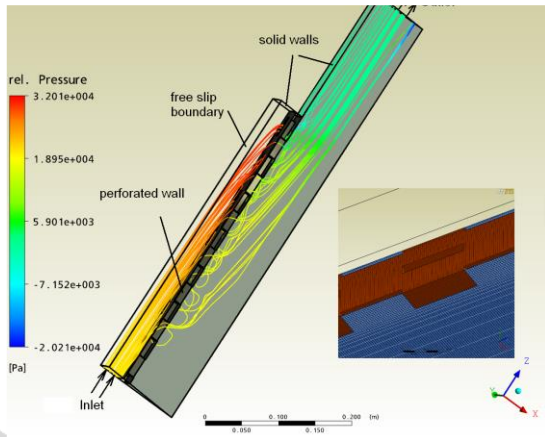
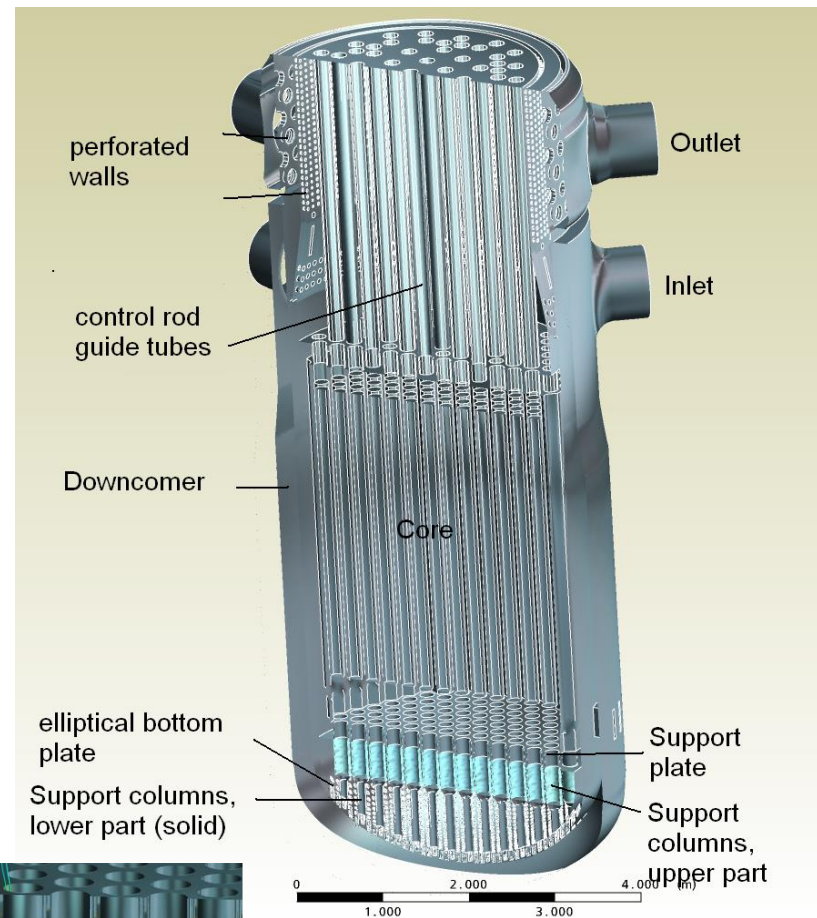
Thermohydraulik-Problem – „classic route“

- Schnelle Echtzeit-Simulation
 - Reaktorbetrieb
 - Prinzipielle Auslegung



Auslegungssicherheit

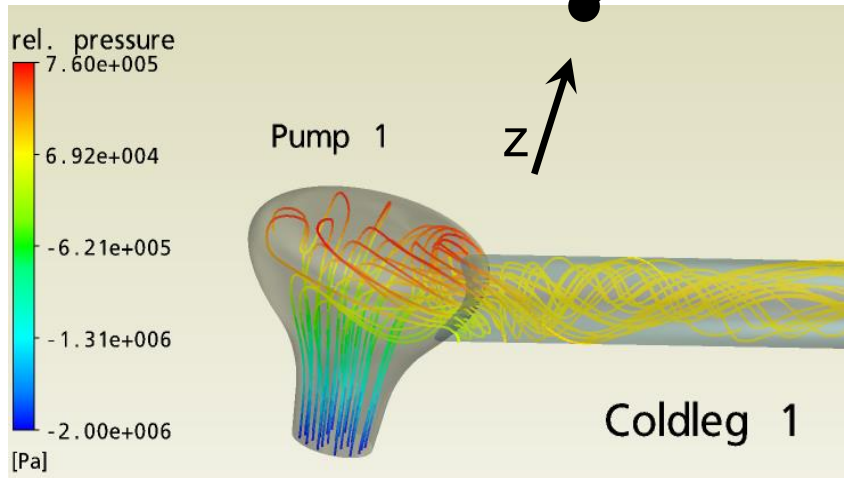
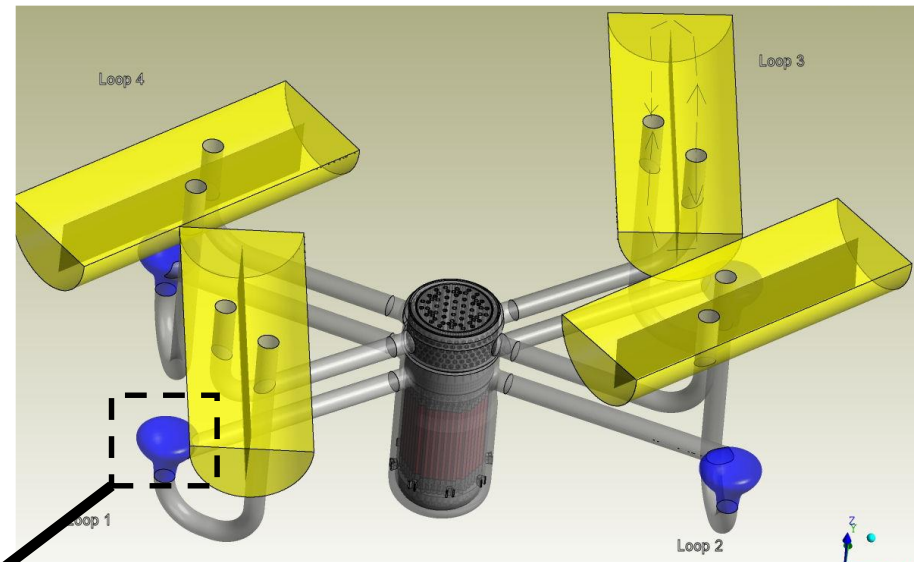
Thermohydraulik Multiskalenanalyse mit CFD – Reaktordruckbehälter (RPV) VVER-1200



VVER-1200 Reaktor

Auslegungssicherheit

Reaktordruckbehälter mit Neutronik und Primärkreislauf

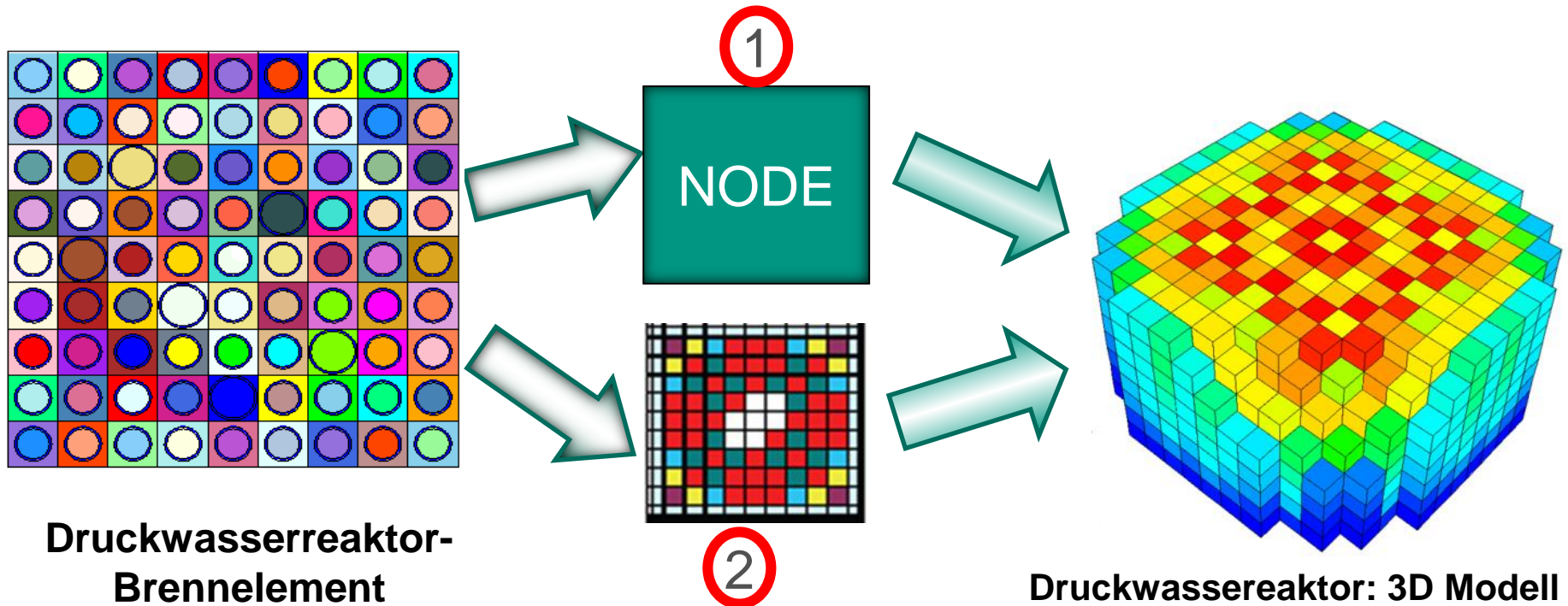


© M. Böttcher, INR

■ Aktueller Trend: Multiphysik- und Multiskalen Fragestellungen

“Zwei Pfade ”

