

# Reinventing Nuclear

# Warum Kernkraft neu erfinden?

# Energie definiert die Zivilisation

Mittelalter, Neuzeit



- Entdeckung konzentrierter Brennstoffe: Kohle, Öl

18./19. Jh



- Optimierte Nutzung v. Kohle + Öl durch neue Technologien
- Erhöhung der verfügbaren Energie um Faktor 10

21. Jh

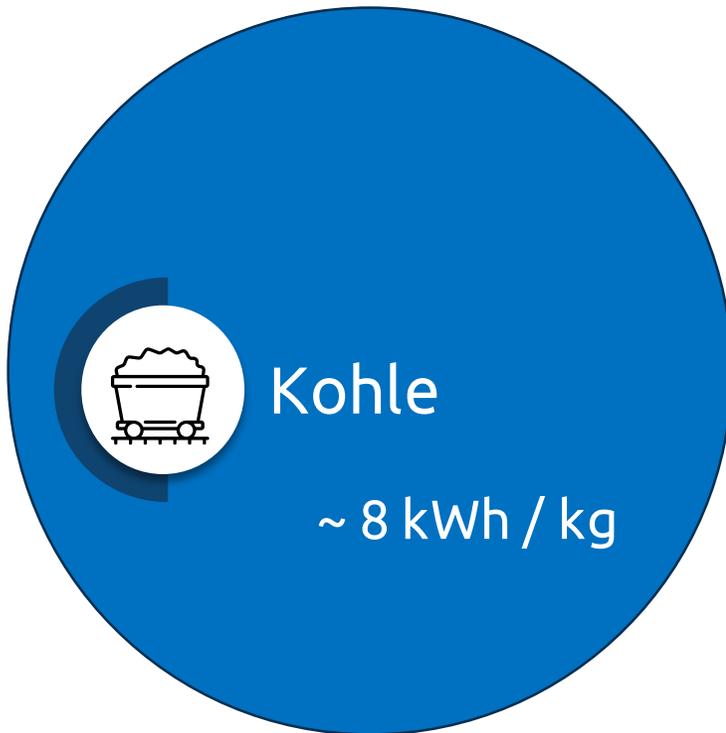


- Optimierte Nutzung der Kernkraft

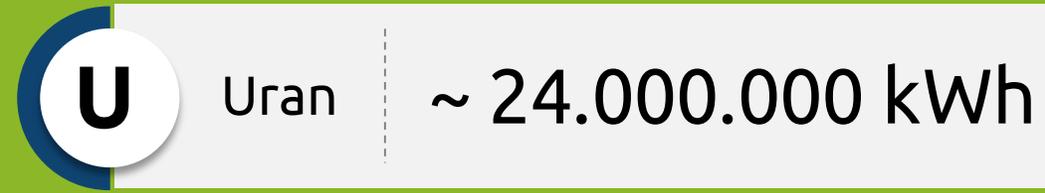
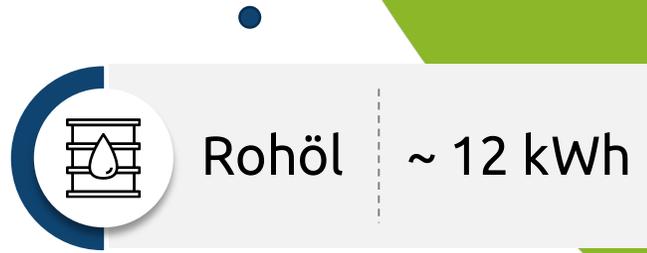


Moderner Lebensstil  
Doppelte Lebenserwartung

# Energiegehalt von Brennstoffen: Kohle und Rohöl



# Energiegehalt von Brennstoffen: Uran



# Energiegehalt von Brennstoffen: Uran

**U** Uran enthält **2 Millionen Mal** mehr Energie als fossile Brennstoffe!

# Leistung von Kraftwerken: Energy Return (EROI)

EROI

=

$$\frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}}$$

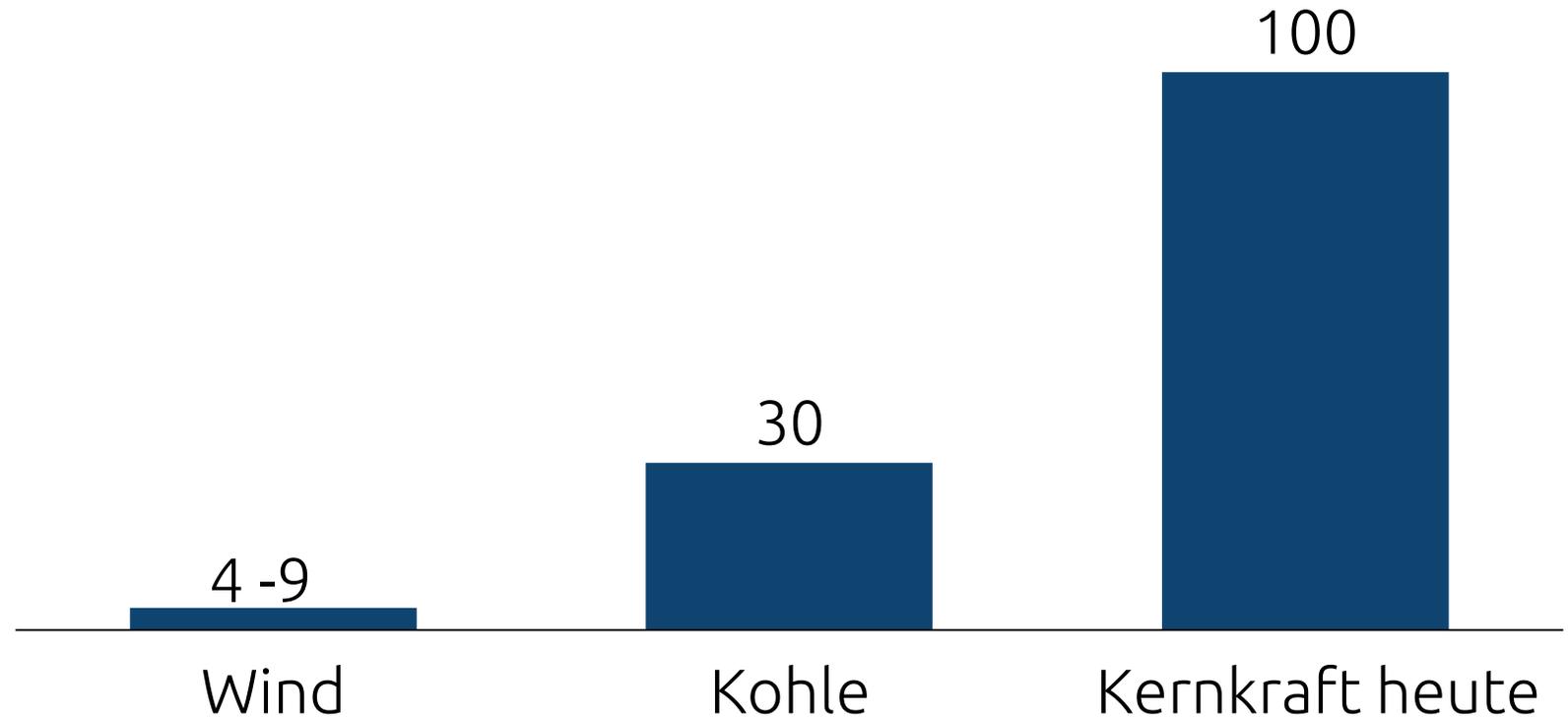
Energy Return on Investment (EROI) =  
Verhältnis der gelieferten nutzbaren Energiemenge ( $E_{\text{out}}$ ) zur Gesamtmenge der eingesetzten Energie für Bau, Brennstoff, Wartung, Sicherheit, Rückbau usw. eines Kraftwerks ( $E_{\text{in}}$ )

