

**Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH**

# **SMR: kleine modulare Reaktoren**

## **Historie – aktuelle Tendenzen – Merkmale**

**Andreas Schaffrath** (*andreas.schaffrath@grs.de*)

Anne Krüßenberg (*anne.kruessenberg@grs.de*)

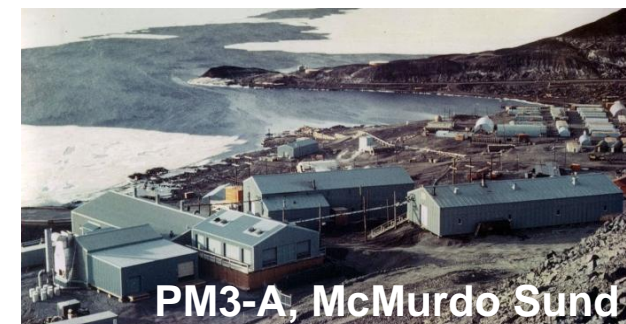
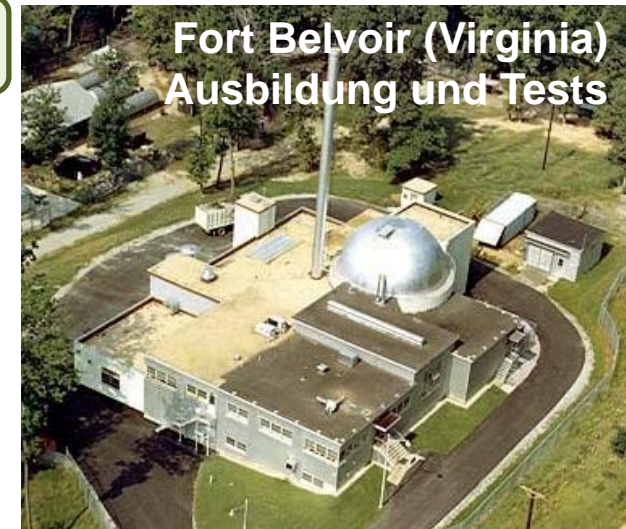
Sebastian Buchholz (*sebastian.buchholz@grs.de*)

46. Kraftwerkstechnisches Kolloquium 2014

Dresden, 15. Oktober 2014

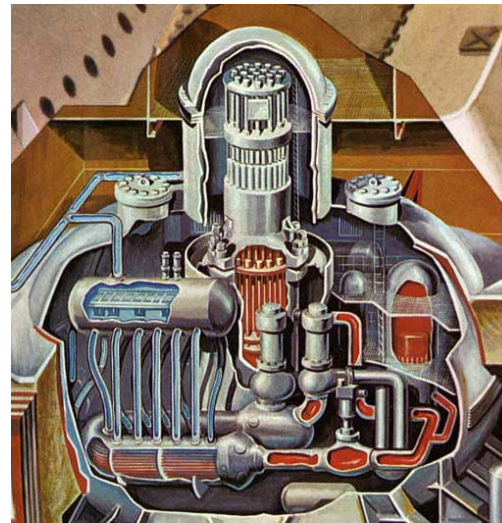
## SMR Definitionen und Historie (1)

- **zwei Definitionen** – IAEA: Small and Medium Sized Reactors – USA: Small Modular Reactors
- $P_{el} < 300 \text{ MW}_{el}$  (klein) bzw.  $600 \text{ MW}_{el}$  (mittelgroß)
- prinzipiell kein neues Thema – ihre Konstruktion sowie der Bau begannen ab 1950
- bislang wurden ca. 130 SMR weltweit gebaut, von denen zahlreiche heute noch in Betrieb sind
  - Army Nuclear Power Programm, Bau von 8 KKW in Alaska, Grönland und der Antarktis zur **Energie- und Wärmeversorgung abgelegener Orte**, z.B. in der
    - Arktis Fort Greely
    - Antarktis Nukey Poo am McMurdo Sund (beide 1962 – 1972)
  - **Schiffsantriebe** im militärischen sowie zivilen Bereich wie z.B. Handelsschiffe: Folie 3, Eisbrecher und U-Boote: Folie 4  
[de.wikipedia.org/wiki/Liste\\_ziviler\\_Schiffe\\_mit\\_Nuklearantrieb](http://de.wikipedia.org/wiki/Liste_ziviler_Schiffe_mit_Nuklearantrieb)
  - **mobile Reaktoren** z.B. auf LKW (Transportable Energy Station (TES), PAMIR 630D): Folie 5

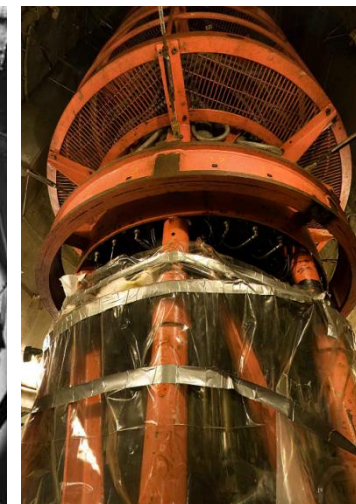
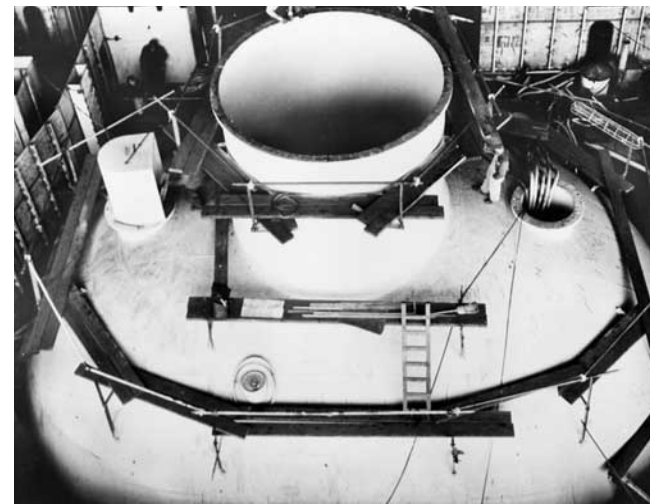




## Historie (2) – Schiffsantriebe



**NS Savannah** (1962 - 1970, erstes Fracht- und Passagierschiff mit einem Nuklearantrieb, DWR B&W, 47 Mio. US\$, National Historic Landmark)





## Historie (3) – Schiffsantriebe

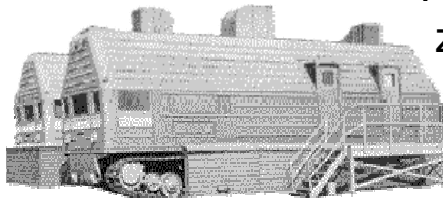


**NS YAMAL:**  
Eisbrecher, Kreuz-  
fahrt- und Expedi-  
tionsschiff, Bau-  
jahr 1990, 50 Ka-  
binen, 100 Pas-  
sagiere, Nord-  
polmeer, Kosten  
für 2 Wochen ca.  
12.000 US\$