- Brennelementebene (nodal) → konservative Sicherheitsparameter 1
- Brennstabebene → lokale Sicherheitsparameter (teuer) 2
- wirtschaftliche UND sichere Designs erfordern Auflösung auf Kernebene

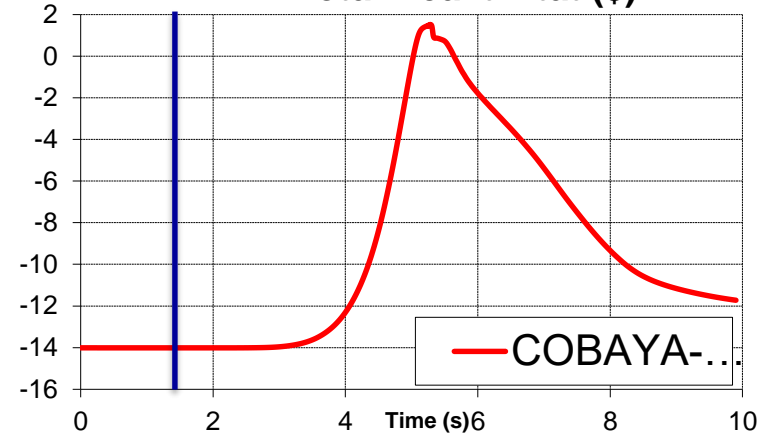


Auslegungssicherheit

1

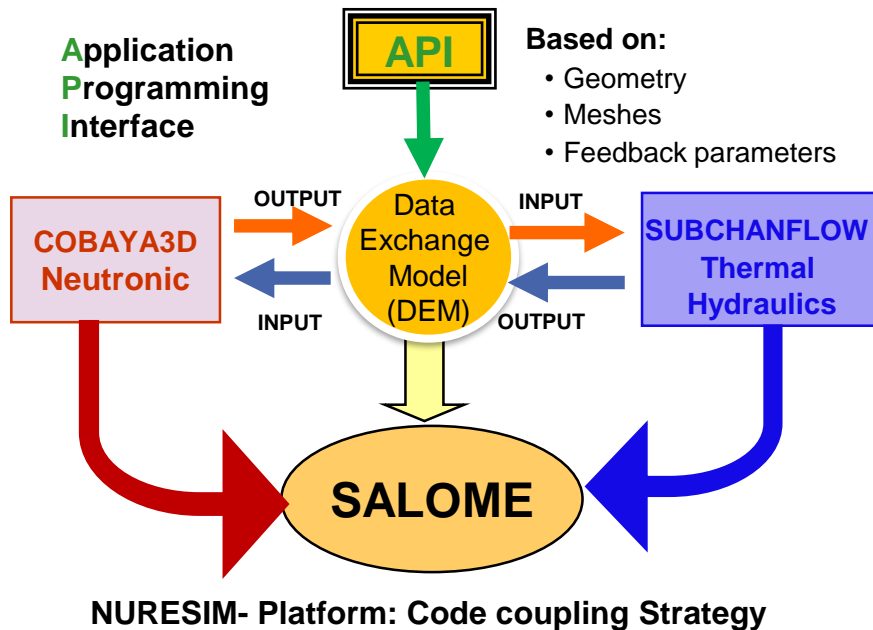
Transiente Borsäureverdünnung

Total Reaktivität (\$)

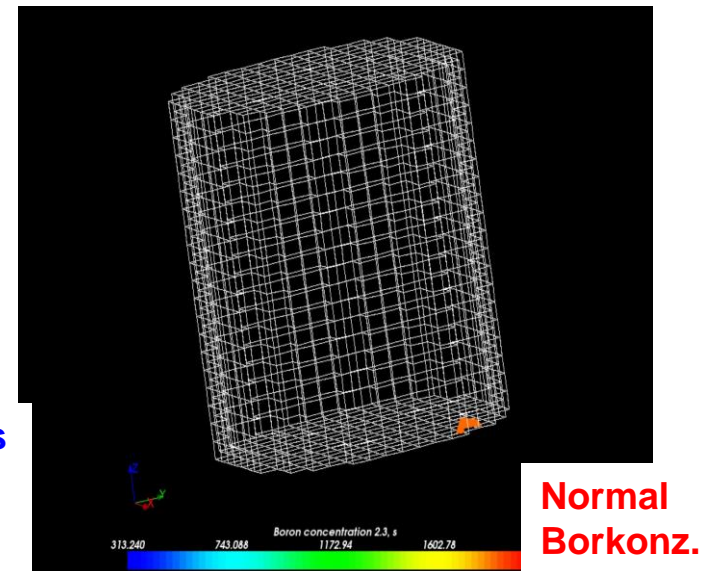


Aktuelle Möglichkeiten

➔ Auflösung bis auf Einzelbrennstab



Unboriertes
Kühlmittel
kommt in
Kern

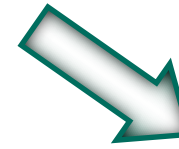


© Calleya PhD Thesis 2013

Auslegungssicherheit

Trend zur Lösung von Multiphysik und -skalenproblemen

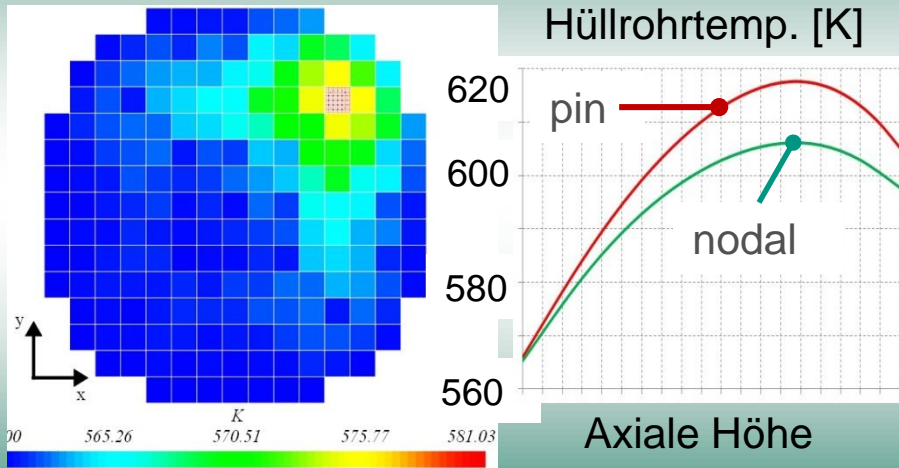
① - ②



②

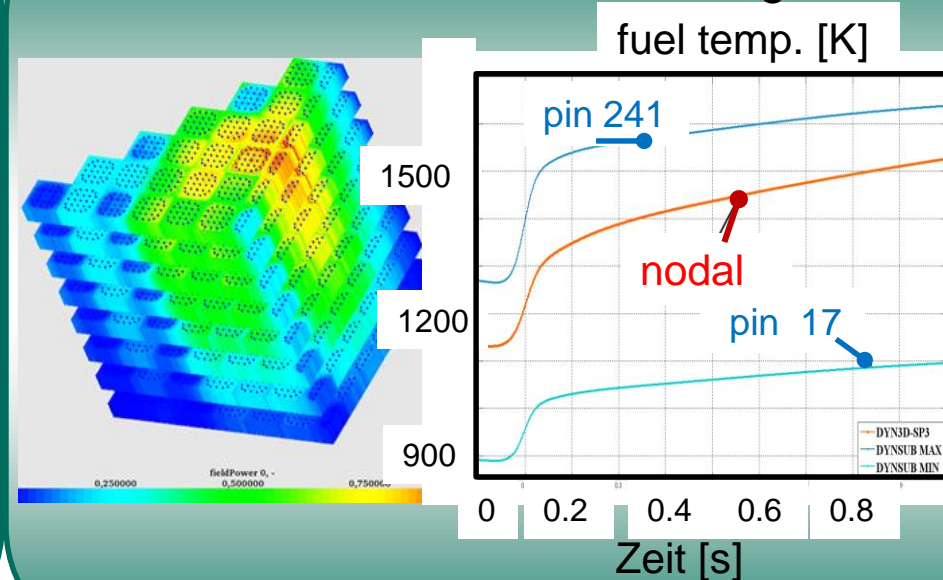
Hybride Schemata

- Nodal in fast ganzem Kern
- Lokal Auflösung des Stabs



Stabauflösung

➔ Rechnerisch aufwändig



Trend heute: Monte Carlo Methoden (➔ sogar zeitabhängige Probleme)