# Leistung von Kraftwerken (EROI)

EROI

=

$$\frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}}$$



Daniel Weißbach et al, Energy 52 (2013) 210

# Status quo – Potenzial – Ziel



**Status quo:** aktuelle  
Kernkraft wenig  
stärker als Fossile



**Potenzial:**  
Millionenfach höhere  
Energiedichte von  
Uran

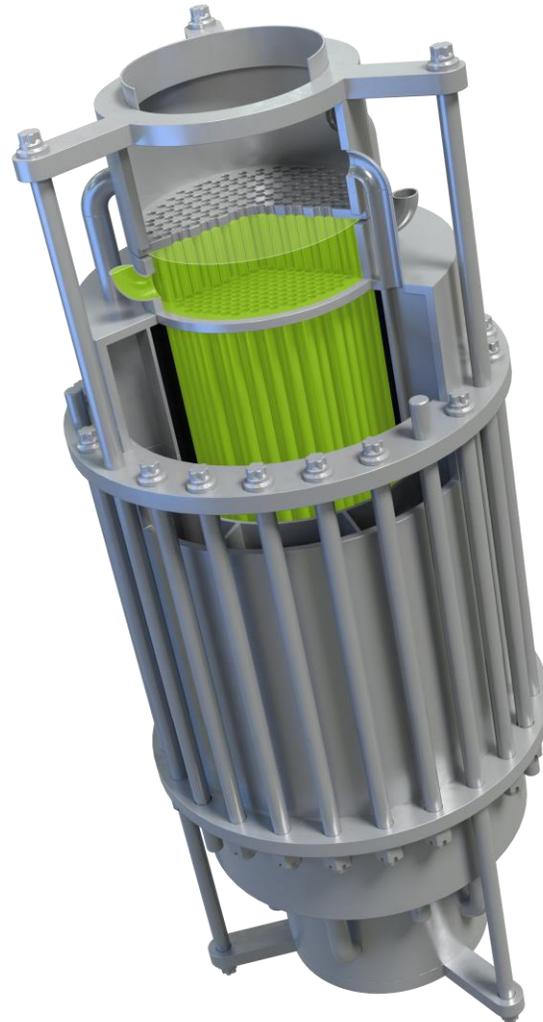


**Ziel:** Kraft des  
Brennstoffs voll  
ausschöpfen

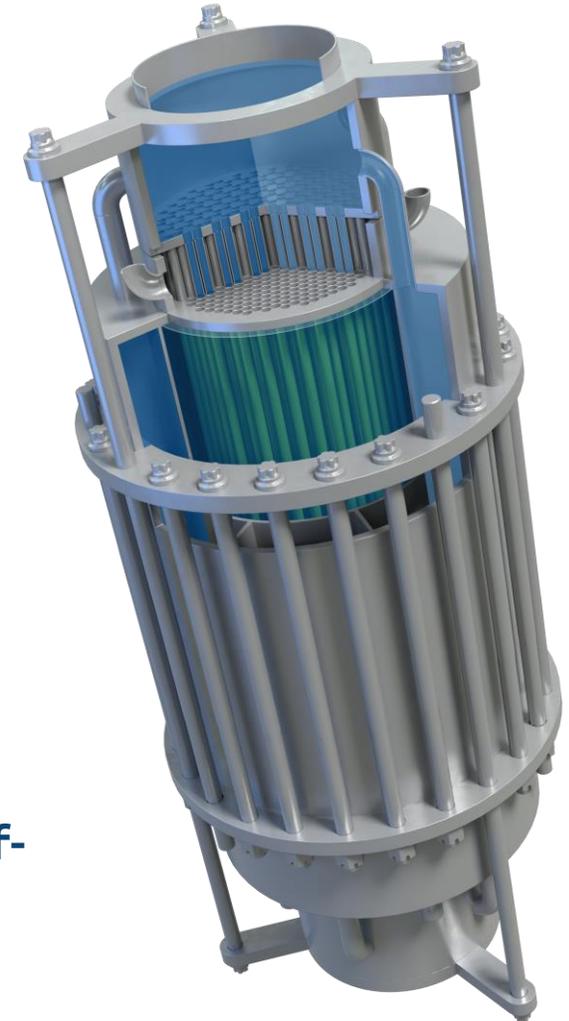
# Unser neues Design

# Das Dual Fluid Prinzip

- **Flüssiger Brennstoff:** Thorium, Natururan, aufbereiteter Atommüll > optimaler Abbrand
- **Flüssiges Kühlmittel:** Blei > optimale Wärmeabfuhr



Brennstoff-  
kreislauf



Kühlmittel-  
Kreislauf

# Design-Vorteile

1. Ideale Brennstoffnutzung

2. Hohe Temperatur: 1000°C

3. Kompakter Reaktorkern



Maximale Leistungsdichte

# Energieaufwände ( $E_{in}$ ) LWR vs. Dual Fluid

# $E_{in}$ Leichtwasserreaktor vs. Dual Fluid



LWR: ~ 6 TWh



DF300: 0,5 – 0,6 TWh

- Kraftwerk: Bau, Betrieb, Wartung, Rückbau
- **Brennstoff:** Beschaffung, Veredelung, Entsorgung