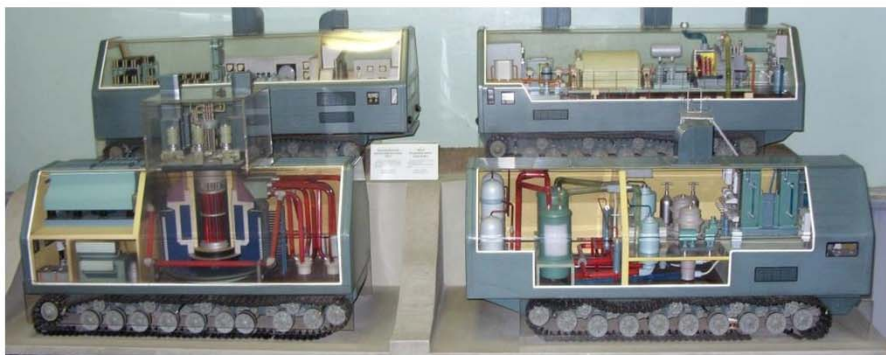


## Historie (4) – mobile Reaktoren

### TES-3: (Transportable Nuclear Energy Station)



$P_{th} \approx 9 \text{ MW}$ ,  $P_{el} \approx 1,5 \text{ MW}$   
 zylind. Kern ( $\varnothing 600 \text{ mm}$ ,  
 $h \approx 660 \text{ mm}$ ), 74 BE,  
 130 bar, Zykl. 250 Tage,  
 Wirkungsgrad 17%



### PAMIR 630-D oder GREM (NIKIET):

$P_{th} \approx 5 \text{ MW}$ ,  $P_{el} \approx 2 \text{ MW}$ , Gewicht ca. 50 to  
 HTGR mit einer Gasturbine und Luftkühlung  
 (um unabhängig von einer Kühlwasserversorgung zu sein), Herstellung in einer Fabrik, Lebensdauer 25 Jahre, Beladung mit Brennstoff für 10 Jahre



## Aktuelle Tendenzen (1) – Situation weltweit

- Gründe für das **international große Interesse**:
  - SMR können in einer Fabrik auf einer Produktionsstraße zusammengebaut werden
  - SMR werden dann per LKW oder Schiff zum Einsatzort transportiert
  - am Ende der Betriebszeit können SMR wieder in die Fabrik zurückgebracht werden
  - SMR erfordern einen geringeren Kapitaleinsatz beim Bau, dies erleichtert die Finanzierung (Festpreis, Entfall des Risikos für Verzögerungen bei der Fertigstellung)
  - je nach Strombedarf können SMR schrittweise Modul um Modul zu größeren Produktionsanlagen erweitert werden
  - SMR Einsatz in Gebieten mit schlecht ausgebauten Hochspannungsnetzen
  - SMR benötigen wenig Wartung, sie können teilweise mehrere Jahre bzw. (bei den schnellen Reaktoren) Jahrzehnte ohne Brennstoffnachladung Strom und Wärme produzieren
  - SMR besitzen geringe Betriebskosten
  - SMR erfüllen höchste Sicherheitsstandards durch den konsequenten Einsatz passiver (Sicherheits-) Systeme



## Aktuelle Tendenzen (2) – Situation weltweit

- gemäß World Nuclear Association (WMA) werden in 2 Ländern stationäre SMR betrieben sowie in 3 weiteren Ländern gebaut:
  - **Indien:** 4 PHWR Blöcke am Standort Kaiga (Inbetriebnahme in 2000 Block 1 / 2, 2007 Block 3 und 2011 Block 4 ), schwerwassermoderiert mit einer thermischen Leistung von 220 MW<sub>el</sub>, der Bau zweier weiterer Blöcke wurde aufgegeben, Zyklus 24 Monate, Lebensdauer 40 Jahre
  - **Pakistan:** betreibt / baut SMR an zwei Standorten
    - **Kanupp** ca. 25 km südwestlich von Karachi (15 Mio. Einwohner) betreibt Pakistan einen Schwerwasserreaktor vom Typ CANDU-137 mit einer Leistung von ca. 130 MW<sub>el</sub> (Baubeginn 1966, Inbetriebnahme 1971, geplante Abschaltung 2019)
    - am Standort **Chasnupp** (bzw. Chasma) 280 km südwestlich von Islamabad 2 chinesische Reaktoren vom Typ CNP-300 (ähnlich der Anlage Qinshan-1) mit je einer Leistung von 325 MW<sub>el</sub>  
zwei weitere Blöcke vom gleichen Typ sind im Bau und sollen 2015 bzw. 2016 ans Netz gehen

NPP Kaiga I - IV



NPP Kanupp



NPP Chasnupp I - II



## Aktuelle Tendenzen (3) – Situation weltweit

- gemäß World Nuclear Association (WNA) werden in 2 Ländern stationäre SMR betrieben sowie in 3 weiteren Ländern gebaut:

- **Russland: Academic Lomonossov**, schwimmendes KKW, das z.B. für die Strom- und Wärmeversorgung entlegener Hafenstädte oder die Meerwasserentsalzung eingesetzt werden soll



zwei DWR vom Typ KLT40-S (DWR, 135 MW<sub>th</sub>, 35 MW<sub>el</sub>, 274 BE mit 30 – 40 % Anreicherung, Zyklus 3 – 4 Jahre)

- **Argentinien:** Baubeginn des **CAREM** (**C**entral **AR**gentina de **E**lementos **M**odulares) am 8. Februar 2014 in Lima, 110 km nordwestlich von Buenos Aires, Bauzeit ca. 3 a, 70% der Komponenten werden in Argentinien hergestellt



Academic Lomonossov

- **China:** Hochtemperaturreaktor, **HTR-PM** 500 MW<sub>th</sub>, 200 MW<sub>el</sub>, Anreicherung 8,5%, Zyklus 35 Monate, Baubeginn 12/2012 basierend auf dem Konzept des HTR-10 auf dem Gelände des Institutes für Nuclear and New Technology (INET) der Tsinghua-Universität in Peking
- **USA:** in 2011 / 2013 bewilligt DOE Fördergelder für Entwicklung der SMR mPower und NuScale





## Aktuelle Tendenzen (4) – Situation in Deutschland

- Nach Fukushima entschied die Bundesregierung auf die Nutzung der Kernenergie zur kommerziellen Stromerzeugung zu verzichten. Dies gilt auch für SMR!
- **Warum beschäftigten wir uns in Deutschland und speziell auch die GRS überhaupt noch mit SMR?**



## Aktuelle Tendenzen (5) – Situation in Deutschland und bei der GRS

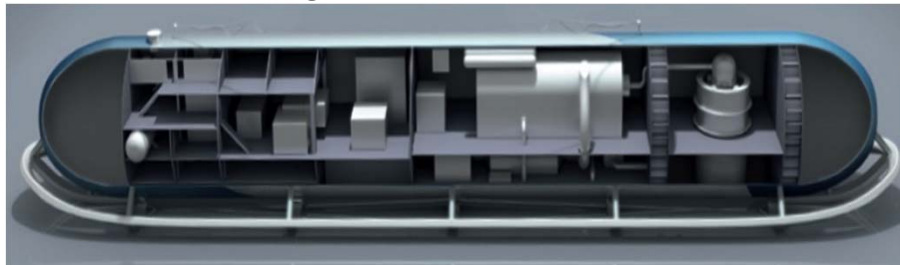
- Nach Fukushima entschied die Bundesregierung auf die Nutzung der Kernenergie zur kommerziellen Stromerzeugung zu verzichten. Dies gilt auch für SMR!
- **Warum beschäftigten wir uns in Deutschland und speziell auch die GRS überhaupt noch mit SMR?**
- 6. Energieforschungsprogramm der Regierung (6/2011) beinhaltet das Bekenntnis aktuelle kerntechnische Entwicklungen speziell im Ausland (z.B. SMR) zu verfolgen
- GRS ist die **zentrale technische Sachverständigenorganisation** (TSO – Technical Safety Organisation) für die Bundesregierung
- **Studie zur Sicherheit von SMR** im Auftrag des BMWi
  - Sichtung und Auswertung von SMR Konzepten einschließlich ihrer Sicherheitskonzepte/-merkmale
  - Notwendigkeit von Modellverbesserungen der GRS Programme (Thermohydraulik, Neutronenkinetik und Fluid-Struktur-Wechselwirkungen)