Auslegungsüberschreitende Sicherheit

- Integraler Bestandteil des Gen-III Reaktordesigns

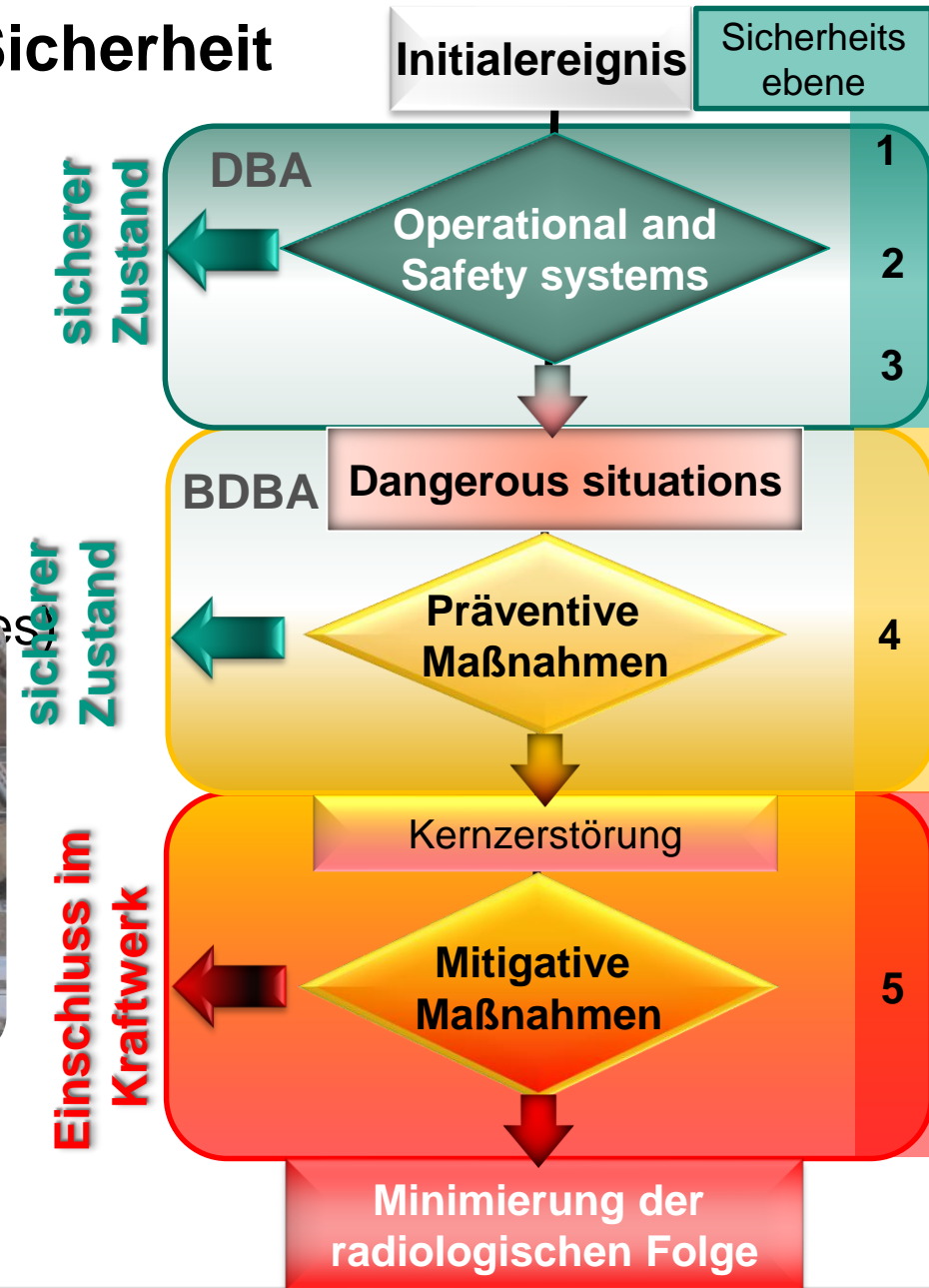


Was soll vermieden werden ?



Designoptionen

- Design, core catcher, PAR,
- Barrieren,.....



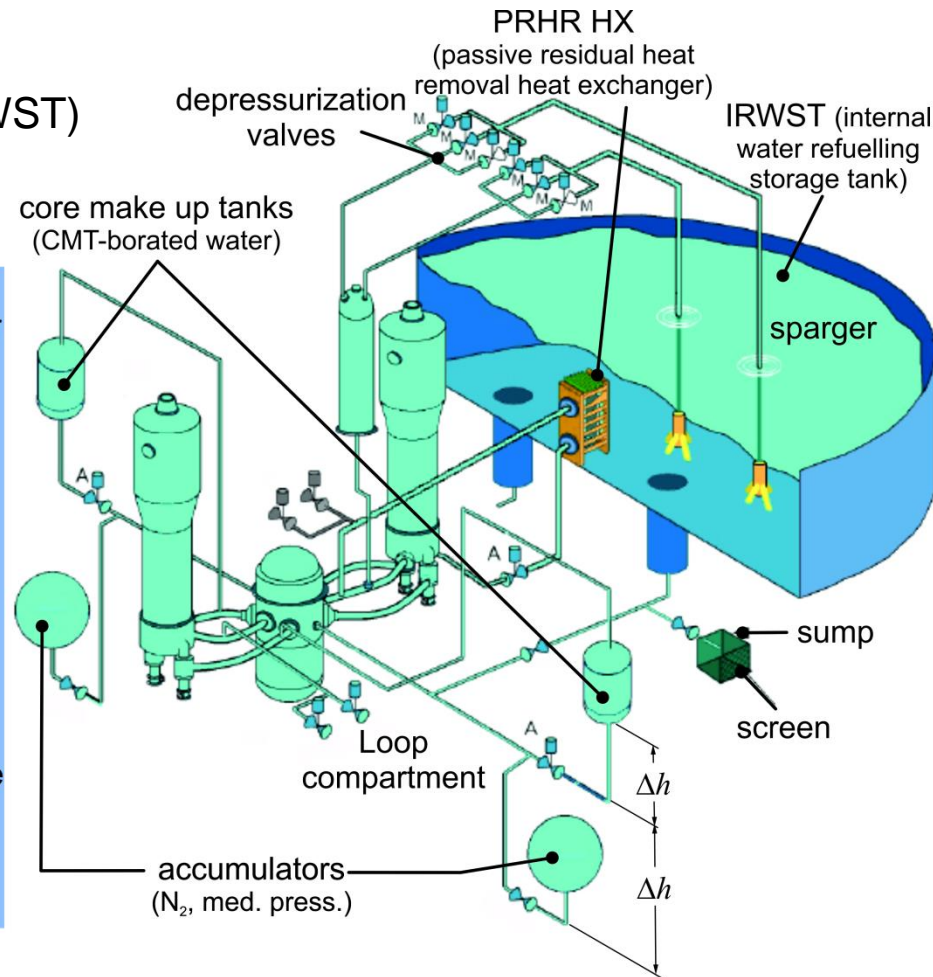
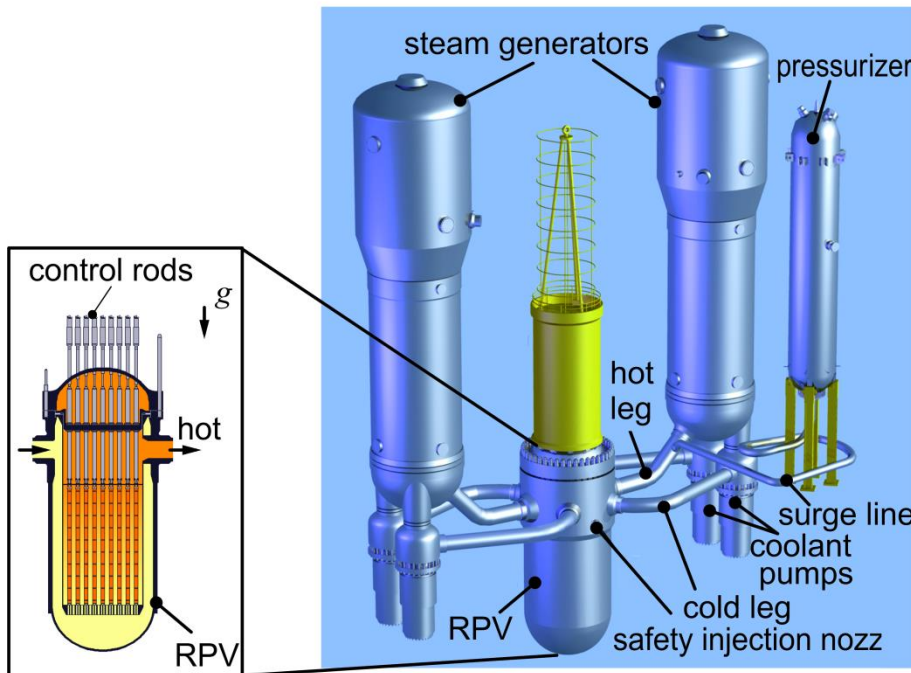
Auslegungsüberschreitende Sicherheit