# $E_{in}$ Leichtwasserreaktor vs. Dual Fluid



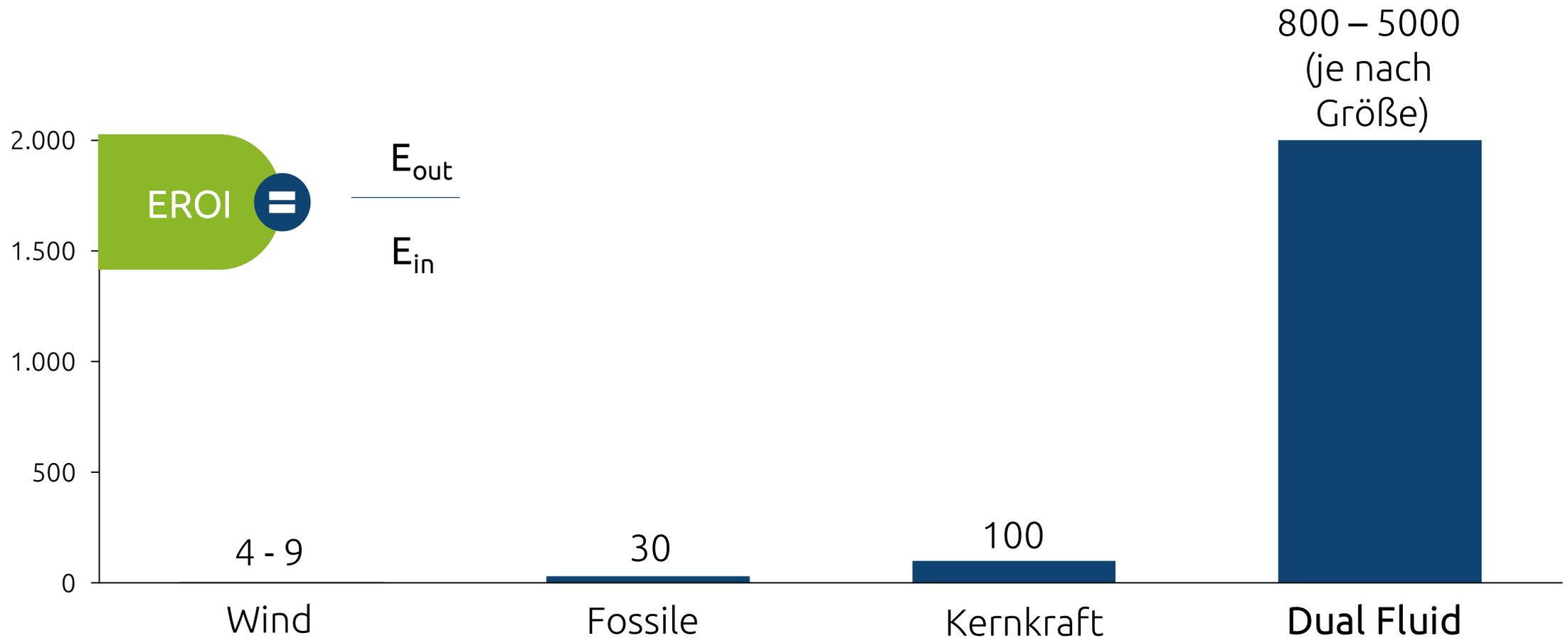
LWR: ~ 6 TWh



DF300: 0,5 – 0,6 TWh

Dual Fluid spart **90%** der  
Energieaufwände ein

# Energy Return Dual Fluid (EROI)

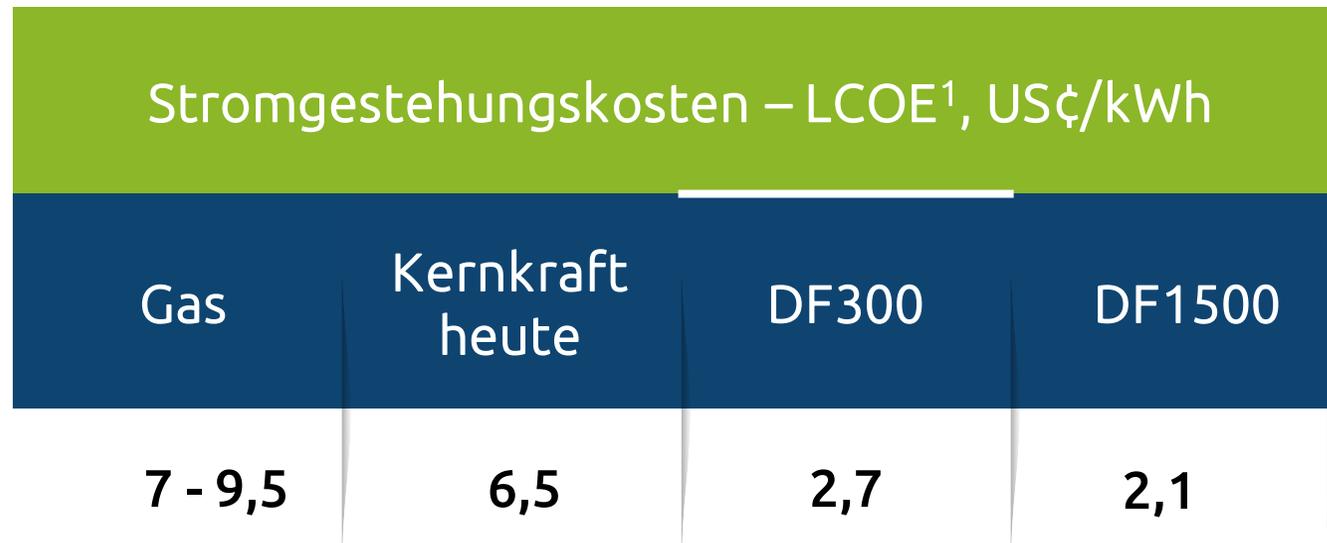


# Energiekosten

# Kostenvergleich Strom

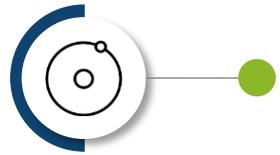


- Bereits DF300 halbiert heutige Stromerzeugungskosten



<sup>1</sup>LCOE: Levelized Cost of Energy. Quellen außer Dual Fluid: World Bank, 2020

# Kostenvergleich Wasserstoff



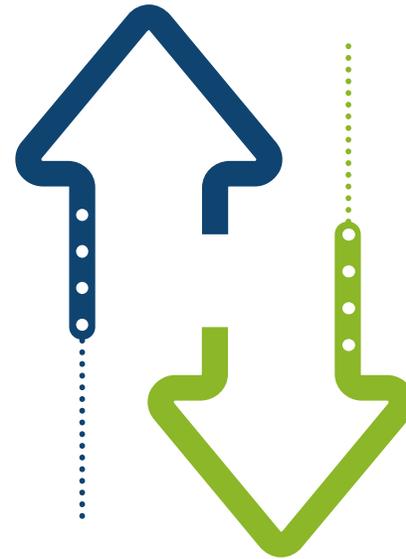
Dual Fluid produziert **emissionsfreien Wasserstoff** zu einem Bruchteil des Preises von Wasserstoff aus Windenergie (Verfahren: S-I-Zyklus oder HTE)

Gesamt US¢/MJ <sup>1</sup>		
Windenergie	DF300	DF1500
6 – 8	1,2 – 1,5	0,9 – 1

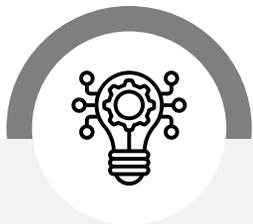
1. Heizwert: 125 MJ/kg

# Chancen

Anteil an effizient  
hergestellter Energie am  
Gesamtenergiemix steigt



Energiekosten sinken



Innovation



Nachhaltiges Wachstum



Wohlstand

# Sicherheit

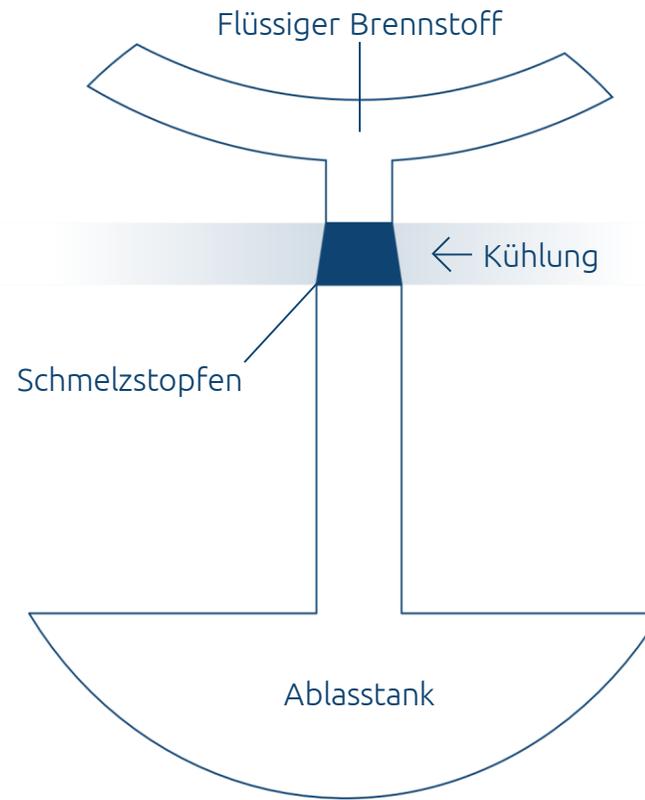
# Geschützt durch Naturgesetze

## Selbstregulierende Temperatur

→ „Kernschmelze“ ausgeschlossen

## Unterirdisches Containment

→ Alle Substanzen sicher verwahrt



## Schmelzstopfen

→ Brennstoff fließt in sichere Tanks

## Walk-away-safe

→ Fehlbedienung gefahrlos

# Machbarkeit und Timeline

# Welche Materialien halten stand?

## Brennstoff und Blei bei 1000° C



Andere Industrien:  
bewährte antikorrosive  
Materialien vorhanden



Schwerpunkt alte  
Kernindustrie: preiswerte  
Materialien (Stahl)