## Merkmale von SMR (1): allgemein

- in der Literatur über 100 verschiedene SMR Konzepte
- an 50 wird intensiv gearbeitet
- die Konzepte werden nach dem Kühlmittel unterteilt:
  - leichtes Wasser (siehe Liste auf der linken Seite)
  - schweres Wasser (EC6, PHWR-220, SHWR300-LEU)
  - Flüssigmetalle wie Blei oder Natrium (CEFR, HPM, SSTAR, SVBR-100, 4S, SHNS, PRISM, G4M)
  - Salzschnmelzen, Brennstoff und Kühlmittel ist Uranfluorid (FUJI)
  - Gase (HTR-10, Adams Engine, EM<sup>2</sup>, GT-MHR, MTSPNR)
- nachfolgend Fokussierung auf leichtwassergekühlte SMR (da hierzu weltweit die größten Erfahrungen bzgl. Genehmigung und Betrieb vorliegen)
- Diskussion genereller Tendenzen und Vergleich mit DWR



SMR basierend auf LWR Technologie
CAREM
FBNR
CNP-300
Flexblue
IMR
SMART
ABV-6M
SHELF
RITM-200
VK-300
VBER-300
WWER-300
KLT-40S
UNITHERM
IRIS
mPower
NuScale
Westinghouse SMR
HOLTEC SMR-160 / HI-SMUR
VKT-12
MRX
NP 300
NHR-200
TRIGA
ACP-100

## Merkmale von SMR (2): Kern

- besteht oftmals aus eingekürzten Standardbrennelementen (z.B. 17x17 Brennstäben mit einer aktiven Länge zwischen 2 – 2,5 m)
- ca. 50 – 80 BE
- Zykluszeit mehrere Jahre (2 bis 10 Jahre je nach Konzept)
- BE-Wechsel oder Austausch einzelner SMR Module, die anderen Module laufen weiter, hierdurch ergibt sich eine hohe Verfügbarkeit der Gesamtanlage
- Bsp: NuScale: Zyklus 24 Monate, alle zwei Monate ein BE-Wechsel
- Vermeidung einer Personalspitze (derzeit ca. 1000 MA) beim BE-Wechsel
- Module werden am Ende ihrer Lebenszeit in die Fabrik zurückgebracht
- radioaktives Inventar < 5% eines großen DWR
- bei einer postulierten Freisetzung radioaktiver Stoffe, würden diese weitgehend im Wasserpool, in dem sich die Module befinden, zurückgehalten

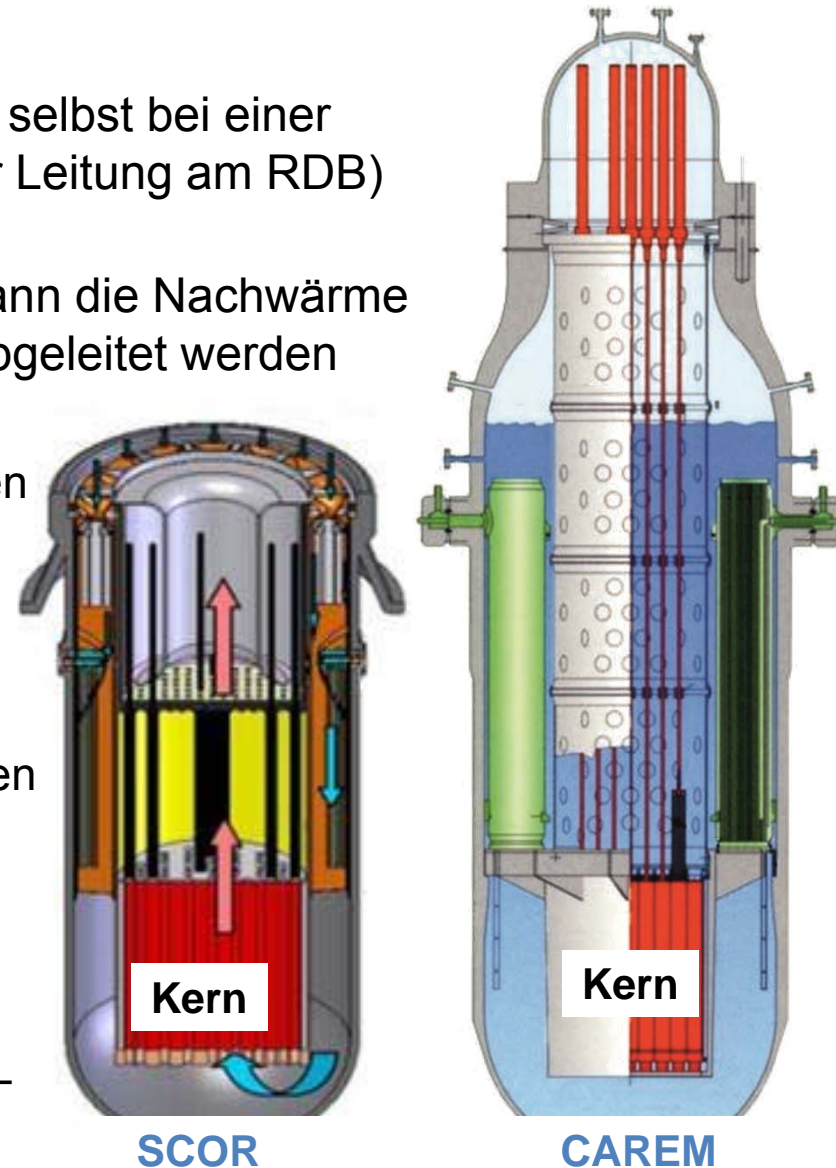


**NuScale (NuScale Power Inc.):  
bis zu 12 Reaktoren mit je einer Leistung  
von 45 MW<sub>el</sub> (in Summe 540 MW<sub>el</sub>)**