Werkzeuge

- Steuerstäbe
- Boriertes Wasser

Rein passive und sicherheitsrelevante Notfall-Kernkühlsysteme (ECCS)

- Nachspeisetanks (boriertes Wasser)
- Akkumulatoren (Wasserersatz)
- Nachfüllen von Kühlmittel aus dem Tank (IRWST) durch Schwerkraft
- PRHRs schwerkraftgetrieben



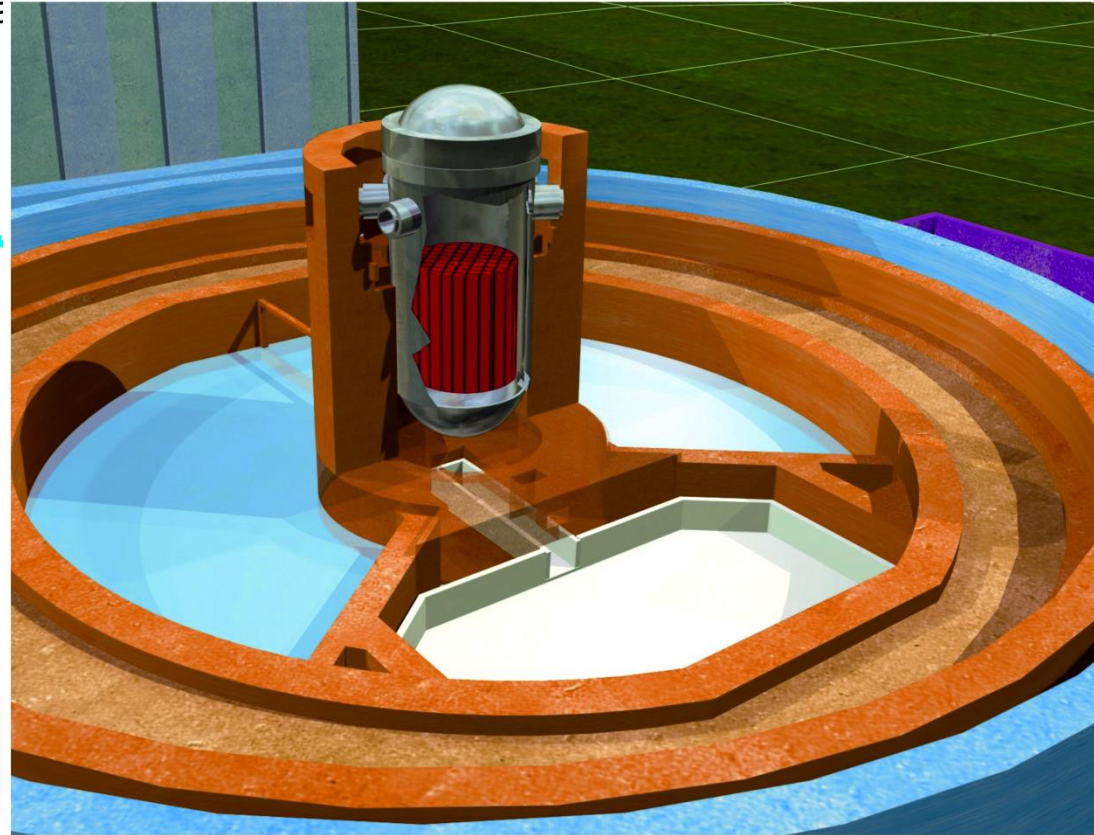
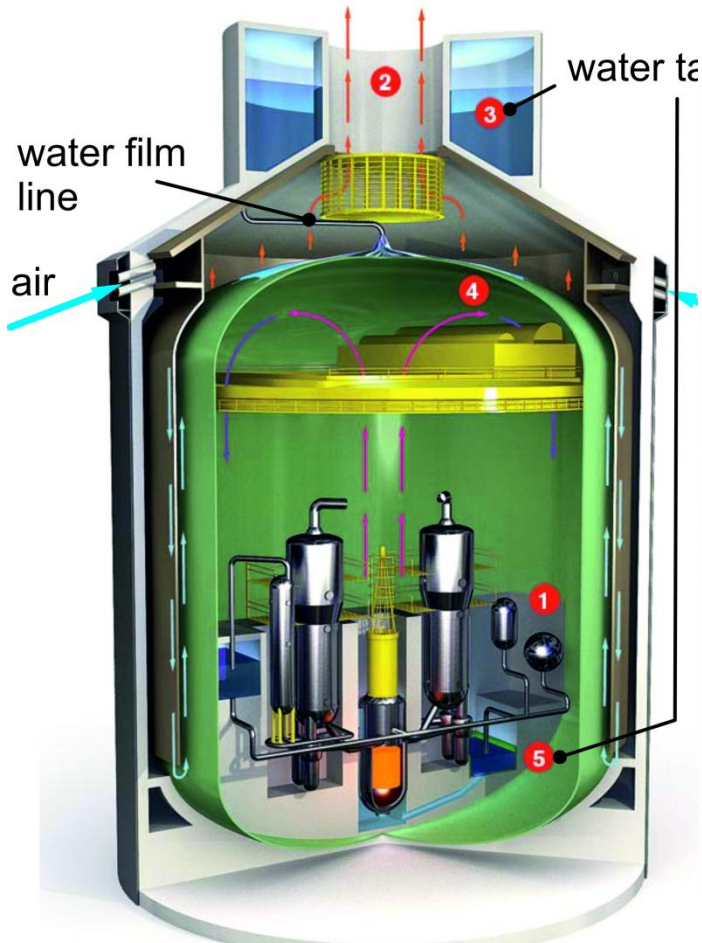
© Example Westinghouse, AP1000,2014

ECCS= Emergency core cooling systems

PHRRS=Passive Nachwärmeabfuhrsystem

Auslegungsüberschreitende Sicherheit

- Verschiedene Optionen zur Behandlung schwerer Unfälle
- In-vessel Zurückhaltung
- ex-vessel mittel „core catcher“

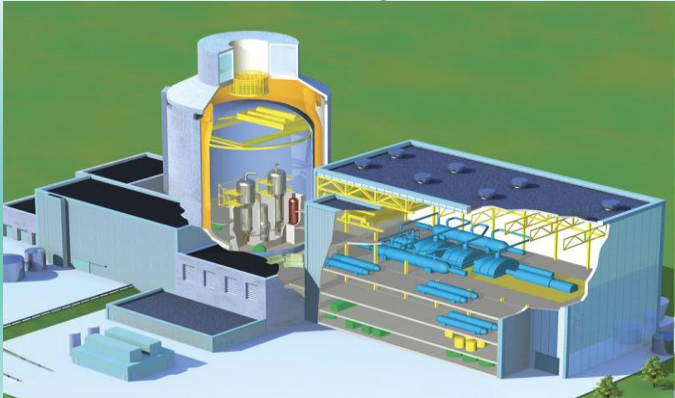


© Westinghouse, AP1000,2012

© AREVA-NP,2011

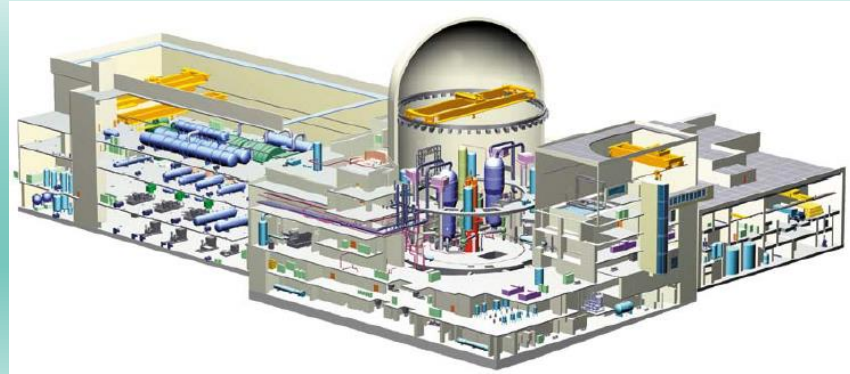
Große Generation-III Reaktoren (PWR)

■ AP 1000 (Westinghouse –Toshiba)



- 2 SG, 4 Pumpen, 1100MW_{el}
- Kompakter Kern
- China, US (6 Einheiten gebaut)

■ APR 1400 (Korea)



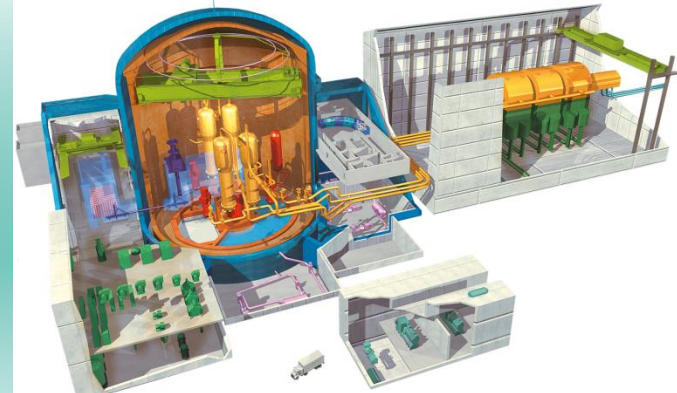
- 2 SG, 4 Pumpen, 1400MW_{el}
- Gemischte schwere Störfallphilosophie
- Korea , UAR (4 Einheiten in Betrieb)

■ APWR 1000 (MHI)



- 4 SG, 4 Pumpen, 24 Monate Zyklus (fuel) cycle, -1500MW_{el}
- Japan (1 in Bau)

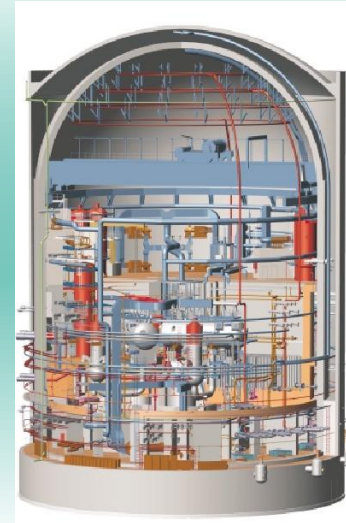
■ EPR (FRAMATOM)



- 4 SG, 4 Pumpen, große Kerne ➔ 1600MWe
- Core catcher, 24 Monate Zyklus
- FIN, FRA, VRC,GBR (4 in Betrieb, 4 in Bau)

Große Generation-III Reaktoren (PWR)

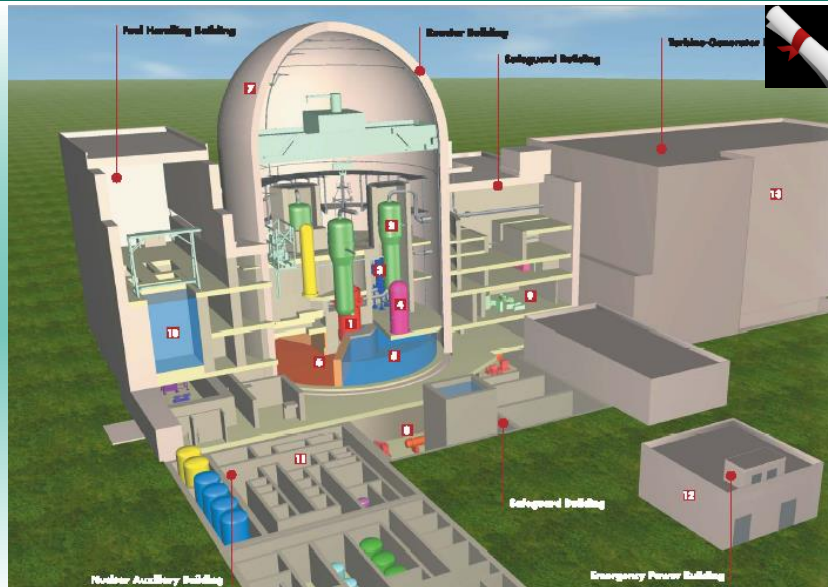
■ AES (Russia)



- 4 SG, 4 Pumpen, 1070MW_{el}, Horizontale HEX,
- passive Sicherheitssysteme, Core catcher
- BUL, RUS, UA, TUR (>25 gebaut, >10 in Bau)

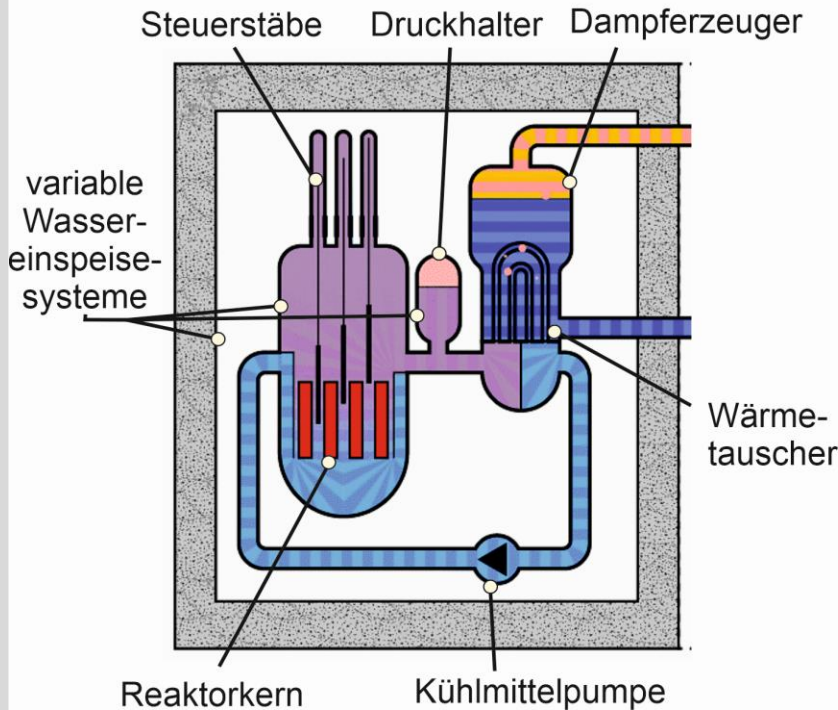
■ ATMEA (MHI-AREVA)

- 3 Pumpen, 1150MW_{el},
- 3-Sicherheitsebene
- 2 stufiger Accumulator,
- Flugzeugabsturzresilient
- 100% MOX Brennelemente,
- 24 Monate Zyklus
- Interessenten, aber kein Bau

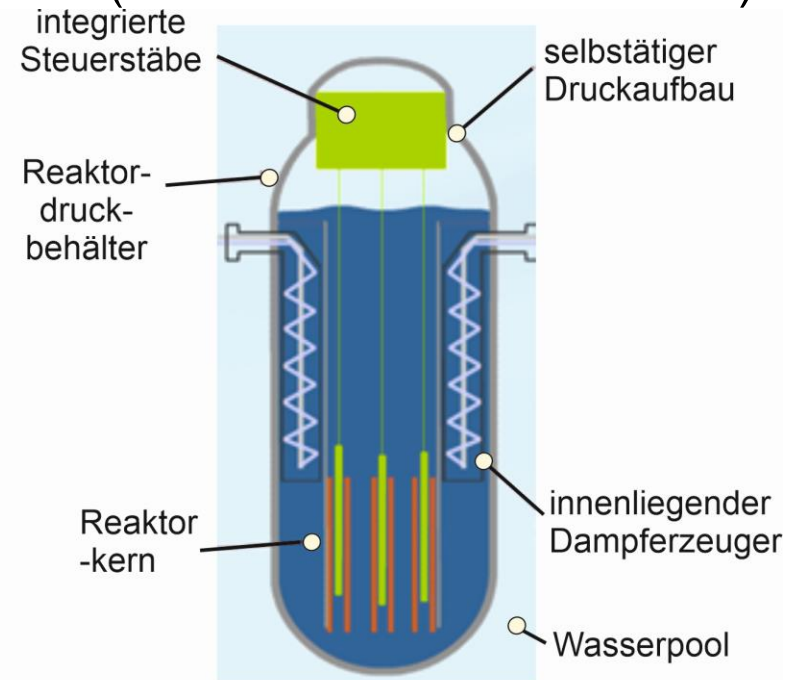


Grundideen SMR Designkonzept (am Beispiel iPWR)