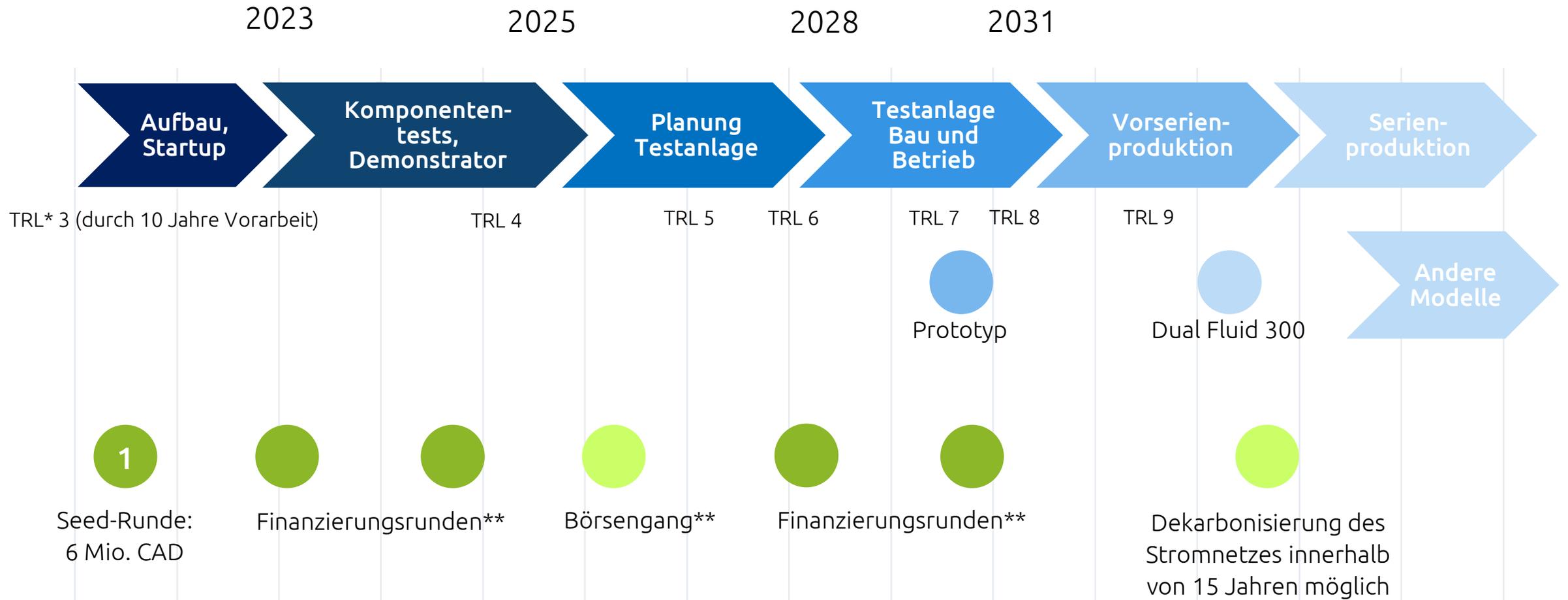
Reduzierter Material-  
aufwand bei Dual Fluid:  
**teure** Materialien möglich

**Möglichkeiten:** Refraktärmetall-Legierungen und Keramiken

1 Siliziumkarbid (SiC)

2 Zirkonkarbid (ZrC)

# Serienreif in diesem Jahrzehnt



\* Technology Readiness Level  
\*\* Prognostische Entwicklung

# Warum Dual Fluid?

# Effizient, günstig, schnell



Schöpft Potenzial des  
Brennstoffs voll aus



Senkt Energiekosten  
um die Hälfte



Schnell realisierbar  
und einsetzbar

# Annex

# Recycling mit Dual Fluid

## Step 1 Mahlen und chlorieren

- Entkernen der gebrauchten Brennelemente
- Pellets werden fein gemahlen und in Salzform gebracht

## Step 2 Trennen

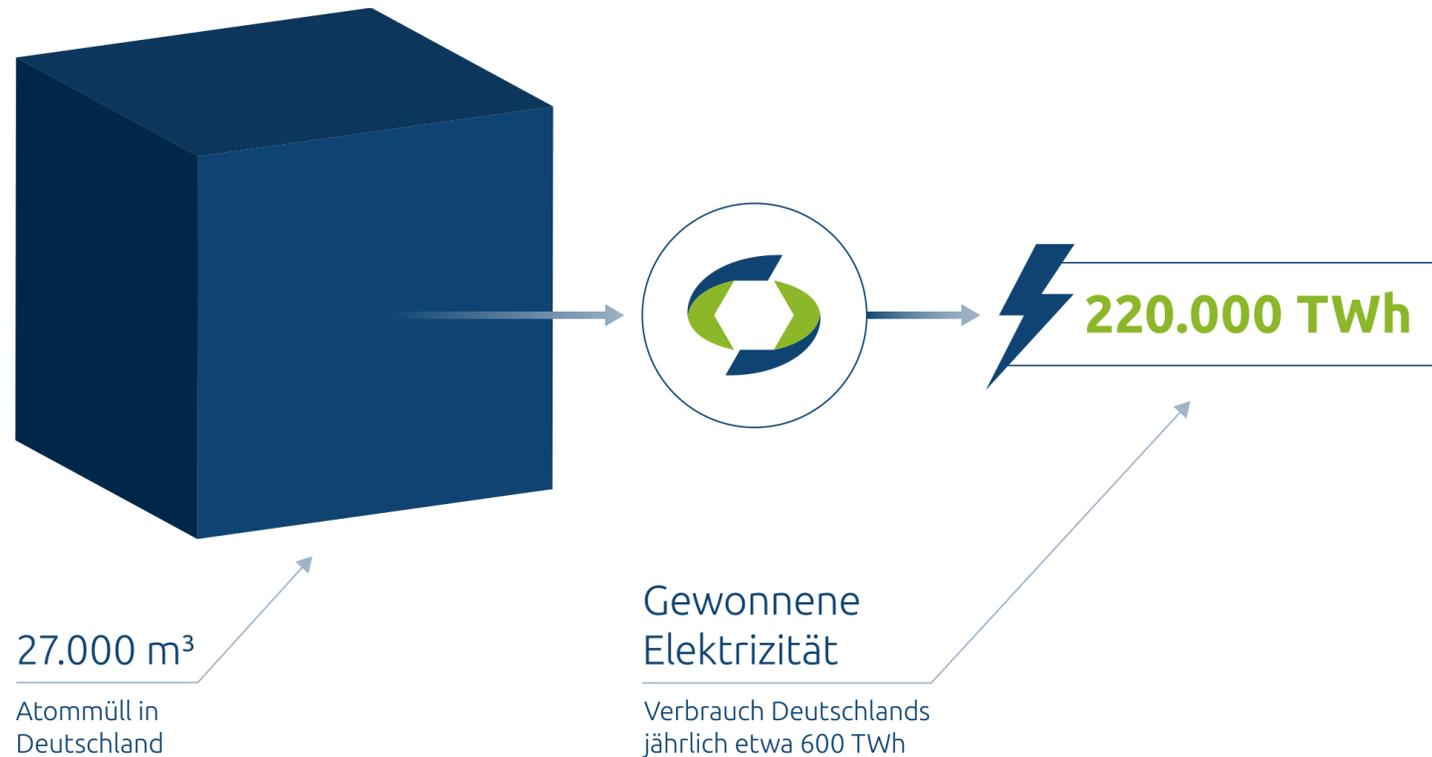
- Stofftrennung via pyrochemische Destillation:
- Verwertbare Stoffe: 95%
- Nicht verwertbare Stoffe: 5% (Lagerungsdauer: wenige hundert Jahre)

## Step 3 Verwerten und umwandeln



- Verwertung im Reaktor zu Strom und Prozesswärme
- Transmutation langlebiger Stoffe in kurzlebige

# Wie entschärft Dual Fluid das Abfallproblem?



## Atommüll ist Wertstoff

Die Dual Fluid Recycling-Anlage verwertet langlebige Reststoffe energetisch und/oder wandelt sie in überwiegend kurzlebige um.