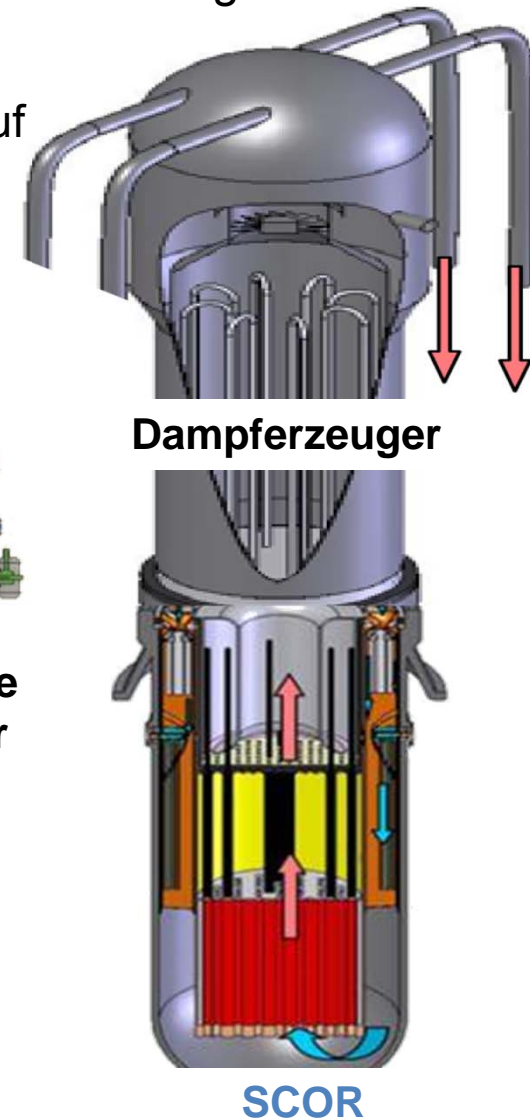
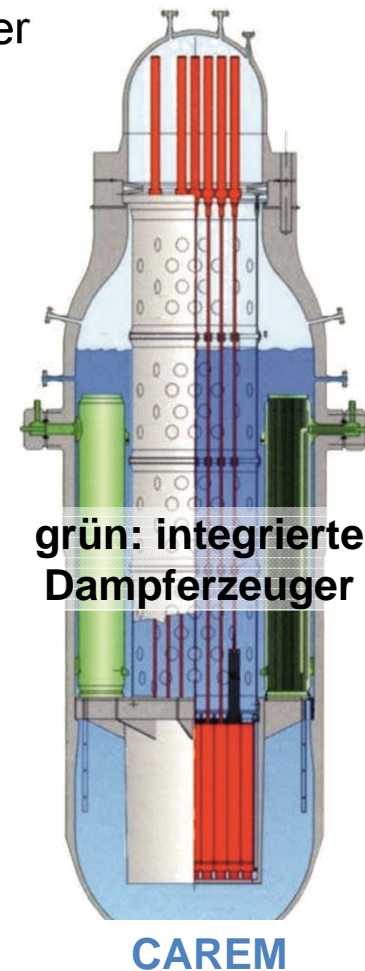
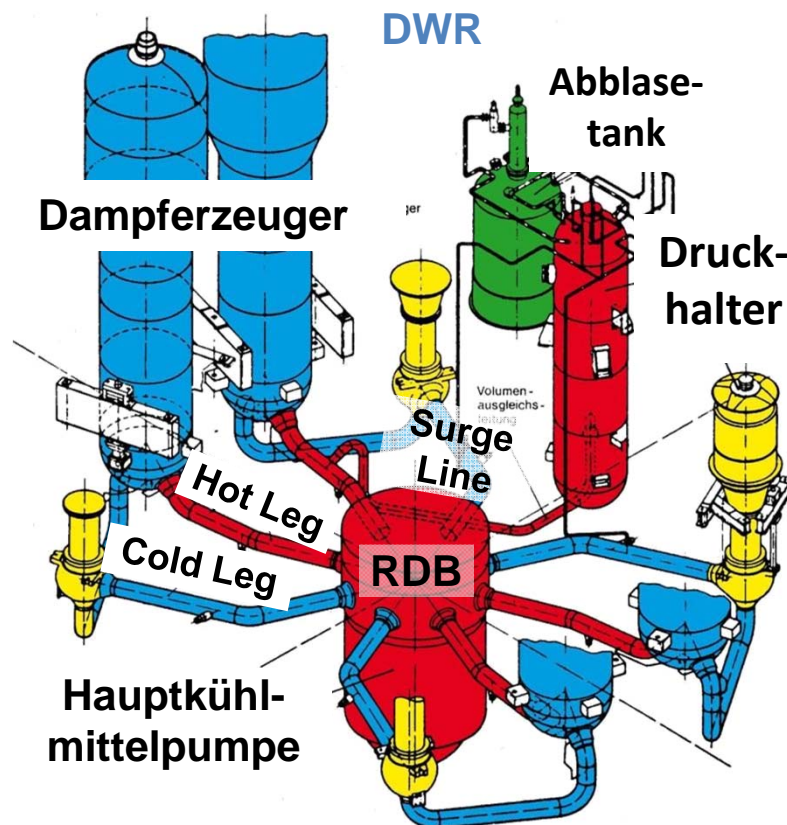
## Merkmale von SMR (3): Kern

- der Kern ist tief im RDB angeordnet
- hohe Wasserüberdeckung, der Kern wird selbst bei einer Druckentlastung (z.B. infolge Abriss einer Leitung am RDB) nicht freigelegt
- bis zu einer Leistung von ca. 200 MW<sub>el</sub> kann die Nachwärme bei völligem Ausfall der Kühlung sicher abgeleitet werden
- bessere Wärmeabfuhr durch:
  - reduzierte Leistungsdichte gegenüber den derzeit betriebenen DWR (- 25%)
  - kleinere Abstände der RDB Wand vom Kern
  - stärkere Krümmung der RDB-Wand, bei gleichen Drücken → kleinere Wandstärken
  - größ. Oberflächen zu Volumenverhältnis
  - bei Verzicht auf Pumpen führt ein Stromausfall zu keiner Verschlechterung der Kühlung
- borfreier Kern → keine Gefahr von Deborierungsstörfällen



## Merkmale von SMR (4): integrales Design

- d.h. alle Komponenten des Primärkreislaufes sind im RDB untergebracht
  - Druckhalter, Kühlmittelpumpen (sofern vorhanden)
  - integrierte Dampferzeuger (CAREM) oder von oben auf den RDB aufgesetzter Dampferzeuger (SCOR)



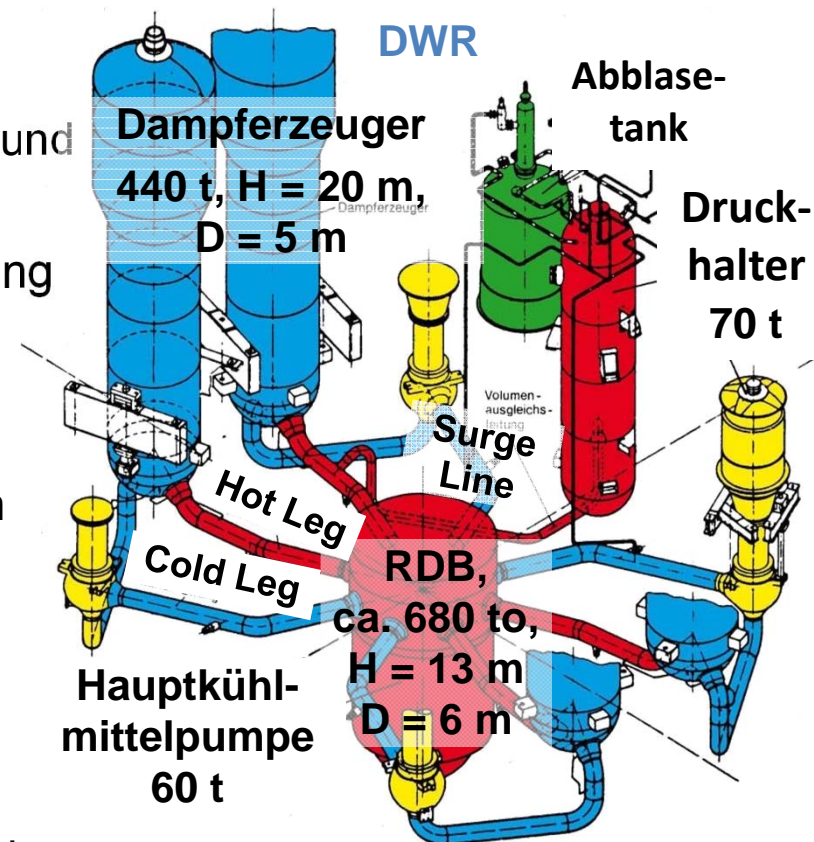


## Merkmale von SMR (5): integrales Design, Fortsetzung

- bei derzeit betriebenen DWR ist jede Baugruppe so groß (RDB, Dampferzeuger, Pumpen, Druckhalter, Abblasetank), dass diese
  - isoliert gefertigt
  - zur Baustelle transportiert
  - auf der Baustelle miteinander verbunden und
  - hier geprüft werden muss.