■ großer Druckwasserreaktor



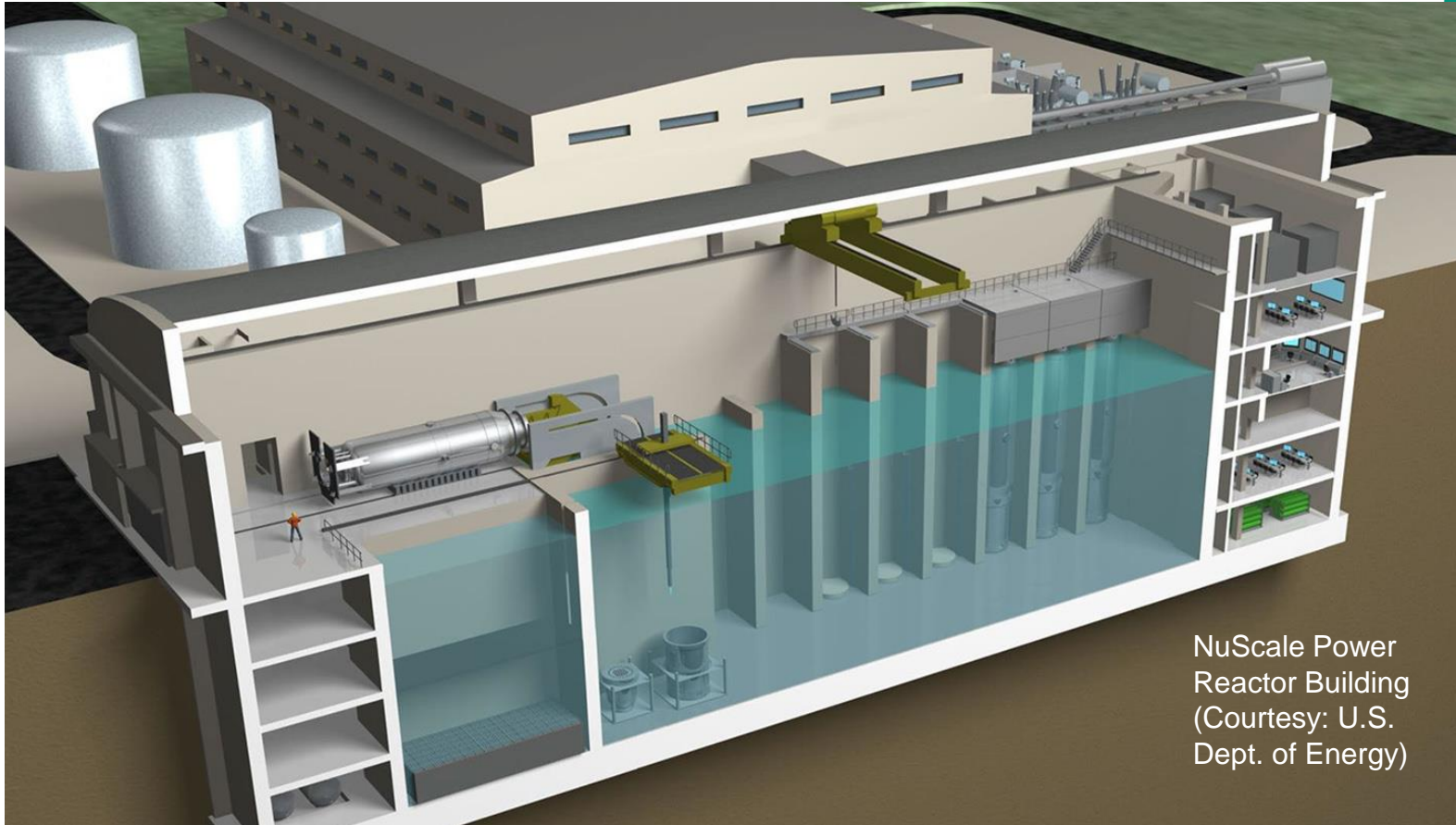
■ SMR (druckwasserbasiert-iPWR)



■ Designansätze (wesentliche Vereinfachung- weniger Bauteile)

- Verzicht auf Kühlmittelpumpe
- Integration aller Bauteile in Druckbehälter
- kleinere Kernleistung
- Platzierung des Kerns im Pool
- Reduktion der Bauteilanzahl
- längere Zyklenlaufzeit (>18Monate)
- rein passive Nachwärmeabfuhr
- industrielle Fertigbarkeit –Montage vor Ort
- Ferngesteuerte Kontrolle / Betrieb

Grundideen SMR Designkonzept (am Beispiel iPWR)



NuScale Power
Reactor Building
(Courtesy: U.S.
Dept. of Energy)

■ Modularisierung

- Kraftwerksleistung anpassbar über mehrere Kerne in Serie
- Brennelementlagerbecken und Brennelementwechsel in einem Pool

- Jede Menge Reaktortypen in der Entwicklung abrufbar über IAEA- Advanced Reactors Information Systems (ARIS)

<https://aris.iaea.org/sites/general.html>

SMR in Bau oder Entwicklung

CAREM-25
PWR



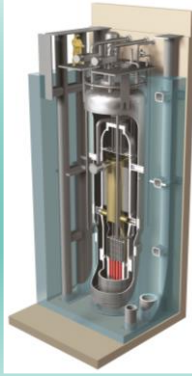


- 87MW_{el}
- Primärsystem im Behälter

SMART
Korea, Republic of



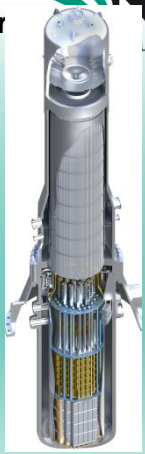

- 100MW_{el}
- Primärsystem im Behälter, passive Nachwärmeabfuhr

NuScale
PWR

- 70MW_{el}
- passive Nachwärmeabfuhr

mPower
PWR




- 180MW_{el}
- 48 Monate Zyklus
- passive Nachwärmeabfuhr

KLT-40s
PWR





- 70MW_{el}
- 2 gebaut

CNP-300
PWR



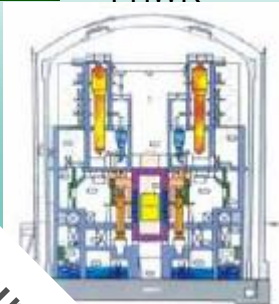
- 300MW_{el}
- 2 Kreissystem
- 3 gebaut, 2 in Bau

SWER-300
PWR

- 300MW_{el}
- In-vessel core catcher
- lizensiert

PHWR-family
PHWR



- 300MW_{el}
- design
- sicherheitssystem
- 16 gebaut

ca. 70 Reaktoren weltweit (>50 Start-ups) in der Entwicklung

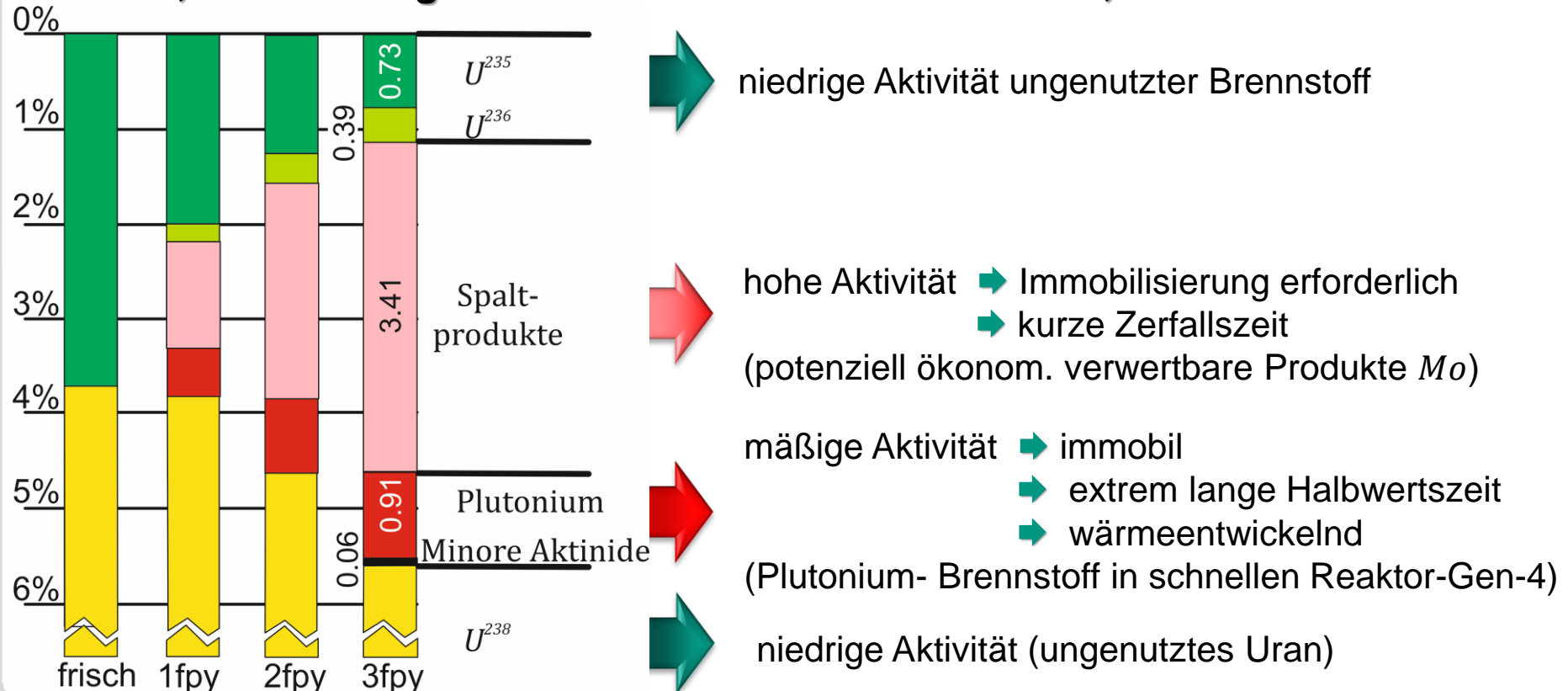
Nuklearer Abfall

Kernkraft ist immer ein Generationen Vertrag !!!