## Lagerungsdauer: ~300 Jahre

Radiotoxizität der Reststoffe (Gesamtheit): nach ~300 Jahren auf dem Niveau von Natururan

# Erfahrenes interdisziplinäres Team



**Dr. Armin Huke**

President, Chairman of the Board of Directors

Promotion in Kernphysik an der TU Berlin. Seit 2009 Geschäftsführer des Instituts für Festkörper-Kernphysik, Berlin. Haupterfinder.



**Dr. Götz Ruprecht**

Managing Director, CEO

Promotion in Kernphysik an der TU Berlin. Research Associate am TRIUMF National Laboratory, Kanada. Führende Beteiligung an internationalen Forschungsprojekten. Erfinder.



**Prof. Ahmed Hussein**

Director

Professor emeritus der Physik an der University of Northern British Columbia. Forschung in Kern- und Teilchenphysik am TRIUMF National Lab, Kanada, und am Los Alamos National Lab, USA. Erfinder.



**Dr. Titus Gebel**

Director

Promotion in Jura an der Universität Heidelberg. Unternehmer, Inkubator und Investor. Gründer und langjähriger CEO der Deutsche Rohstoff AG.

# Erfahrenes interdisziplinäres Team



**Dr. Björn Peters**  
CFO

Physiker, Inhaber des Forschungsinstituts Peters Coll. für Energie- und Rohstoffwirtschaft. Langjährige Erfahrung in Kraftwerksfinanzierung. Vormalig McKinsey, Deutsche Bank AG und Deutsche Börse AG.



**Dipl.-Ing. Stephan Gottlieb**  
COO

Senior Technical Officer am Labor für Fahrzeugantriebe, Fachhochschule Dortmund. Vormalig Airbus Industries und Fraunhofer Institut. Erfinder und Entwickler, Inhaber zahlreicher Patente. Erfinder.



**Dipl.-Phys. Daniel Weißbach**  
CTO

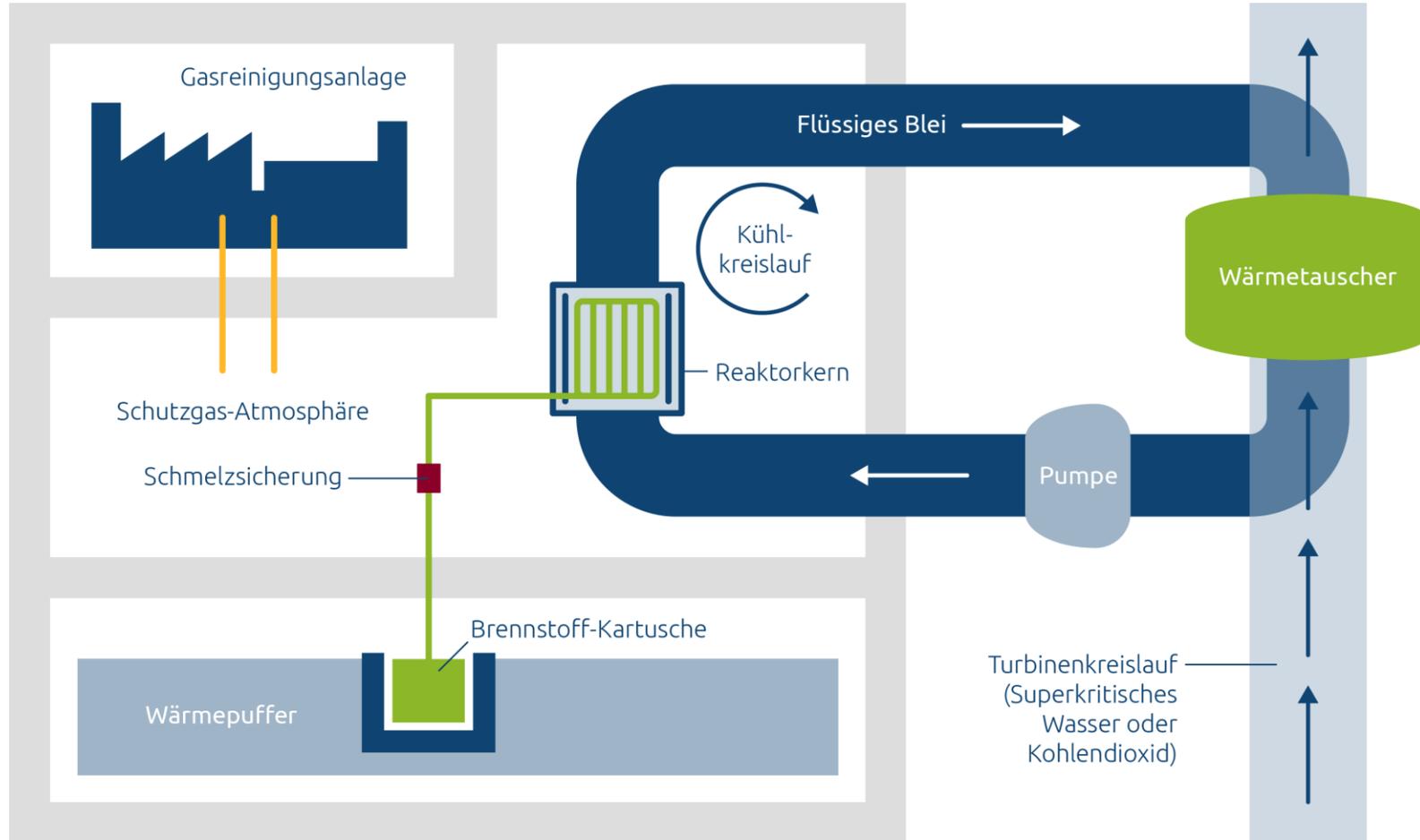
Abschluss in Atomphysik an der TU Berlin. Forschung in Kernphysik und Nukleartechnologie, Doktorand an der Universität Stettin und am Institut für Festkörper-Kernphysik Berlin. Erfinder.



**Lisa Raß**  
Head of Communications

Literatur- und Sprachwissenschaftlerin, Journalistin. Früher Kernkraft-Gegnerin, heute für Ökomoderne und nuklearen Humanismus.