Kosten / Risiken für eine Baustellenfertigung sind deutlich höher:

- höhere Stundensätze aufgrund höherer Nebenkosten
- Fertigung vor Ort ist Witterungseinflüssen ausgesetzt
- kein Einsatz von Vorrichtungen
- Dreck
- höheres Ausschussrisiko
- Prüfung vor Ort
- große Komponenten können nur von wenigen Lieferanten hergestellt werden (Limitierungen beim Schmieden) und von Montagefirmen weiterverarbeitet werden

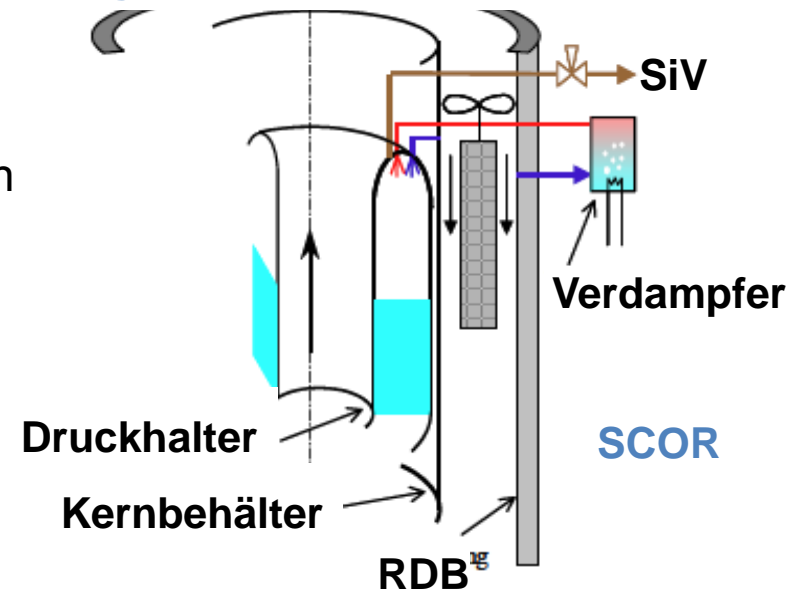


## Merkmale von SMR (6): integrales Design, Fortsetzung

### ▪ integrierter Druckhalter

- umgekehrtes U im Kernbehälter
- Druckaufbau durch Einspeisen von Dampf aus einem seitlich am RDB angeschlossenen Behälter mit einer elektrischen Heizung
- Druckabsenkung mittels Sprühen von kälterem Wasser aus dem Downcomer
- deutliches kleineres Dampf- und Wasservolumen – höhere Anforderungen an die Regelung

### Integrierter Druckhalter des SCOR

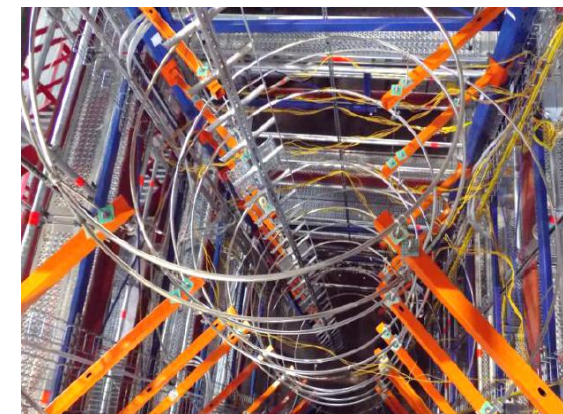


### ▪ kompakte Wärmetauscher

- Anordnung z.B. im Downcomer
- Steigerung der Effizienz durch
  - dünnere Wände
  - verbesserte An- / Umströmung
 → Gefahr von strömungsinduzierter Schwingungen
- **helikale Bauformen** (um bei geringen Höhen große Oberflächen zu realisieren), **Plattenwärmetauscher**



helikale  
Dampf-  
erzeuger

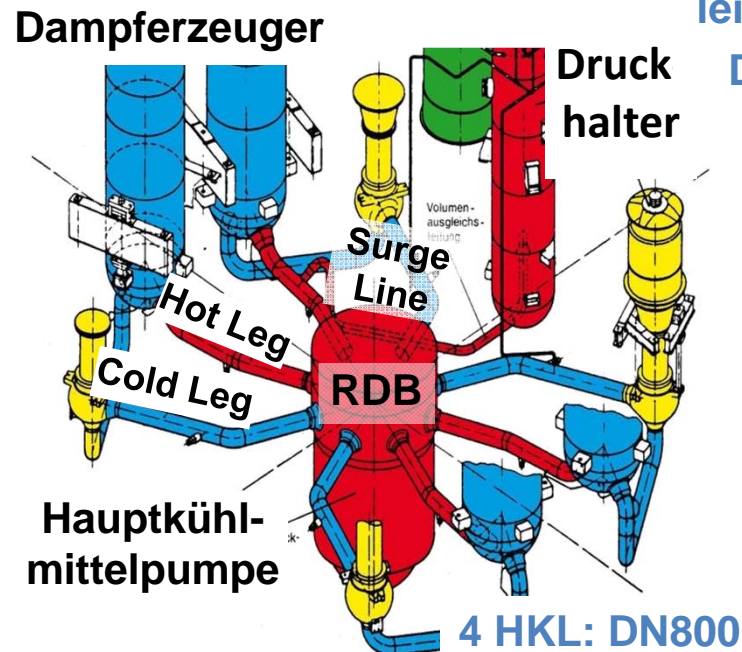


SIET Teststand

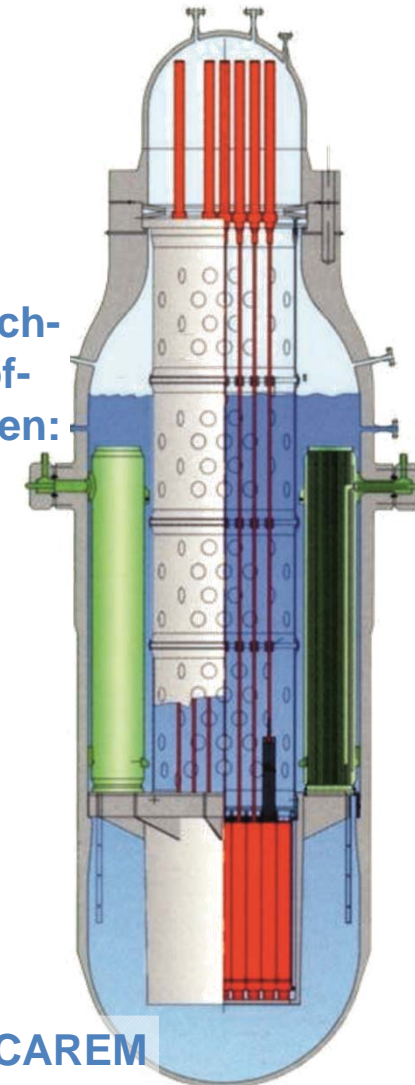


## Merkmale von SMR (7): integrales Design, Fortsetzung

- integrales Design bedeutet **keine aktivitätsführenden Kühlmittleitungen**
  - **Eliminierung von (großen) Lecks** (DWR doppelendiger Bruch einer Hauptkühlmittleitung DN 800  $\approx 1 \text{ m}^2$ , SCOR Leitung des Druckhaltesystems DN50  $\approx 0,004 \text{ m}^2$ ,  $\rightarrow$  250 mal kleiner, CAREM DN30  $\rightarrow$  700 mal kleiner)
  - Minimierung der Anzahl der an den RDB angeschlossenen Leitungen
  - alle Anschlussstutzen weit oberhalb der Kernoberkante
  - einfachere Beherrschung von KMV
  - Minimierung der Belastungen der Kerneinbauten
  - geringere Containmentlasten
  - hohe schlanke Behälter, ideal für Naturkonvektion