➔ Voraussetzung Akzeptanz & Stabilität (vertretbares Risiko)

- Kapitalinvestment
- langlebige Spaltprodukte
- Behandlung des Abfalls während und nach Betriebsphase

Weshalb, welche Mengen sind zu erwarten? ➔ Brennstoff, aktiviertes Material



Nuklearer Abfall

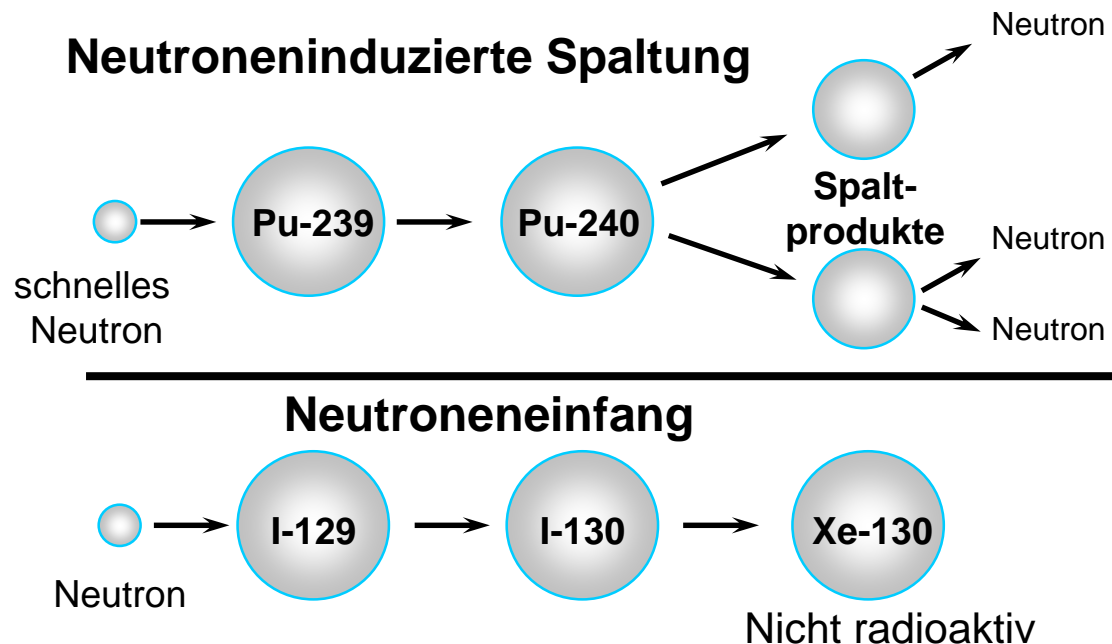
- Wiederaufbereitung, Konditionierung und Transport erforderlich

Optionen für die Behandlung von Radionukliden nach Betrieb

- Endlagerung (geologisch mit/ohne Zugriff, tiefer Untergrund, bodennah,.....) oder
- Transmutation

Was ist Transmutation?

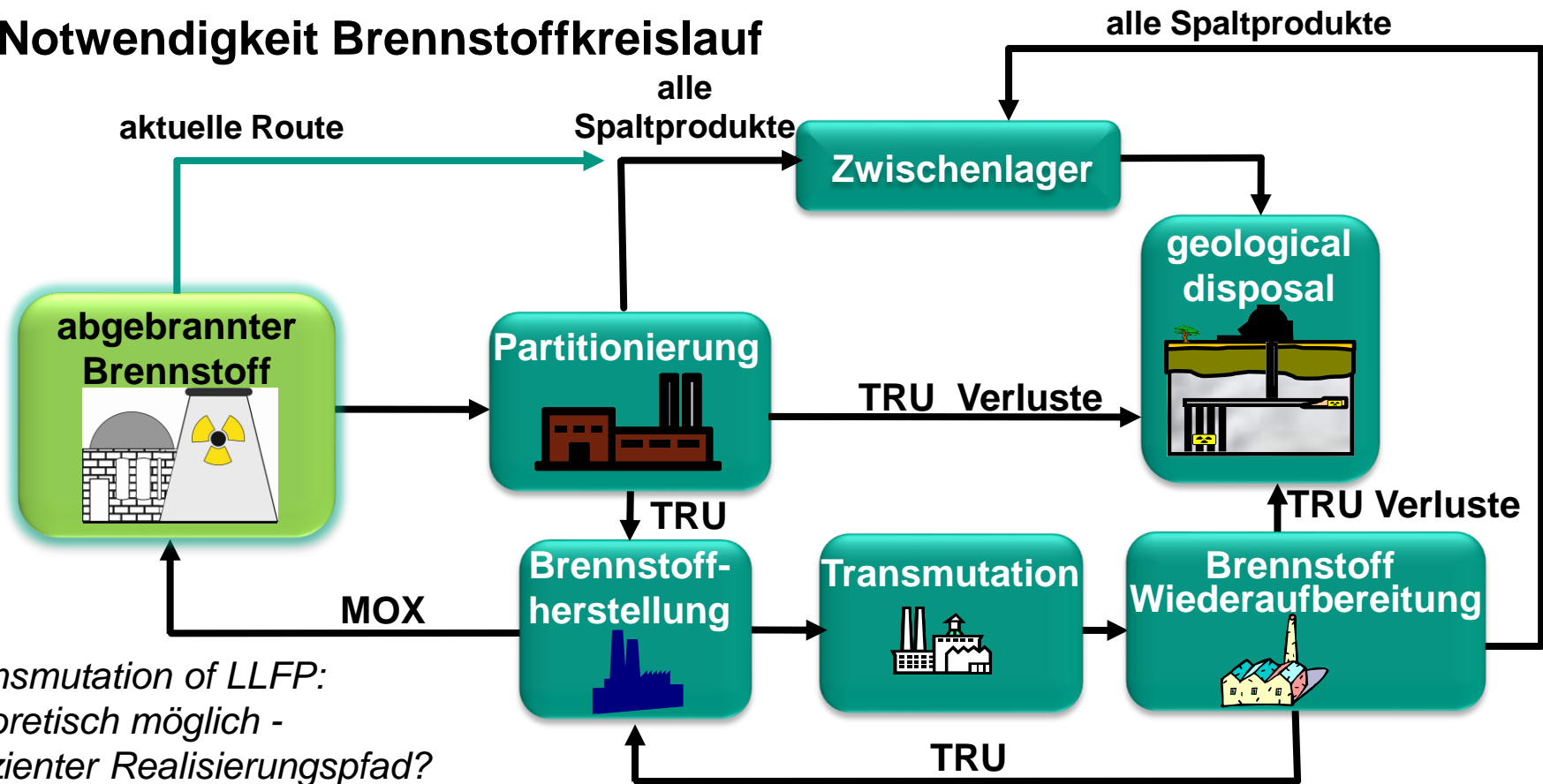
- Transfer von Radionukliden durch Neutroneninduzierte Spaltung oder Neutroneneinfang in einem anderen Element



Nuklearer Abfall - Brennstoffzyklus

Wie kann man den radiologischen Fussabdruck minimieren?

➔ Notwendigkeit Brennstoffkreislauf



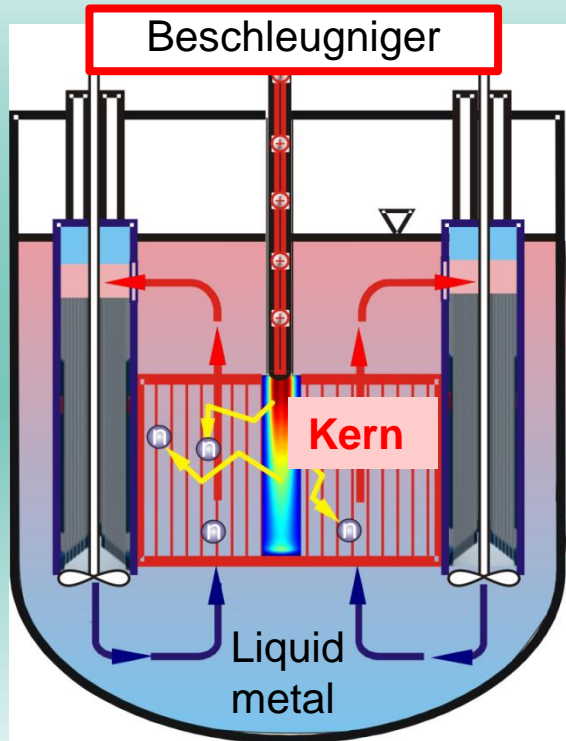
- ➔ Mehrfachnutzung in LWR über MOX +
- ➔ Transmutation in schnellen Reaktoren, dennoch
- ➔ Endlager immer erforderlich (aber deutlich kleiner) !

Nuklearer Abfall -Transmutation

Welcher Typ von schnellen Reaktoren? –zwei Optionen

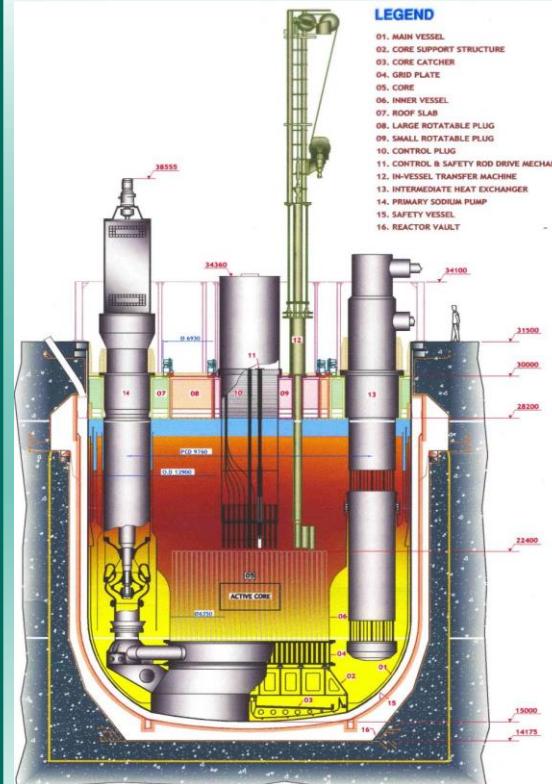
- Abhängig von der späteren Nutzung der Kernenergie !

Accelerator Driven Systems (ADS)



- Beschleuniger getrieben
- Unterkritischer Kern → Verbrennung

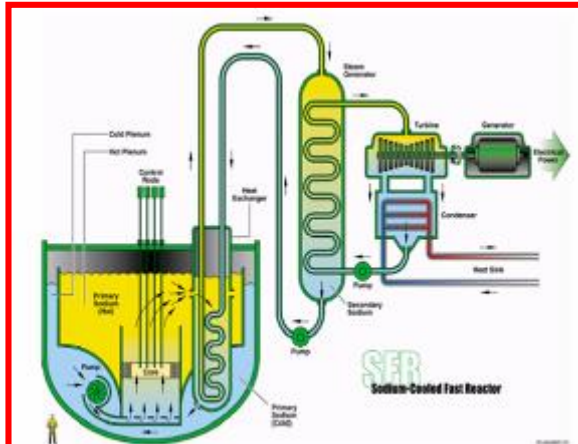
schnelle Reaktoren → Generation-IV



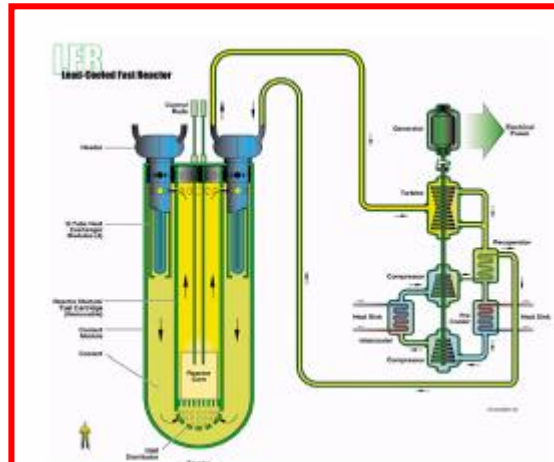
© images pravasi today,2014

- Brüten → Regeneration von Spaltmaterial aber
- Burning → Transmutation minorer Aktinide (MA)
- kritischer Kern - verschiedene Ansätze (!)

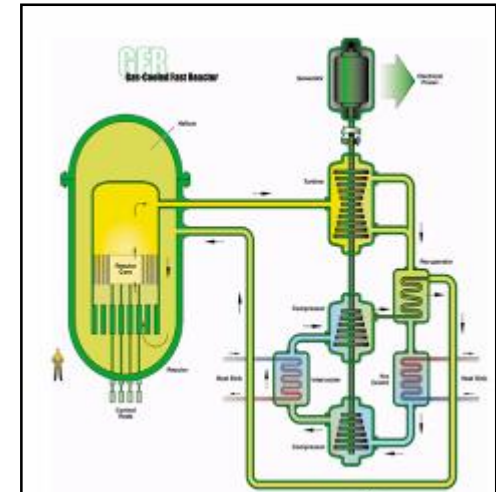
Generation IV – 6 Kernreakortypen- Spaltung Pu+MA



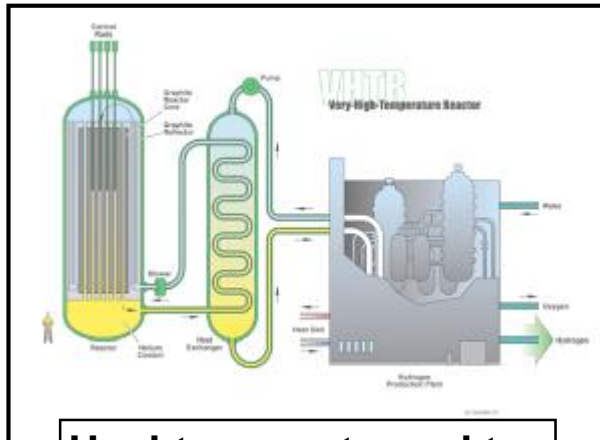
Natriumgekühlter Reaktor



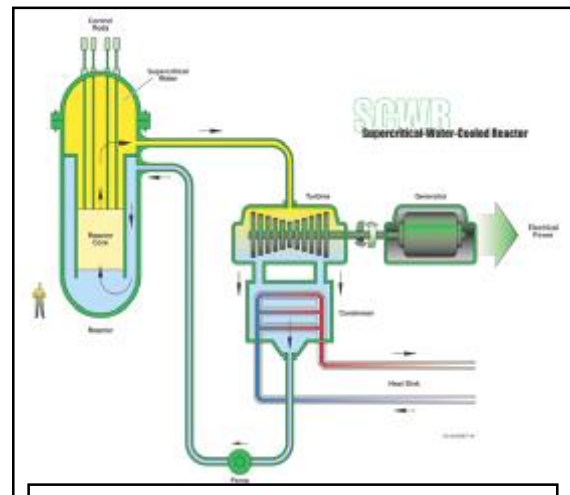
Bleigekühlter Reaktor



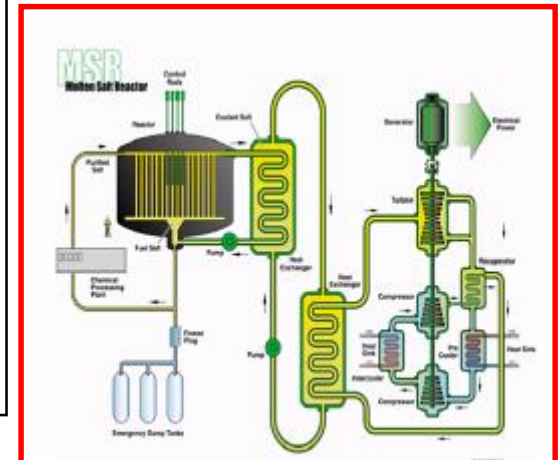
Gasgekühlter Reaktor



Hochtemperaturreaktor



Superkritischer wassergekühlter Reaktor



Salzschmelzenreaktor

Kernspaltungsenergie -Auslaufmodell – Brücken- oder Zukunftstechnologie ?

- **CO₂ Net-Zero ohne Kernenergie machbar** (aber mindestens Faktor 3-4 teurer- Ressourcenverfügbarkeit fraglich, Residuallast über Gas bzw. GuD-Kraftwerke)
- Kernenergie ≠ **Konkurrenz zu Erneuerbaren Energien** (→ Resilienztechnologie)
- **Kernspaltungsnutzung** als Ergänzungstechnologie ist **Grundsatzentscheidung**. (Industrieländer =können mit SMR leben, Schwellenländer werden große Reaktoren brauchen- weiterhin bauen).
- **Kernenergienutzung erfordert immer:**
 - **Kontinuität** der Entscheidungen (ökonomische&soziale Stabilität, Generationenvertrag)
 - Einbeziehung von **Wiederaufbereitung, Transmutation und Endlagerung**.
- **Sicherheit** der Kernspaltungskraftwerke **steigend** (unterschiedlichen Treibern)
 - Technologieentwicklung,
 - Rechnerkapazitäten erlauben Erfassung von Zusammenhängen,
 - internationale Kooperation auf allen Ebenen.
- Unabhängig von der Entscheidung (zur Nutzung der Kernspaltungsenergie) **muss weitere Verringerung der Bildung & Forschung** (Bund & Länder) **eingestellt werden**
 - glaubwürdige Beurteilungsfähigkeit internationaler Entwicklungen nicht gewährleistet;
 - Entscheidungshorizont zukünftiger Generation um eine Option ärmer,
 - wirtschaftliche Entwicklung des Standortes gefährdet.

Wieviel ist viel Abfall ?

Radiologische Last eines $1000MW_{el}$ Druckwasserreaktors

- $200-350m^3$ niedrig und mittelaktiver Müll pro Jahr
- $10m^3$ ($20-25t$) an verbrauchtem Brennstoff pro Jahr
 - ➔ $75m^3$ Lagervolumen, wenn alles als Nuklearmüll betrachtet wird (reine Zwischenlagerung).
- Wiederaufbereitung des Brennstoffs
 - ➔ Volumenreduktion abhängig von Technologie Faktor 10-30 (theoretisch wesentlich mehr)
 - ➔ $3-7m^3$ von verglastem Abfall für Endlager.

zum Vergleich $1000MW_{el}$ Kohlekraftwerk ^{*1}

- $3 \cdot 10^6 t$ CO_2 Emissionen +
- $4.5 \cdot 10^5 t$ an Asche +
- Schwermetalle wie As, Cd, Hg, Pb or Thallium ^{*2}

^{*1} <https://ourworldindata.org/grapher/carbon-dioxide-emissions-factor>

^{*2} zum Nachrechnen O. Rentz; Ch. Martel, 1998, Analyse der Schwermetallströme in Steinkohlefeuerungen– Einfluss der Kohlesorte und des Lastzustandes, Förderkennzeichen: PEF 4 96 001