# DF300-Kraftwerk (SMR): Eigenschaften und Vorteile



Kraftstoffwechselintervalle ca. 25 Jahre

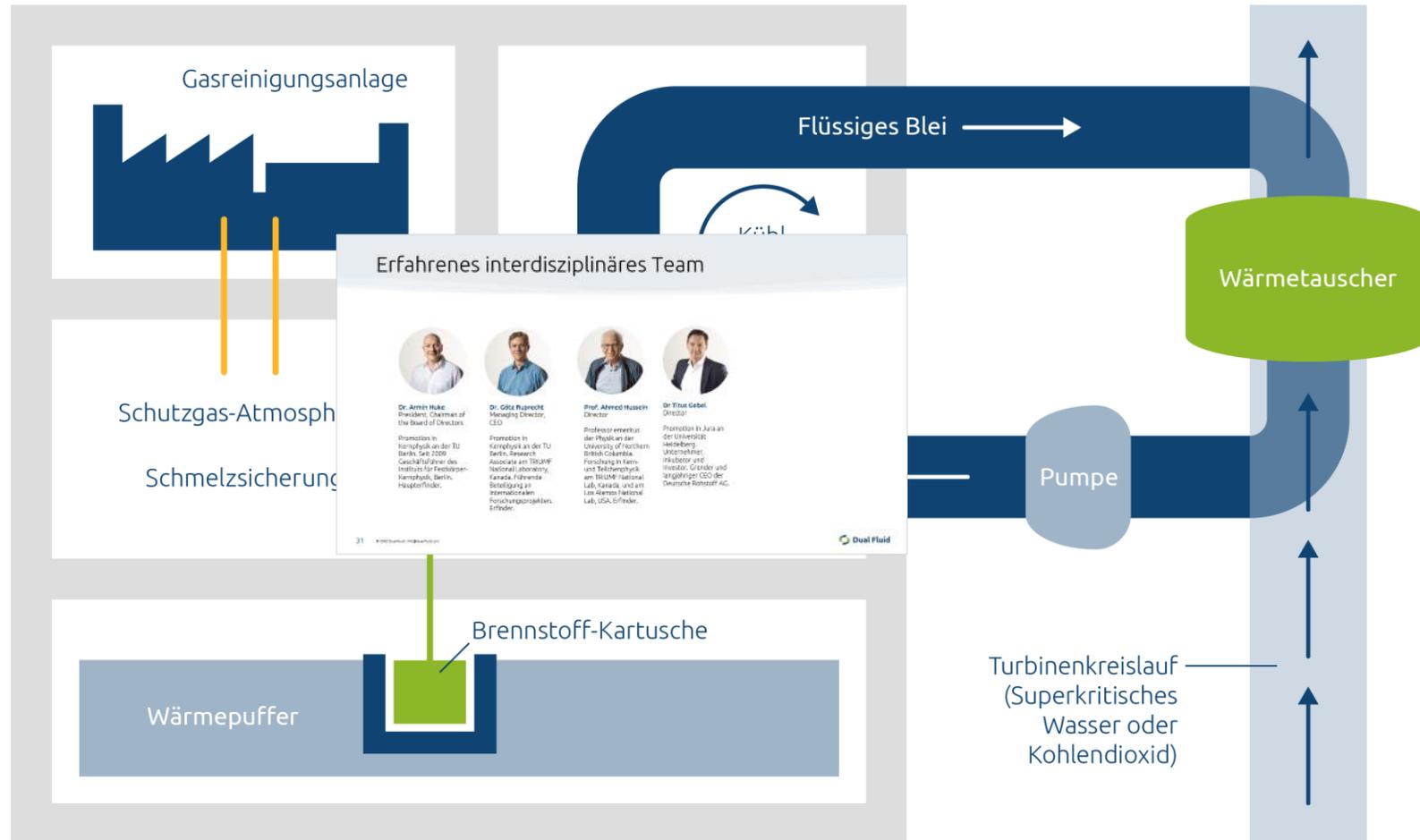
Kern und Brennstoffkartusche austauschbar

Abbrand bis zu 200 MWd/kg<sub>HM</sub>

Kombination mit externer Recyclinganlage

Elektrizitätserzeugung mit 50% Wirkungsgrad, z.B. mit überkritischen Medien (schH<sub>2</sub>O, scCO<sub>2</sub>)

# Kraftwerk DF300: Sicherheit



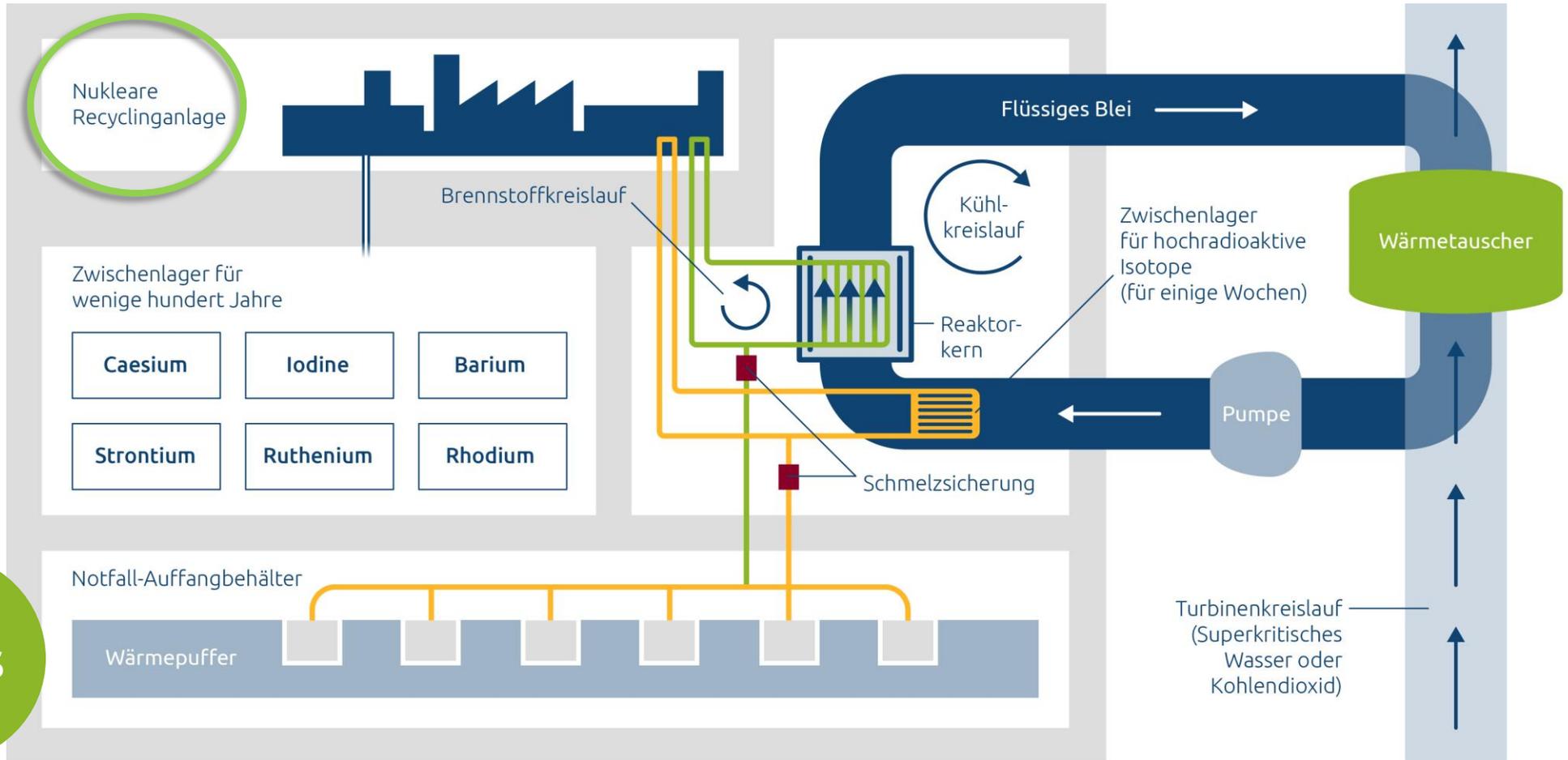
- **Selbstregulierendes, homöostatisches System**
- Kerntechnischer Teil der Anlage **unterirdisch**
- Nachzerfallswärme wird passiv abgeführt > Überhitzung (**Fukushima**) unmöglich
- Kern entleert > Kettenreaktion endet automatisch > Unkontrollierte Kettenreaktion (**Tschernobyl**) unmöglich

# Kraftwerk DF1500: Schließt den Brennstoffkreislauf

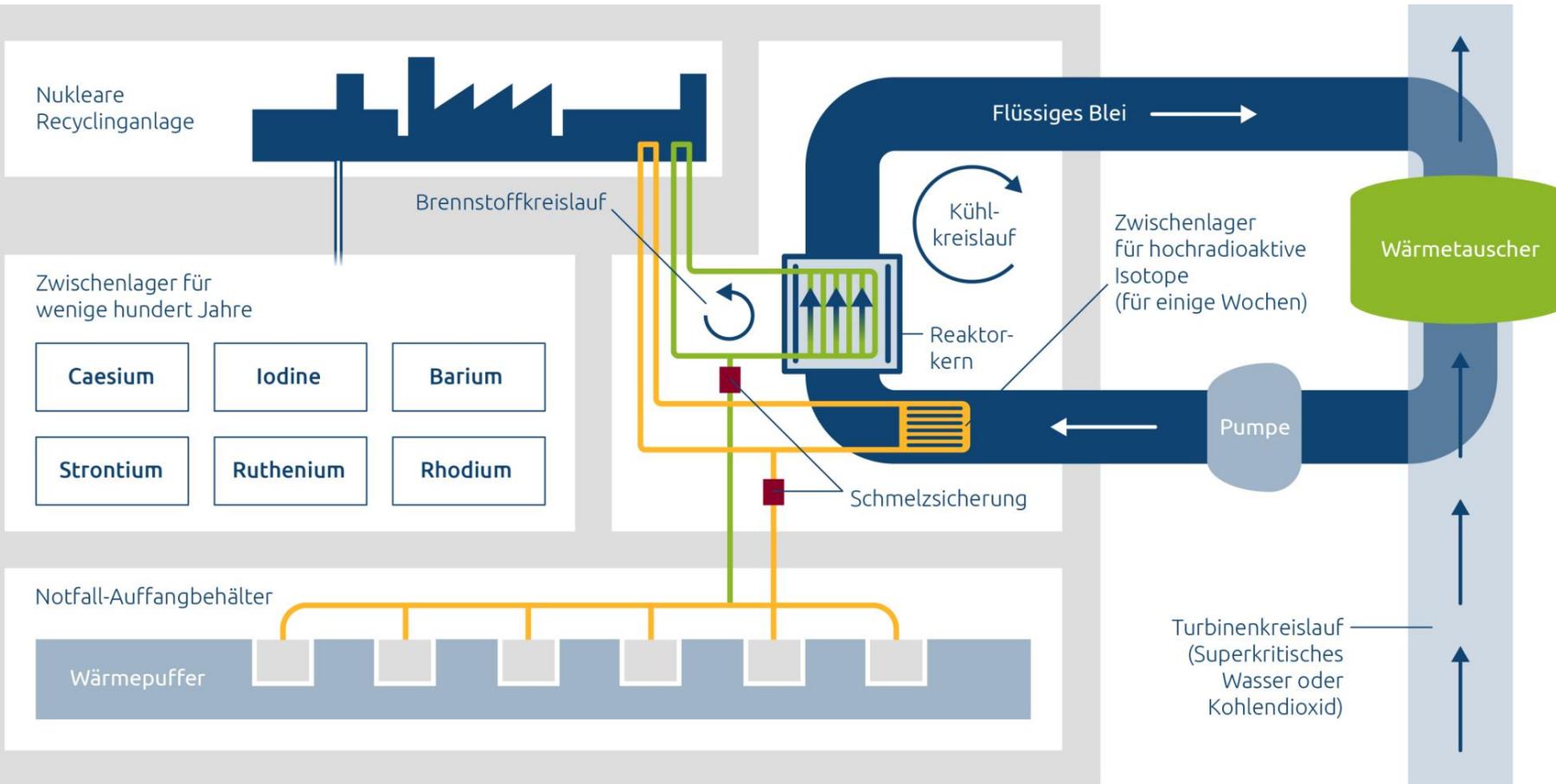
- Natürliches Uran
  - Abgereichertes Uran
  - Thorium
  - Gebrauchte Brennelemente
- 
- Spaltprodukte
  - Med. Radioisotope
  - Spaltbares Material



**GESCHLOSSENER  
BRENNSTOFFKREIS  
LAUF**



# Kraftwerk DF1500: Eigenschaften und Vorteile



- Lagerung von Spaltprodukten vor Ort > Toxizität unter Natururan nach einigen hundert Jahren
- Seltene Metalle nach einigen hundert Jahren rein verfügbar
- Stromerzeugung mit Wirkungsgrad > 50 %, z.B. mit überkritischen Medien (scH<sub>2</sub>O, scCO<sub>2</sub>)
- Prozesschemie bei 1000 °C

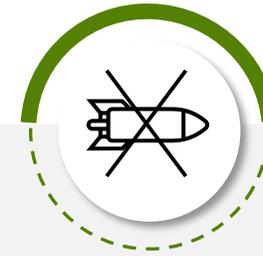
# Ist Proliferation ein Problem?



Der einfachste und günstigste Weg, an waffenfähiges Plutonium zu gelangen, **führt nicht über einen Kernreaktor.**



Um aus einem Dual Fluid Kraftwerk waffen-taugliches Material zu extrahieren, **müsste es komplett umgebaut werden.**



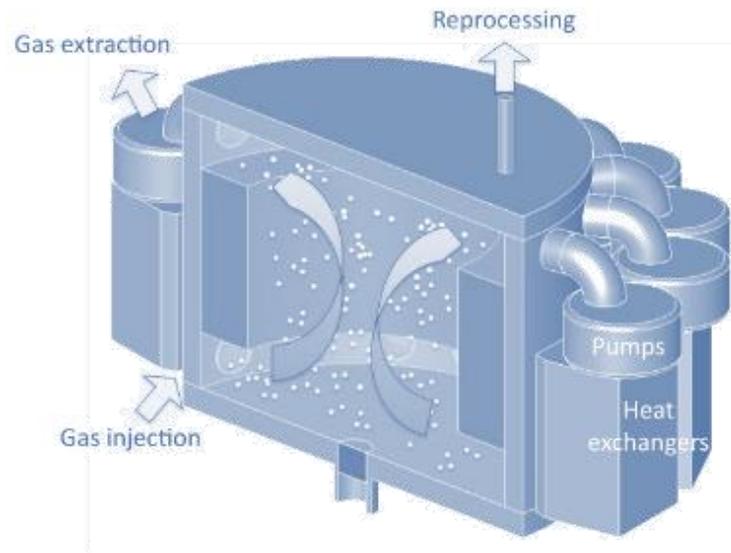
Da ein Dual Fluid Reaktor auch Plutonium aus alten Kernwaffen verwerten kann, **ist er potenziell eine Abrüstungshilfe.**