12 Frischdampfleitungen:  
DN30

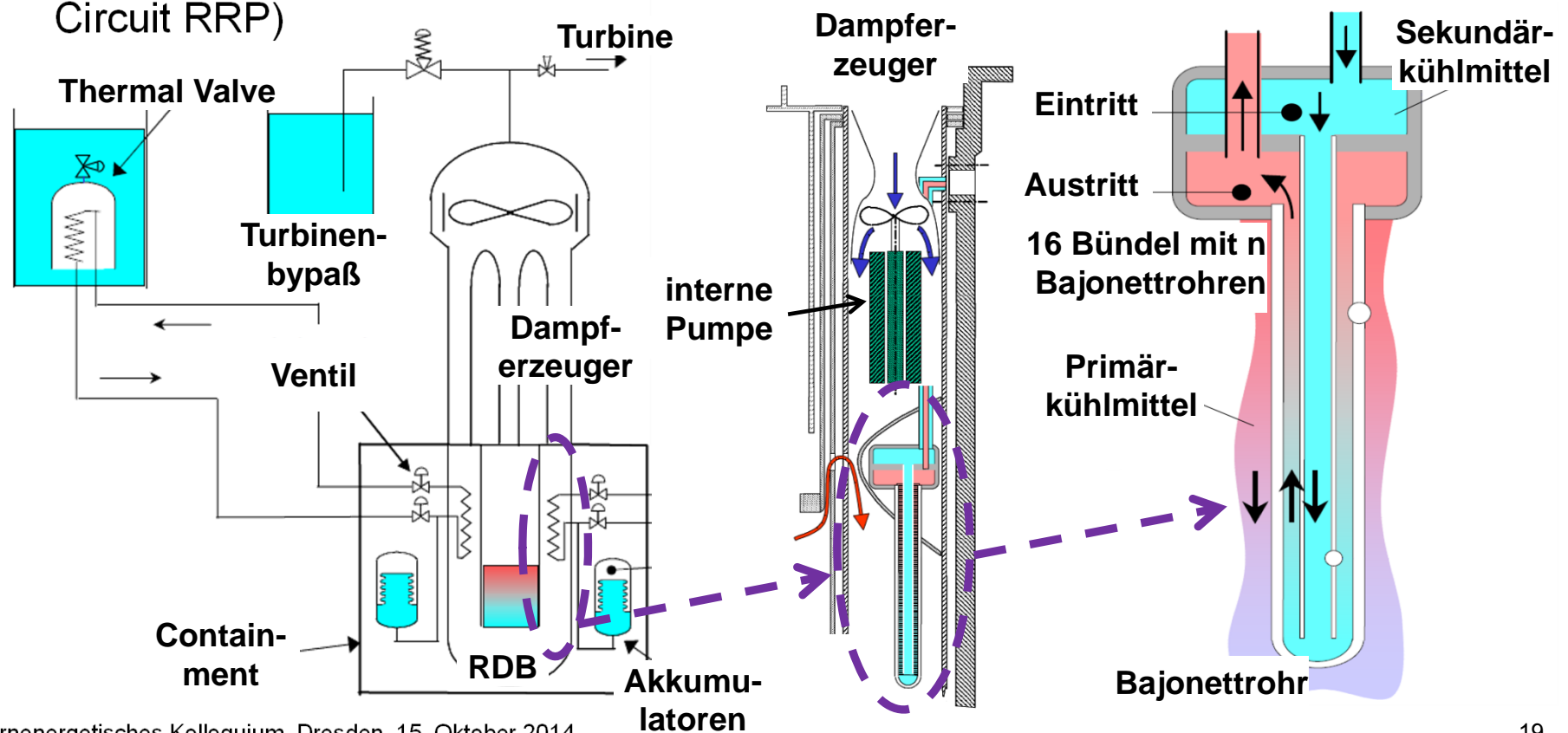


## Merkmale von SMR (8): (passives) Sicherheitssystem

- Kernkraftwerke müssen die Anforderungen des sog. kerntechnischen Regelwerkes der jeweiligen Länder erfüllen
- „Massenproduktion“ von SMR erfordert jedoch neue Sicherheitskonzepte sowie Genehmigungsfähigkeit eines Designs in verschiedenen Ländern
- passive Sicherheitssysteme (Funktionsweise beruht auf Naturgesetzen (Konvektion, Kondensation, Verdampfung, Gravitation) sind unabhängig von externer Energieversorgung, Ansteuerung sowie Operatoreingriffen
  - Ausführung der Schaltanlagen wie bei einem konventionellen Kraftwerk
- Auswirkungen von Unfällen müssen auf die Anlagen begrenzt bleiben (Voraussetzung für den Einsatz)
  - in Städten (speziell mit starker Luftverschmutzung) oder
  - in der Nähe industrieller Anlagen (Wasserstoffherzeugung, Chemie, Raffinerien))
- ausgewählte Beispiele:
  - SCOR: Nachwärmeabfuhr aus dem Kern und dem Containment
  - Einwirkungen von außen (EVA): Einbringung von SMR in Kavernen, auf dem Meer schwimmend bzw. Aufstellung auf dem Meeresboden