# Warum ist der Dual Fluid Reactor kein MSR?

## Molten Salt Reactor (MSR) z.B. SAMOFAR

### Eine Flüssigkeit

- Homogener Kern
- Wärmeabfuhr durch dieselbe Flüssigkeit



## Dual Fluid Reactor

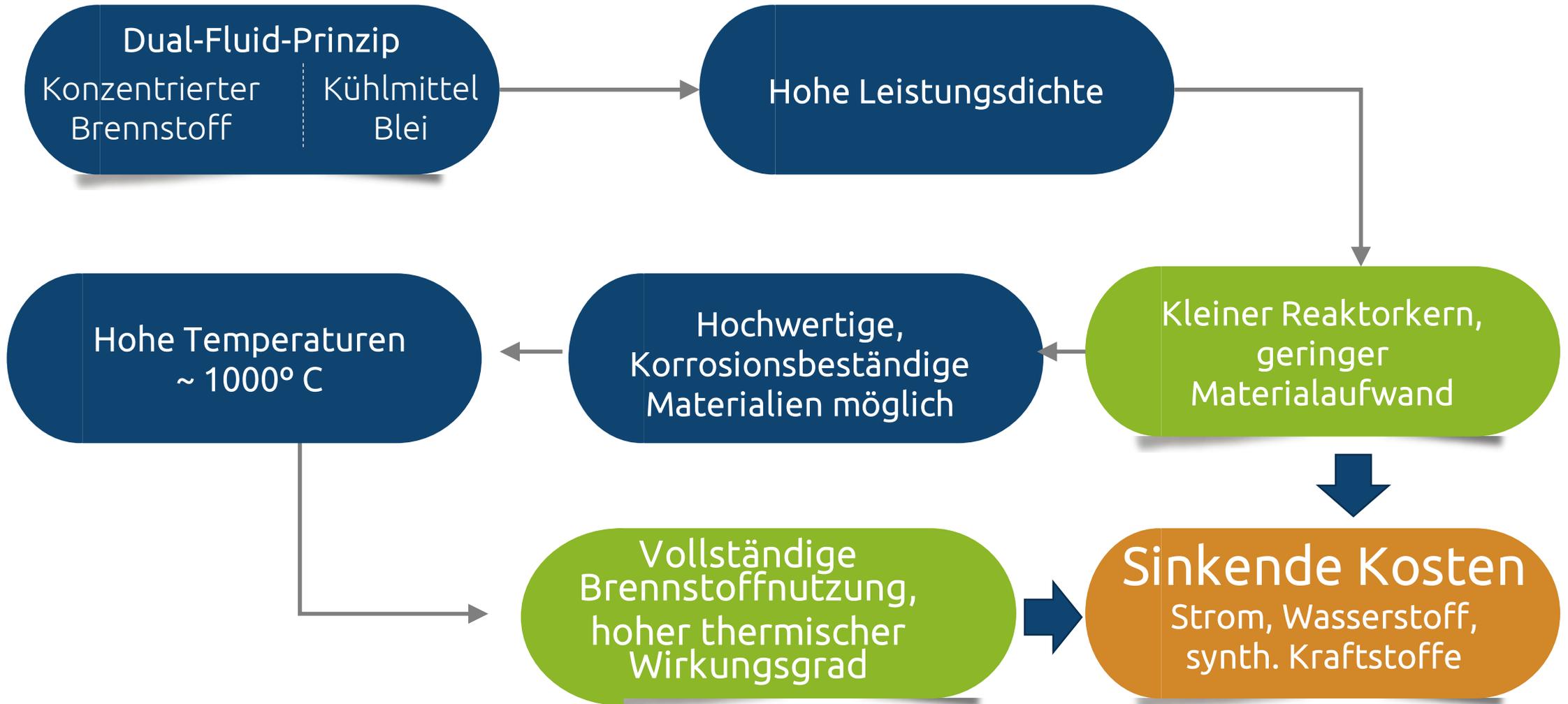
### Zwei Flüssigkeiten

- Heterogener Kern
- Wärmeabfuhr durch zweite Flüssigkeit



Die Doppelfunktion von Brennstoffbereitstellung und Wärmeabfuhr im MSR begrenzt die Leistungsdichte. Dual Fluid überwindet diese Einschränkung.

# Hohe Leistungsdichte, niedrige Kosten



# Kostenvergleich Kraftstoffherstellung

Methode	Gesamt US\$/MJ*			
	konventionell	DF300	DF1500	DF30G
Raffiniertes Öl (Nahe Osten)	0.27 - 0.31	0.30 - 0.34	0.25 - 0.29	0.24 - 0.27
Raffiniertes Öl (Ölsande, Kanada)**	0.75 - 1	0.8 - 1.1	0.6 - 0.9	0.5 - 0.7
Hydrazinproduktion heute	2.4	1.3 - 1.7	0.8 - 1.1	0.5 - 0.8
Hydrazinproduktion, direkte Spaltung (z. B. SSAS)	2.0	1.0 - 1.4	0.6 - 0.95	0.4 - 0.6
Wasserstoffproduktion, S-I-Zyklus oder HTE	1.8 - 2	1.2 - 1.5	0.9 - 1	0.7 - 0.8
Wasserstoff aus Methan/Dampfreformierung, 2US\$/kWh	1.3 - 1.5	-	-	-
Wasserstoff aus Windenergie	6 - 8	-	-	-

\* Die Heizwerte von Brennstoffen auf Ölbasis, Hydrazin, Wasserstoff und Ammoniak betragen ~42 MJ/kg, 19 MJ/kg, 125 MJ/kg bzw. 18 MJ/kg

\*\* Kanadische Ölsandversorgungskosten und Entwicklungsprojekte (2016-2036), 2017, Canadian Energy Research Institute (CERI)

\*\*\* Gegenwärtige und zukünftige Kostenentwicklung in Abhängigkeit von der Bohrtiefe

# Ausgewählte Veröffentlichungen

Jakub Sierchuła et al, Int J Energy Res. 43 (2020) 3691:  
"Determination of the liquid eutectic metal fuel Dual Fluid Reactor (DFRm) design - steady state calculations"

Dominik Böhm et al, Acta Physica Polonica B 51 (2020) 893:  
"Neue Methoden zur nuklearen Abfallbehandlung des Dual Fluid Reaktorkonzepts"

Chunyu Liu et al, Metals 10 (2020) 1065: "Thermohydraulische Analyse der Verteilungszone in einem kleinen modularen Zweistoffreaktor"

Daniel Weißbach et al, Int. J. Energy Res. (2020)1: "Dual Fluid Reactor as a long-term burner of actinides in spent nuclear fuel"

Sang-in Bak et al, The European Physical Journal Plus 134 (2019) 603: "Design of an accelerator-driven subcritical dual fluid reactor for transmutation of actinides"

Xiang Wang et al, Int J Energy Res. 42 (2018) 4313-4334:  
"Steady-state reactor physics of the dual fluid reactor concept"

Thomas J. Dolan: "Molten Salt Reactors and Thorium Energy", Woodhead Publishing, 2017

Xiang Wang, Dissertation 2017: "Analyse und Bewertung des Dual Fluid Reactor Konzepts"

Armin Huke et al, Annals of Nuclear Energy 80 (2015) 225: "The Dual Fluid Reactor - A novel concept for a fast nuclear reactor of high efficiency",

Daniel Weißbach et al, Energie 52 (2013) 210:  
"Energieintensitäten, EROIs und Energierücklaufzeiten von Kraftwerken"

Armin Huke et al, Konferenzpapier von der 19. Pacific Basin Nuclear conference (PBNC 2014), Vancouver: The Dual Fluid Reactor - A New Concept For A Highly Effective Fast Reactor.

Jan-Christian Lewitz et al, atw 65 (2020) 145: Der Dual Fluid Reactor - Ein innovatives schnelles Kernreaktorkonzept mit hohem Wirkungsgrad und Gesamtbrand