## Merkmale von SMR (9): Nachwärmeabfuhr (Kern)

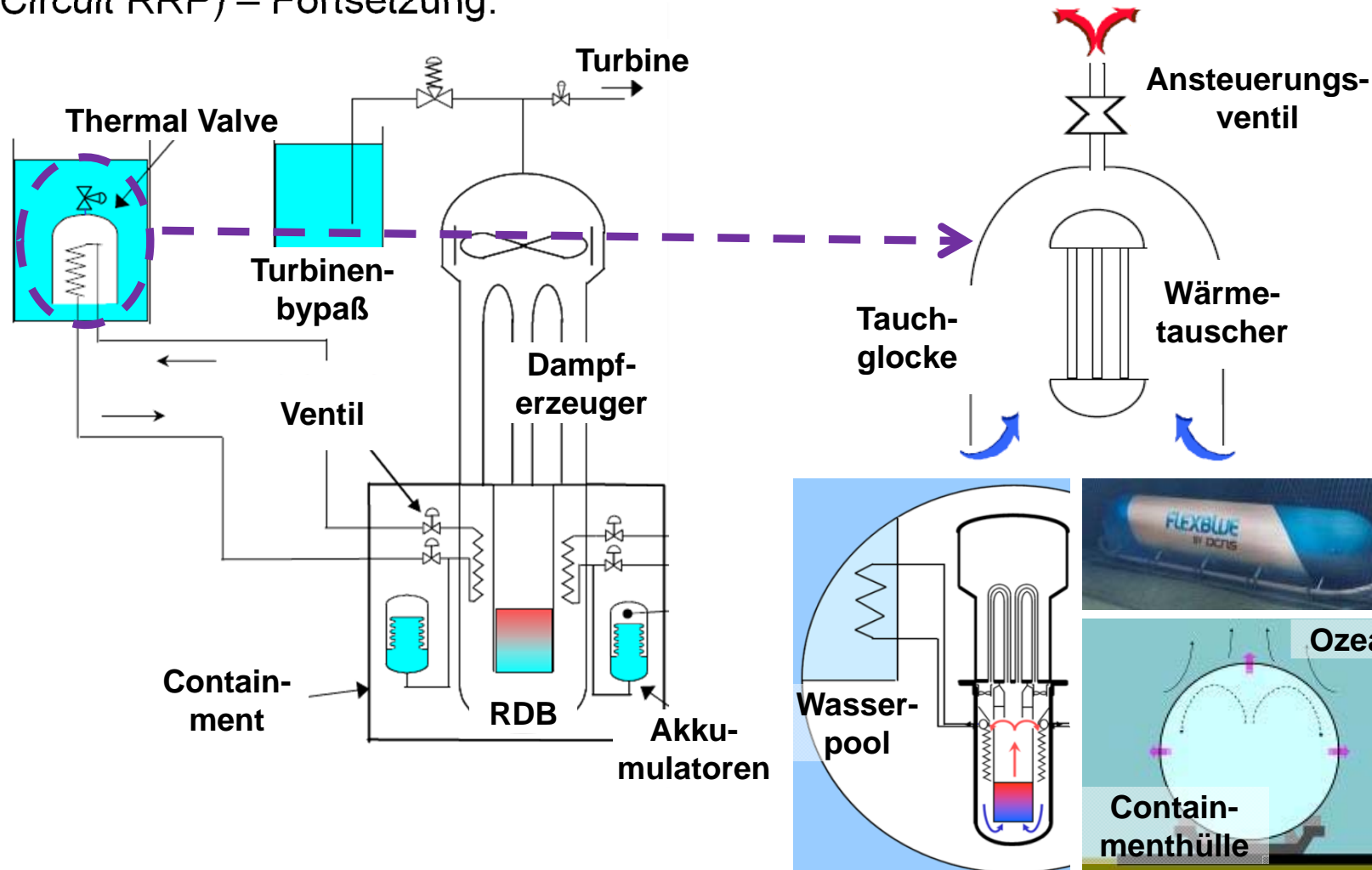
- Transienten, Störfälle bzw. Unfälle laufen langsamer ab als bei LWR
  - geringere Leistungsdichte im Kern, hohe Wasserüberdeckung
  - bessere Nachwärmeabfuhr (Abstand Kern und RDB Wand, dünne RDB-Wände)
  - RDB Design (schlank und hoch) ist ideal für Naturkonvektion
- Beispiel für ein passives Sicherheitssystem (Residual heat Removal on Primary Circuit RRP)





## Merkmale von SMR (10): Nachwärmeabfuhr (Kern / Containment)

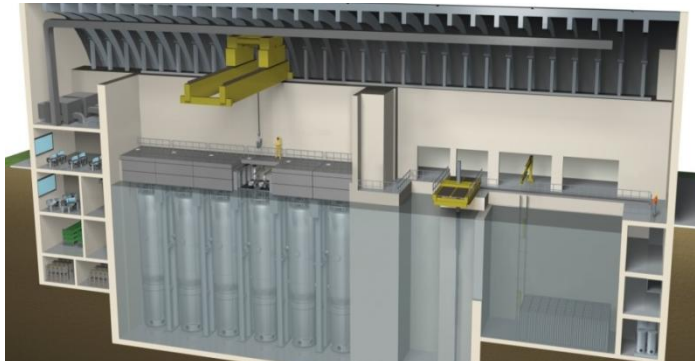
- Beispiel für ein passives Sicherheitssystem (Residual heat Removal on Primary Circuit RRP) – Fortsetzung:



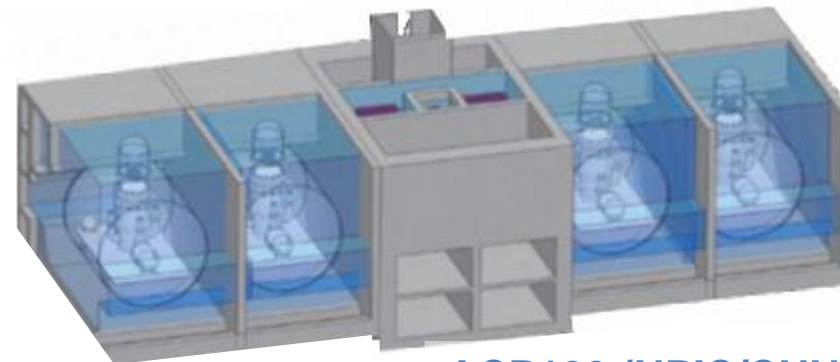
## Merkmale von SMR (11): Einwirkungen von außen (EVA)

3 verschiedene Ansätze zum Schutz von SMR vor EVA (wie Erdbeben, Explosionsdruckwellen, Flugzeugabsturz, Überflutung, etc.)

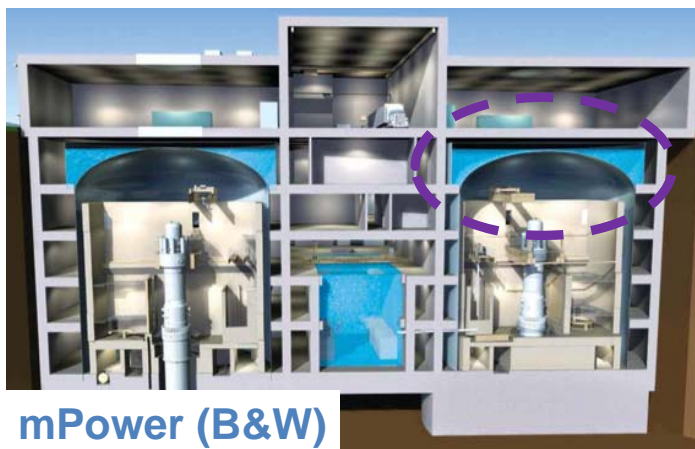
- unter Wasser in **Kavernen**
  - Rückhaltung von radioaktiven Spaltprodukten in der Wasservorlage



NuScale (NuScale Power Inc.)

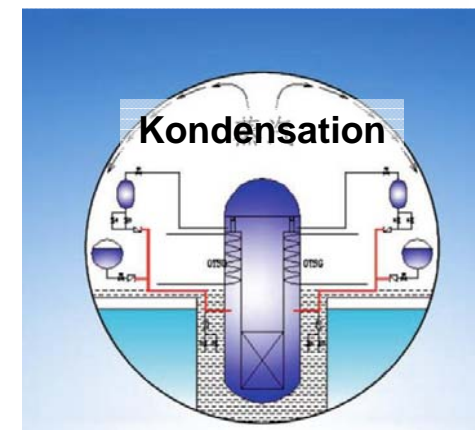


ACP100 (NPIC/CNNC)



mPower (B&W)

Hinweis:  
beim mPower ist  
nur der obere Teil  
des Containments  
mit Wasser benetzt

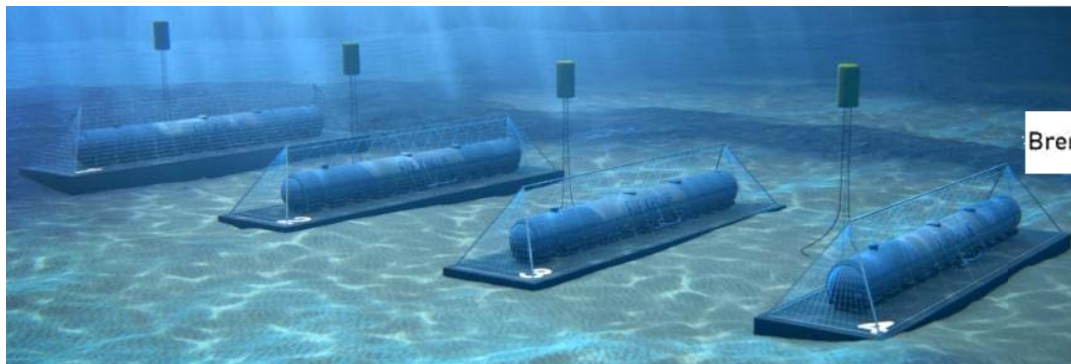
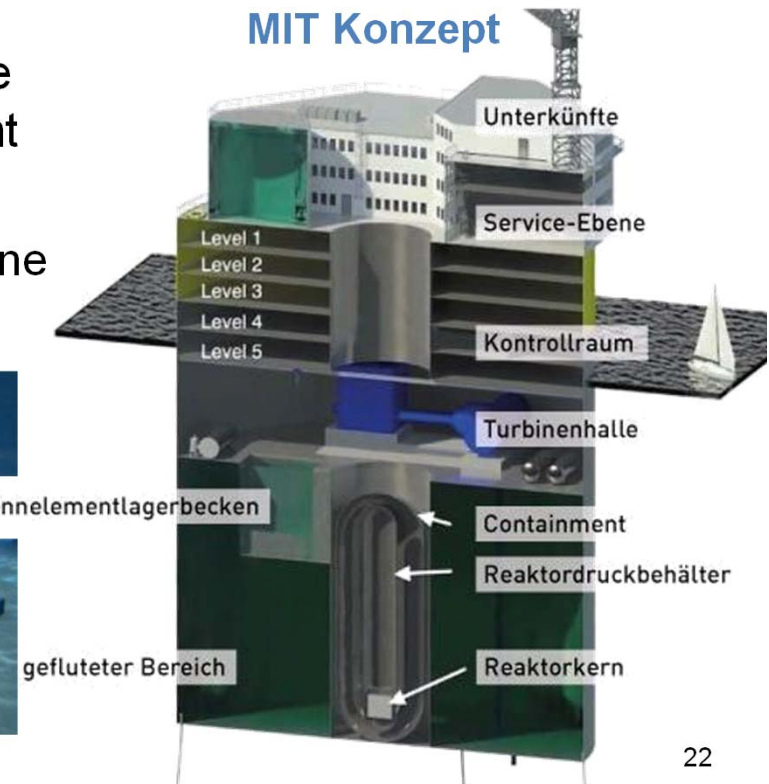


## Merkmale von SMR (12): Einwirkungen von außen (EVA), Fort.

- **schwimmende SMR** einige km vor den Küsten:  
Betrieb in Meerestiefen von größer 100 m, das Design ist angelehnt an Off-Shore Bohrinseln
  - Erdbeben und Tsunamis haben keine Auswirkungen mehr
  - Meer ist eine nahezu unerschöpfliche Wärmesenke
- **SMR auf dem Meeresboden**  
Kraftwerk soll in einer 100 – 150 m langen Hülle mit einem Durchmesser von 15 m untergebracht werden, die Kontrollräume sind an Land
  - zeitlich unbegrenzte Abfuhr der Nachwärme ohne Strom oder externe (Personal-)Maßnahmen



MIT Konzept



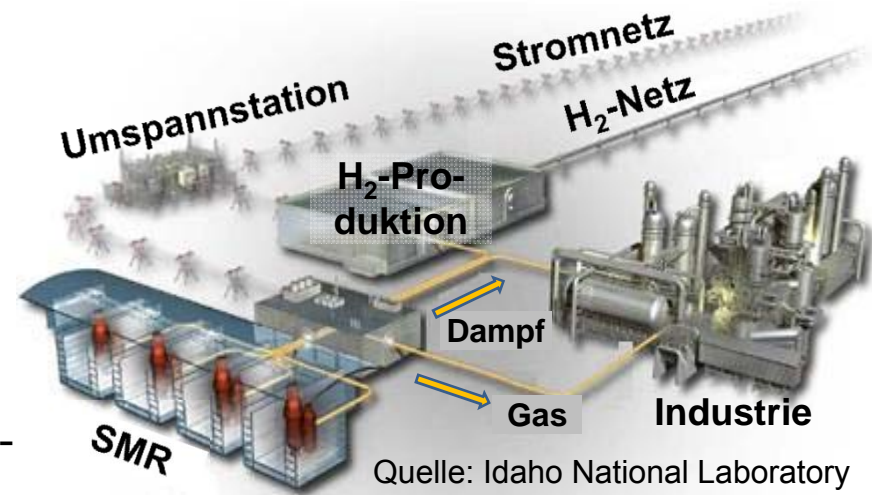


## Zusammenfassung

- **Definitionen von SMR** (IAEA: Small and Medium Sized Reactors  $P \leq 600 \text{ MW}_{el}$ ; USA: Small and Modular Reactors  $P \leq 300 \text{ MW}_{el}$ )
- Vorstellung ausgewählter Beispiele der bislang weltweit betriebenen SMR (u.a. zur Energie- und Wärmeversorgung abgelegener Orte, Schiffsantriebe sowie mobiler Reaktoren)
- aktuelle Situation im Ausland (neue Reaktorkonzepte in Entwicklung) und in Deutschland (Ausstieg aus der Nutzung von KKW zur kommerziellen Stromerzeugung, Forschung zur Verfolgung und Bewertung aktueller Entwicklungen)
- ausgewählte Merkmale von SMR
  - Kern
  - integrales Design und Eliminierung großer Lecks
  - passive Nachwärmeabfuhrsysteme aus dem Kern bzw. dem Containment
  - verbesserter Schutz gegen Einwirkungen von außen (EVA) durch Aufstellung von SMR unterirdisch in Kavernen bzw. auf dem Meeresboden bzw. durch schwimmende SMR)
- KKW der Generation 3+: führen die Nachwärme selbstständig über einen Zeitraum von 72 h ab, einige SMR: zeitlich unbefristet → **neues Sicherheitsniveau**

## Ausblick

- SMR besitzen **gute Chancen zur Realisierung**, Einsatz in Nähe der Verbraucher, Anwendungsspektrum übertrifft das der großen KKW
  - Strom, Fern- und Prozesswärme
  - Backup für Wind- und Solarenergie aufgrund hoher Lastfolgegeschwindigkeit
  - Versorgung von Raffinerien und Chemie-parks, kanadischen Ölsandgebiete
  - schwache Stromnetze, Inselösung (Meerwasserentsalzung, Militärstützpunkte)
- nächster Schritt **Lizenzierung**
  - die SMR, die auf LWR Technologie basieren, sind im Vorteil (zu LWR liegen bei den Genehmigungsbehörden die größten Erfahrungen vor)
  - Typzertifizierung (kein neues Genehmigungsverfahren bei Zubau eines Moduls)
  - Internationale Anerkennungen von Zertifizierungen, Harmonisierung von Regelwerken
- **Hersteller**
  - Wirtschaftlichkeit von SMR erfordert Bau in großen Stückzahlen (ca. 100)
  - SMR müssen in den verschiedenen Länder identisch sein (Harm. der Regelwerks)
  - Weltmarkt wird von einigen wenigen Herstellern beherrscht



# Vielen Dank für ihre Aufmerksamkeit!

Hinweis: In diesem Vortrag werden Ergebnisse des Forschungsvorhabens *Studie zu Small Modular Reactors (SMR)* mit dem Förderkennzeichen RS1521 verwendet, das mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert wird.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages