

Reinventing Nuclear

Wir erfinden die
Kernkraft neu.

Whitepaper

Kernkraft der fünften Generation von Dual Fluid

Whitepaper: Kernkraft der fünften
Generation von Dual Fluid

© Dual Fluid Energy Inc. 2022

www.dual-fluid.com

Inhalt

Executive Summary	4
Preiswerte und saubere Energie für alle – Das Dual Fluid Prinzip	5
Kernkraft der fünften Generation	5
Die Technik dahinter	6
Energie im Überfluss bringt Kreativität und Wachstum	7
Preiswerte Prozesswärme dekarbonisiert die Weltwirtschaft	7
Wie Kernenergie nachhaltig wird – Unsere Kraftwerke der Zukunft	8
Die Kraftwerke DF300 und DF1500	8
Die Dual Fluid Recyclinganlage	10
Warum Dual Fluid Wettbewerbern überlegen ist – Wettbewerbsanalyse und Energy Return	11
Der Erntefaktor zeigt die Leistung	11
Heutige Kernkraft bleibt weit hinter ihrem Potenzial	12
Wie Dual Fluid die Effizienz erhöht und die Kosten senkt	14
Warum Dual Fluid sicher ist – Dreifach geschützt durch die Natur	16
Durchdacht bis ins Detail – Antworten auf technische Fragen	18
Welche Materialien eignen sich?	18
Sind Proliferation oder Strahlung ein Problem?	19
Eine Chance für private Investoren – Freier Wettbewerb der Ideen	20
Investitionskosten für Prototyp und Serienproduktion	21
Investitionskosten für Versorgungsunternehmen	21
Stromkosten	22
Kosten für Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe	24
Business Case und Produkt-Pipeline	25
Wissenschaftliche Publikationen	27

Executive Summary

Das Wohlergehen der Menschheit hängt direkt von der verfügbaren Energiemenge ab – und Kernkraft ist eine der wichtigsten Erfindungen, um große Mengen an Energie bereitzustellen. Doch heutige Leichtwasserreaktoren können nur einen kleinen Teil des energiereichen Brennstoffs Uran in Strom umwandeln. Deshalb entwickeln wir eine neue, wirksamere Art der Kernspaltung.

Die Dual Fluid Technologie kann die verfügbare Energiemenge drastisch erhöhen. Sie beruht auf einem völlig neuen und patentierten Kernreaktor, der

- » die Kosten von Strom, Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen potenziell auf einen Bruchteil senkt,
- » die Grenzen des Wachstums erweitert und die Weltwirtschaft dekarbonisiert,
- » Atommüll verbrennt, inhärent sicher und emissionsfrei ist.

Die Innovation liegt in zwei Flüssigkeiten im Reaktorkern: Flüssiger Brennstoff kann so langsam wie nötig zirkulieren für einen idealen Abbrand, während flüssiges Blei als Kühlmittel so schnell wie möglich zirkulieren kann für eine optimale Wärmeabfuhr. Dies ermöglicht eine maximale Leistungsdichte, hohe Betriebstemperaturen und einen Neutronenüberschuss. Dadurch kann ein Dual Fluid Reaktor jedes spaltbare Material nutzen, einschließlich aufbereitetem Atommüll. Eine Kernschmelze oder eine unkontrollierte Leistungsexkursion sind physikalisch ausgeschlossen.

Ein kleiner Dual Fluid Kern mit 300 Megawatt elektrischer Leistung (DF300) kann 500 000 Haushalte mit Strom versorgen und braucht nur alle 25 Jahre frischen Brennstoff. Er erzeugt **Strom zu etwa der Hälfte der Kosten heutiger Kohle- oder Kernkraftwerke**. Ein DF300-Kern arbeitet etwa acht- bis zehnmal effizienter als derzeitige Leichtwasserreaktoren. Leistungsdichte und Wirkungsgrad steigen mit größeren Kernen weiter an. Damit ist der Dual Fluid Reaktor die effizienteste Energiequelle, die je entwickelt wurde.

Die leistungsstarke Energieerzeugung geht mit einem sehr guten ökologischen Profil einher, was auf die kompakte Größe des Systems und den geringen Brennstoffbedarf zurückgeht. Die Emissionen eines Dual Fluid Kraftwerks, über den gesamten Betriebszyklus betrachtet, liegen unterhalb der Werte von aktueller Kernkraft und sogar von Windkraft. Dual Fluid könnte wesentlich dazu beitragen, unsere Wirtschaft innerhalb weniger Jahrzehnte zu dekarbonisieren und eine neue Phase produktiven Wachstums einzuleiten.

Im Gegensatz zur Kernfusion ist Kernspaltung nach dem Dual Fluid Prinzip mit vorhandenen Materialien und heutigem Wissen realisierbar. Ein DF300-Prototyp soll noch in diesem Jahrzehnt einsatzbereit sein.

Preiswerte und saubere Energie für alle **Das Dual Fluid Prinzip und seine Folgen**



Kernkraft der fünften Generation

Heutige Kernkraft bietet großes Potenzial für Verbesserung: Leichtwasserreaktoren können nur etwa ein Prozent des geförderten Natururans zu Strom umwandeln. Die restlichen 99 % müssen kostspielig entsorgt werden, was die Akzeptanz senkt.¹ Da die Kernenergie jedoch besonders emissionsarm und skalierbar ist, versuchen heute viele Akteure, sie weiterzuentwickeln.

Die Konzepte der so genannten Generation IV zielen auf sicherere und flexiblere Reaktoren, die weniger Abfall produzieren. Doch praktisch alle Entwürfe der Generation IV sind Variationen von Ideen aus der Mitte des letzten Jahrhunderts. Die Dual Fluid Technologie hingegen ist eine echte Neuentwicklung. Sie erfüllt alle Ansprüche der Generation IV und geht zugleich weit darüber hinaus.

Die Innovation liegt in der Verwendung von zwei Flüssigkeiten im Reaktorkern: Eine trägt den Brennstoff, während die andere die Wärme abführt. Dadurch kann der flüssige Brennstoff seine volle Kraft bei 1000° C entfalten.²

Die hohe Betriebstemperatur und die Kompaktheit des Systems machen eine neue Leistungsdichte möglich. Deshalb sprechen wir von Generation V.

Eine hohe Leistungsdichte führt zu hoher Effizienz und niedrigen Strompreisen. Ein kleiner Dual Fluid Kern mit 300 MW elektrischer Leistung arbeitet bereits acht- bis zehnmal effizienter als Leichtwasser-Reaktoren und kann die Stromkosten, verglichen mit aktueller Kernkraft oder Kohle, um rund die Hälfte senken (s. S. 22).³ Bei größeren Kernen steigt die Effizienz weiter an (s. S. 11-13).

Zudem verbessert die hohe Leistungsdichte die ohnehin günstige Emissionsbilanz von Kernkraft weiter: Die Emissionen eines Dual Fluid Kraftwerks liegen deutlich unterhalb von heutiger Kernkraft und sogar von Windkraft (Wind und Kernkraft aktuell: ca. 12 gCO₂eq/kWh;⁴ Dual Fluid: ca. 6 gCO₂eq/kWh).

*Hohe Leistungsdichte bedeutet hohe Effizienz,
die zu niedrigen Strompreisen führt.*

1 Der Erfolg der Leichtwasser-Technologie beruht auf ihren militärischen Vorteilen: Reaktoren mit Brennstäben eignen sich als U-Boot-Antrieb und können Plutonium für Atomwaffen liefern. Andere Konzepte aus der Anfangszeit der Kernkraft, die für die zivile Nutzung besser geeignet waren, wurden fallengelassen. Dass heute immer noch Leichtwasserreaktoren die Kerntechnik dominieren, ist vor allem auf die immense Dichte des Brennstoffs zurückzuführen: Uran enthält so viel Energie, dass selbst suboptimale Reaktordesigns rentabel sind.

2 Heutige Leichtwasserreaktoren: ca. 320° C

3 Ein DF300-Kern von etwa 1,50 Meter Höhe kann eine halbe Million Haushalte mit Strom versorgen.

4 Quelle: IPCC Report AR5 2014, Anhang III

Die Technik dahinter

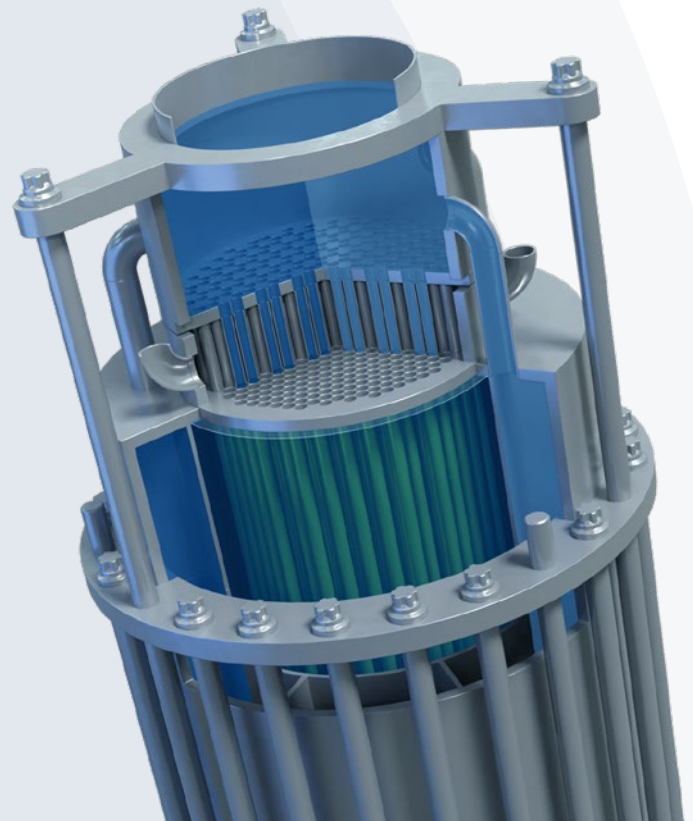
Durch die getrennten Kreisläufe für Brennstoff und Kühlmittel kann der flüssige Brennstoff so langsam wie nötig zirkulieren für einen idealen Abbrand, während das Kühlmittel so schnell wie möglich zirkulieren kann für eine optimale Wärmeabfuhr. Darum kann ein unverdünntes metallisches Aktiniden-Gemisch als Brennstoff dienen, wodurch sich die Menge an spaltbarem Material im Reaktorkern deutlich erhöht. Die Kompaktheit des Kerns senkt die Menge der benötigten Strukturmaterialien, so dass auch kostspielige, besonders korrosionsbeständige Stoffe verwendet werden können (s. S. 18). Flüssiges Blei als Kühlmittel führt die Wärme ab, ohne die Neutronen im Reaktorkern zu verlangsamen. Das macht den Dual Fluid Reaktor zu einem schnellen Reaktor, der durch einen Netto-Neutronenüberschuss gekennzeichnet ist.

Synthetische Kraftstoffe auf Wasserstoffbasis sind eine wirtschaftliche und emissionsfreie Alternative zu fossilen Kraftstoffen.

Daher kann der Reaktor – zusammen mit der Dual Fluid Recyclinganlage – jedes spaltbare Material vollständig verwerten, auch Thorium, Natururan oder aufbereiteten Atom-müll.⁵ Langlebige Spaltprodukte werden in kurzlebige umgewandelt. Die verbleibenden Substanzen zerfallen schnell: Insgesamt sind sie nach wenigen hundert Jahren weniger radiotoxisch als Natururan.

Im Gegensatz zur Kernfusion ist die Dual Fluid Technologie mit dem heutigen Stand der Technik realisierbar. Die jüngsten Fortschritte auf dem Gebiet der Kernfusion sollten nicht darüber hinwegtäuschen, dass eine marktfähige, weil wirtschaftliche Entwicklung noch mindestens drei bis vier Jahrzehnte entfernt ist.⁶ Auch wenn einige Unternehmen anderes suggerieren, befindet sich die Fusion immer noch im Stadium der Grundlagenforschung (insbesondere in den Bereichen Festkörper- und Plasmaphysik). In der Kernspaltung hingegen sind die grundlegenden Fragen seit Jahrzehnten gelöst.

Getrennte Kreisläufe für Kraftstoff (grün) und Kühlmittel (blau) sorgen für optimalen Abbrand bei leistungsstarker Wärmeabfuhr.



- 5 Während der Brennstoff den Reaktor durchläuft, ändert sich seine chemische Zusammensetzung durch Transmutation, Spaltung oder Verbrennung. Die Fließgeschwindigkeit des Brennstoffs kann für verschiedene Zwecke optimiert werden, z. B. für maximalen Abbrand, Verbrennung von Transuranen, Isotopenproduktion, spezifische Deaktivierung von Spaltprodukten oder andere.
- 6 Auf absehbare Zeit ist es unmöglich, dass die Kernfusion mit fossilen Brennstoffen konkurriert. Die Fusion erfordert Laser oder hoch komplexe felderzeugende Geräte, die sehr viel Energie verbrauchen. Dies senkt Leistungsdichte und Effizienz und steigert die Kosten. Dass ein deutsches Fusionsunternehmen kürzlich 5 bis 10 €/kWh (5,5 - 11 US\$/kWh) als Zielpreis angekündigt hat, bestätigt dies.

Energie im Überfluss bringt Kreativität und Wachstum

Vor mehr als 200 Jahren begannen Menschen, fossile Brennstoffe mit Hilfe neuer Technologien effizient zu nutzen. Sie erhöhten so die verfügbare Energiemenge um den Faktor zehn, was die industrielle Revolution auslöste. Die Innovationen der Neuzeit, ermöglicht durch leistungsstarke Energietechnologien, haben die Menschen weltweit von einem Jahrtausende währenden Leben am Existenzminimum befreit. Produktivität und Lebensstandard sind seitdem überall dramatisch gestiegen.

Seit einigen Jahrzehnten jedoch gibt es nur noch wenig Fortschritte: Die Produktivität der westlichen Länder stößt an ihre Grenzen, weil das Potenzial fossiler Brennstoffe weitgehend erschöpft ist. Die wesentlichen Innovationen, die mit der zur Verfügung stehenden Energiemenge möglich waren, sind bereits realisiert. Anderer-

seits können einige vorhandene Ideen heute nicht umgesetzt werden, weil sie zu viel Energie benötigen (z. B. Anwendungen der Kreislaufwirtschaft wie Carbon Capture and Storage, CCS).

Wenn die Kraftwerke der Zukunft pro eingesetzter Energiemenge zehn oder zwanzigmal mehr Energie liefern als die heutigen, würde ein enormer Produktivitäts- und Innovationsschub, ähnlich der ersten industriellen Revolution, folgen. Der Lebensstandard könnte sich durch ein Mehr an Energie vielfältig verbessern. Zugleich würde die Natur Raum zurückgewinnen – dank minimalinvasiver Energiegewinnung und neuen Recycling-Verfahren.

Preiswerte Prozesswärme dekarbonisiert die Weltwirtschaft

Neue Energieträger wie Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe können helfen, die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu überwinden. Doch ihre Herstellung ist im Moment noch zu energie- und damit kostenintensiv. Mit genügend preiswerter Energie ändert sich die Situation. Neben den benötigten Energiemengen liefert ein Dual Fluid Kraftwerk die hohen Temperaturen, die für die Herstellung von Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen nötig sind. So können sie zu einem erschwinglichen Massenprodukt werden.

Heute wird emissionsfreier Wasserstoff, z. B. aus Windkraft, unter hohen Verlusten der eingesetzten elektrischen Energie hergestellt. Dual Fluid ermöglicht mit Temperaturen von 900 – 1000°C die weit effizientere Hochtemperatur-Elektrolyse. Darüber kann emissionsfreier Wasserstoff zu einem Preis hergestellt werden, der die Kosten für Wasserstoff aus Windkraft um ein Vielfaches unterbietet. Zugleich ist das Verfahren mindestens so günstig ist wie die Dampfreformierung aus Methan (Tab. 3, S. 25).

Synthetische Kraftstoffe auf Wasserstoffbasis können Verbrennungsmotoren antreiben und bieten eine ökonomisch und ökologisch attraktive, emissionsarme Alternative zu ölbasierten Kraftstoffen. Die entsprechenden Syntheseverfahren sind bereits entwickelt, doch der Preis der Produkte ist im Vergleich zu Erdölprodukten noch nicht wettbewerbsfähig. Konzentrierte Wärmeenergie aus Kernspaltung könnte dies grundlegend ändern: Dual Fluid ermöglicht die Herstellung von emissionsfreien synthetischen Kraftstoffen zu einem Preis, der mit erdölbasierten Kraftstoffen konkurrieren kann (Tab. 3, S. 25).

Die Kombination aus kostengünstiger, emissionsarmer Energie und den hohen Temperaturen eines größeren Dual Fluid Kraftwerks bietet die Chance, den gesamten Energie- und Mobilitätssektor innerhalb weniger Jahrzehnte zu dekarbonisieren.

Wie Kernenergie nachhaltig wird

Unsere Kraftwerke der Zukunft

Das Dual Fluid Prinzip der getrennten Kreisläufe für Brennstoff und Kühlmittel definiert die Kernkraft neu: In Kombination mit der Dual Fluid Recyclinganlage wird der gesamte Brennstoff genutzt. Die Gesamtheit der Reststoffe ist nach einigen hundert Jahren ungefährlich. Damit wäre kein Endlager mehr nötig. Auch bereits existierende langlebige Abfälle könnten vollständig als Brennstoff genutzt werden. Die Menge der vorhandenen Abfälle reicht aus, um die Kerntechnik-Nationen mehrere Jahrzehnte voll mit Energie zu versorgen.

Auch Länder ohne nukleare Abfälle könnten sich mit Dual Fluid autark versorgen: Uran – und das bisher nicht für die Kernenergie nutzbare Thorium – sind in vielen Regionen der Erde vorhanden. Da die Energieausbeute im Verhältnis zur Brennstoffmenge bis zu hundertmal höher ist als bei heutigen Designs, ist auch die kostspielige Gewinnung von Uran oder Thorium aus tiefen Erdschichten wirtschaftlich möglich. Auf diese Weise würden die Kernbrennstoffe mindestens zehntausende von Jahren reichen.



Die Kraftwerke DF300 und DF1500

Das Dual Fluid Prinzip funktioniert unabhängig von der Reaktorgröße. Zuerst wird ein kleines modulares Modell mit etwa 300 Megawatt elektrischer Leistung (DF300) entwickelt, das besonders flexibel und kostengünstig ist. Größere Kerne mit höherer Leistung (DF1500: 1500 MW_{el} / 3000 MW_{th}⁷) stellen neben Strom auch Prozesswärme bereit. Die elektrische Energie ist bei beiden stufenlos und schnell regulierbar von null bis einhundert Prozent der Nennleistung.

Im modularen Kraftwerk DF300 (Abb. 1) wird der Brennstoff in einer versiegelten Kartusche zum Kraftwerk geliefert. Dort wird er erhitzt und in flüssiger Form in den Reaktor Kern gepumpt, wo er etwa 25 Jahre lang Wärme produziert. Ein DF300-Kern reicht aus, um in dieser Zeit eine halbe Million Haushalte zu-

verlässig mit Strom zu versorgen. Mehrere Kerne zusammen können ein großes Kraftwerk ersetzen. Am Ende eines Verbrennungszyklus wird der verbrauchte Brennstoff zurück in die Kartusche abgelassen und zur Dual Fluid Recyclinganlage transportiert (s. S. 10). Danach kann ein neuer Verbrennungszyklus beginnen.

Größere Kerne wie DF1500 haben einen höheren Brennstoffdurchsatz und können direkt mit einer Recyclinganlage kombiniert werden (Abb. 2). Die Recyclinganlage bereitet den Brennstoff permanent vor Ort auf. Neben der Stromerzeugung ist das Kraftwerk DF1500 (3000 MW_{th}) besonders geeignet für Wärmeanwendungen wie die Produktion von Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen (s. S. 25).

7 MW_{el} = Megawatt elektrische Leistung, MW_{th} = Megawatt thermische Leistung

Abbildung 1: Aufbau des modularen Kraftwerks DF300. Der Brennstoff kommt in einer versiegelten Kartusche zum Kraftwerk. Dort wird er erhitzt und in den Reaktorkern gepumpt, wo er etwa 25 Jahre lang Wärme produziert. Am Ende des Verbrennungszyklus wird der Brennstoff in einer Dual Fluid Recyclinganlage zur Wiederverwertung aufbereitet.

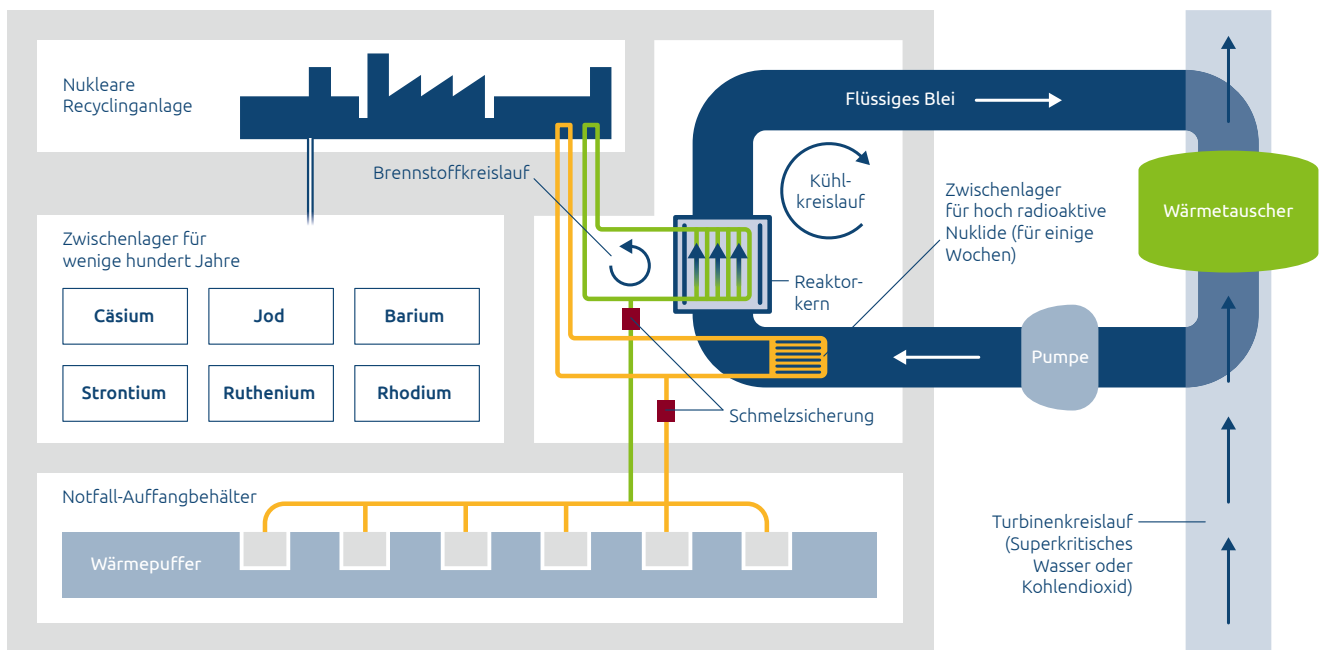
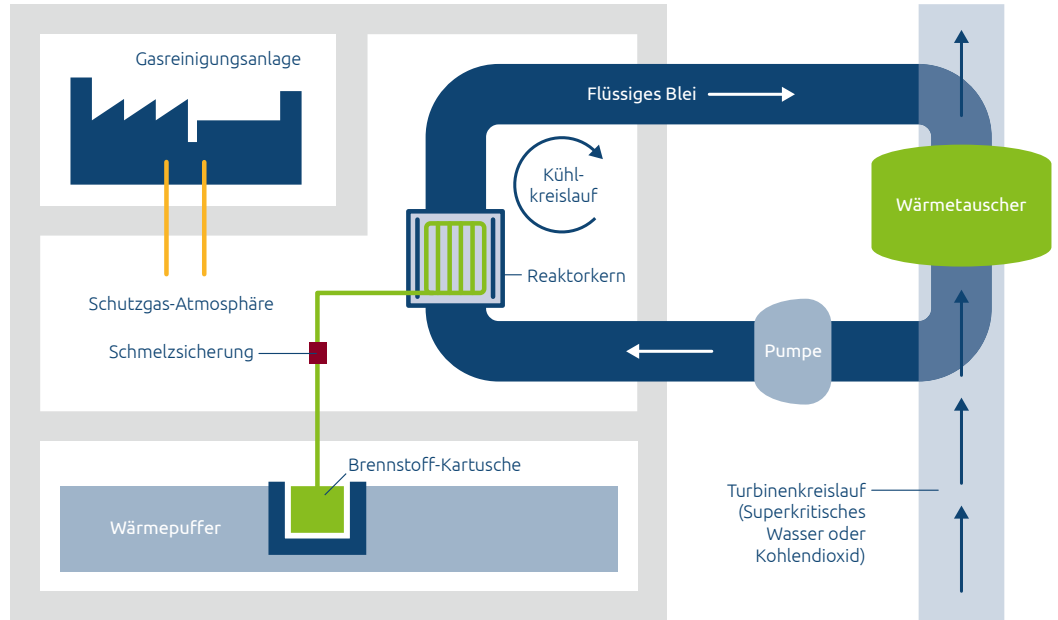


Abbildung 2: Aufbau eines DF1500-Kraftwerks mit On-site-Recycling. Der Brennstoff wird permanent aufbereitet und das spaltbare Material direkt in den Reaktor zurückgeführt. Die Reststoffe werden für etwa 300 Jahre gelagert.

Die Dual Fluid Recyclinganlage

Das Dual Fluid Recyclingverfahren unterscheidet sich grundlegend von der heutigen Wiederaufbereitung mit PUREX⁸ und verwandten nasschemischen Verfahren. In der Dual Fluid Recyclinganlage wird der abgebrannte Brennstoff zunächst in flüssiges Salz umgewandelt und dann per Destillation in seine Bestandteile aufgetrennt. Dieses Verfahren ist außerhalb der Nuklearindustrie erfolgreich etabliert. Alle spaltbaren Stoffe werden dann mit frischem Brennstoff gemischt⁹ und als Metalle zurück in den Reaktorkern gegeben,¹⁰ wo sie Energie erzeugen oder zu kurzlebigen Materialien umgewandelt werden. Die nicht mehr verwendbaren Spaltprodukte werden innerhalb des Kraftwerks gut geschützt gelagert, bis sie sicher entsorgt oder weiterverwendet werden können (Lagerungsdauer: etwa 300 Jahre).

Dieses pyrochemische Recyclingverfahren ermöglicht die vollständige Nutzung aller spaltbaren Stoffe. So wird eine echte Kreislaufwirtschaft möglich. Da die Menge der Reststoffe so gering ist wie die benötigte Brennstoffmenge, sind die ökologischen Auswirkungen geringer als bei jeder anderen Form der Energieerzeugung. Die meisten verbleibenden Stoffe zerfallen rasch: In ihrer Gesamtheit sind sie nach einigen hundert Jahren weniger radiotoxisch als Natururan.¹¹

Das pyrochemische Recycling von Dual Fluid erlaubt echte Kreislaufwirtschaft in der nuklearen Brennstoffkette.

8 PUREX: Plutonium-Uran-Rückgewinnung durch Extraktion. Historisch bestand der Hauptzweck darin, Plutonium für Kernwaffen abzutrennen. PUREX produziert zahlreiche giftige Nebenstoffe.

9 Z.B. natürliches oder abgereichertes Uran, Thorium oder langlebige Abfälle aus aktuellen Kernreaktoren. Die Zusammensetzung der Materialmischung, die im Reaktorkern kritisch wird, wird zentral gesteuert.

10 Für größere Kraftwerke vor Ort, für das modulare Modell DF300 über eine transportable Kartusche.

11 Einzelne Stoffe wie Technetium99 strahlen länger. Betrachtet man aber die Gesamtheit der Reststoffe, liegt die Radiotoxizität des Gebindes nach wenigen hundert Jahren unterhalb von Natururan.

Warum Dual Fluid Wettbewerbern überlegen ist **Wettbewerbsanalyse und Energy Return**

Der Erntefaktor (Energy Return on Investment, EROI) ist ein wichtiger Leistungsindikator für Energietechnologien. Er bezeichnet das Verhältnis der gewonnenen Energie zur Gesamtmenge der eingesetzten Energie, betrachtet über den kompletten Lebenszyklus – also für Bau, Betrieb, Brennstoff, Sicherheit, Rückbau und Entsorgung einer Anlage:

$$EROI = \frac{E_{out}}{E_{in}}$$

Ein Erntefaktor von 10 bedeutet, dass ein Kraftwerk während seiner Laufzeit zehnmal mehr Energie bereitstellt als insgesamt aufgewendet werden muss, um den Betrieb inklusive aller Neben- und Folgekosten zu ermöglichen.¹²



Der Erntefaktor zeigt die Leistung

Fossil befeuerte Kraftwerke erreichen einen Erntefaktor von etwa 30: Sie „ernten“ etwa das Dreißigfache der eingesetzten Energiemenge. Solar- und Windkraft bieten einen Erntefaktor von vier bis neun; bezieht man die energieintensive Speicherung ein, sinkt der Wert weiter. Das ist wenig wirtschaftlich. Während ein Erntefaktor von etwa 30 die industrielle Revolution ermöglichte und für die Versorgung eines Industrielands genügt, ist die Rückkehr zu weniger effizienten Technologien aus dem vorindustriellen Zeitalter

mit Risiken verbunden: Je höher der Anteil an ineffizient hergestellter Energie am Gesamtenergiemix ist, desto knapper und teurer wird Energie. Das senkt den Lebensstandard und die Innovationskraft. Moderne, menschen- und naturfreundliche Gesellschaften sollten versuchen, saubere und zuverlässige Energie in großen Mengen für wenig Geld bereitzustellen. Ein Brennstoff, der zwei Millionen mal dichter ist als Kohle, kann das leisten.

Moderne, menschen- und naturfreundliche Gesellschaften brauchen saubere und preiswerte Energie. Ein Brennstoff, der dichter ist als Kohle, kann das leisten.

¹² Der Erntefaktor stellt die Energieeffizienz auf der Erzeugerseite dar. Während auf der Verbraucherseite, z. B. bei Elektrogeräten, seit langem eine hohe Effizienz angestrebt wird, fehlt dieser Gedanke auf der Energie erzeugenden Seite bisher.



Heutige Kernkraft bleibt weit hinter ihren Möglichkeiten

Heutige Leichtwasserreaktoren haben einen Erntefaktor von etwa 100. Damit sind sie fossil befeuerten Kraftwerken etwa dreifach überlegen. Das hört sich gut an, ist aber eigentlich ein Hinweis auf unzureichende Leistung: Eine Kernspaltung setzt nicht dreimal, sondern Millionen mal mehr Energie frei als ein Verbrennungsprozess. Warum bleibt die heutige Kernkraft so weit hinter ihren Möglichkeiten zurück?

Ein Blick auf den Energiebedarf im Leichtwasserreaktor (Abb. 3) zeigt, dass über 80 % der eingesetzten Energie auf die Bereitstellung und Entsorgung des Brennstoffs entfallen – d.h. für Abbau und Veredelung des Urans sowie die Herstellung, Verwertung und Entsorgung der Brennelemente. Dieser Wert ist so hoch, weil heutige Reaktoren nur einen sehr kleinen Teil des geförderten Natururans, etwa ein Prozent, zu Strom machen können.

Der Rest muss als Atommüll entsorgt werden. Die Stromerzeugung mit heutigen Leichtwasserreaktoren ist daher ein wenig rentables System.¹³ Hohe Investitionskosten und Regularien heben den Effizienzvorteil gegenüber fossil befeuerten Kraftwerken fast auf.¹⁴ Insgesamt bleibt das enorme Potenzial der Kernspaltung weitgehend ungenutzt.

Eine neue Generation von Reaktoren ("Generation IV") erreicht graduelle, aber keine grundlegende Steigerung der Effizienz. Denn entweder bleiben die Entwürfe bei den umständlichen und teuren Brennstäben, oder sie bauen auf älteren Flüssigsalz-Designs auf, wo dieselbe Flüssigkeit sowohl den Brennstoff trägt als auch die Wärme abführt.¹⁵ Das führt für beide Zwecke zu suboptimalen Ergebnissen.

¹³ Niedrige Brennstoffkosten ändern daran nichts, denn die Kosten für den gesamten Brennstoffkreislauf – einschließlich Brennelementherstellung und Entsorgung – verteuern das System drastisch.

¹⁴ Dennoch haben Kernkraftwerke einen Effizienzvorteil gegenüber Kohlekraftwerken, erkennbar an der günstigeren Stromproduktion von abbeschriebenen Kernkraftwerken.

¹⁵ Ausnahmen: Das Design von Moltex Energy sieht flüssigen Brennstoff vor, der sich in festen Brennstäben befindet. Mehrere Akteure arbeiten an einer Neuauflage des Kugelhaufenreaktors. Die Firma Newcleo kombiniert einen bleigekühlten, subkritischen Reaktor mit einem Beschleuniger. Von keinem dieser Ansätze sind große Effizienzgewinne erwartbar.

Energiebedarf eines typischen Leichtwasserreaktors (LWR)

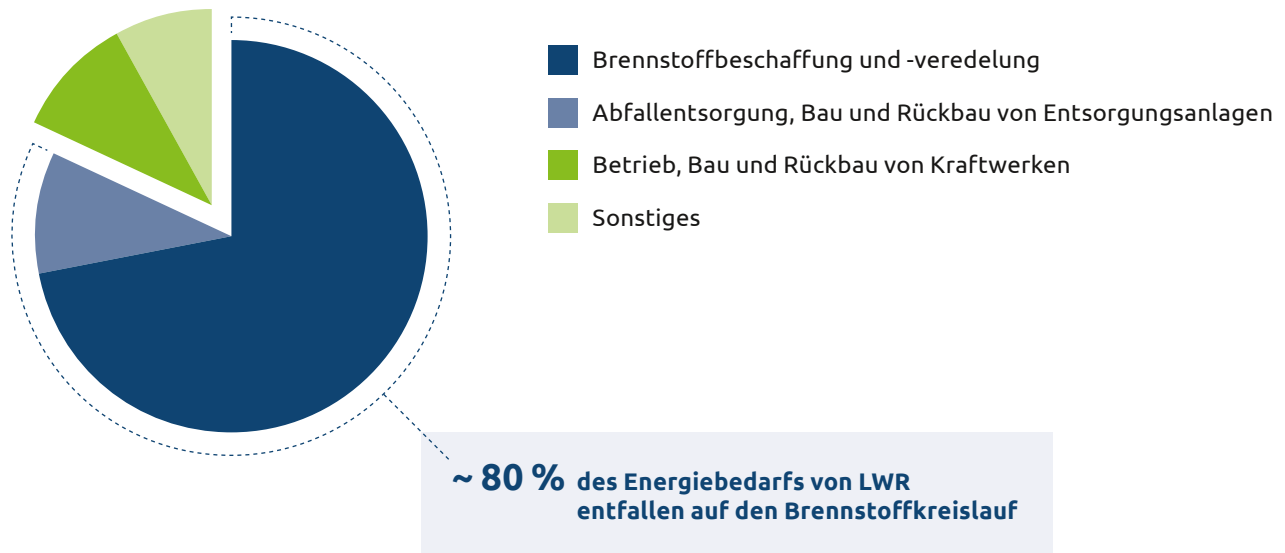


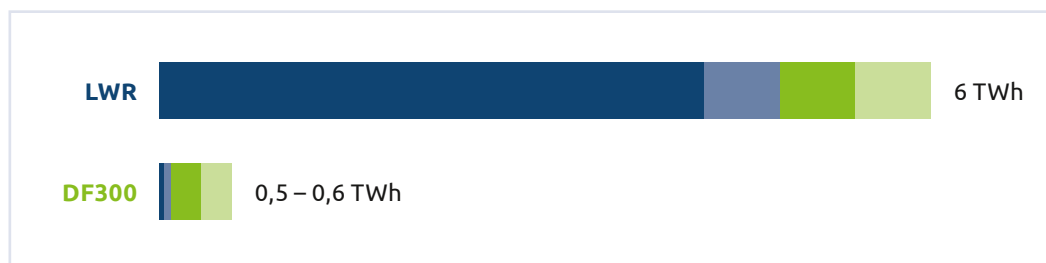
Abbildung 3: Energiebedarf eines typischen Kernkraftwerks (Leichtwasserreaktor) mit dem heutigen ineffizienten Brennstoffkreislauf.
Quelle: Vattenfall, EPD Forsmark 2009/2010

Wie Dual Fluid die Effizienz erhöht und die Kosten senkt

Ein Reaktordesign mit konzentriertem Flüssigbrennstoff und Bleikühlung kann den Energiebedarf für Brennstoffbeschaffung und -veredelung sowie die Abfallentsorgung auf einen Bruchteil reduzieren (blaue Berei-

che, Abb. 4). Weitere Effizienzgewinne ergeben sich aus dem relativ kompakten System mit geringem Materialbedarf (grüne Bereiche, Abb. 4).

Energieaufwände Leichtwasserreaktor vs. DF300 (Lebenszyklus-Analyse)*



	LWR	DF300
■ Brennstoffbeschaffung und -veredelung	72 %	1 %
■ Abfallentsorgung, Bau und Rückbau von Entsorgungsanlagen	10 %	1 %
■ Betrieb, Bau und Rückbau von Kraftwerken	10 %	4 %
■ Sonstiges	8 %	4 %
Total	100 %	10 %

*Alle Werte sind Näherungswerte. Quellen: Vattenfall (LWR), eigene Berechnungen.

Abbildung 4: Energieaufwand DF300: 90% Ersparnis gegenüber LWR

Je mehr Energie effizient hergestellt wird, desto stärker sinken die Energiekosten. So entsteht ein positiver Kreislauf aus Innovation und gesundem Wachstum.

Insgesamt sinkt der Energiebedarf für ein Dual Fluid Kraftwerk – wie in Abb. 4 für den DF300 dargestellt – auf etwa ein Zehntel, was die Produktivität erhöht. Der Erntefaktor steigt, abhängig von der Reaktorgröße, auf einen Wert zwischen 800 bis 1000 (DF300) und 2000 (DF1500).¹⁶ Größere Kerne könnten eine weitere Steigerung bis zu einem Wert von 5000 ermöglichen.

Der hohe Wirkungsgrad, dargestellt durch den Erntefaktor (s. S. 11), senkt den Preis der erzeugten Produkte wie Strom oder Wasserstoff. Das kleine modulare Modell DF300 kann Strom etwa zur Hälfte der Kosten heutiger Kraftwerke erzeugen (s. S. 22).

Aus einem einfachen Grund sinkt der Strompreis angesichts der zehnfach erhöhten Effizienz nicht sofort auf ein Zehntel: Die Energie, die für den Bau und die Instandhaltung eines Dual Fluid Kraftwerks benötigt wird, ist heute noch teuer. Außerdem sinken Posten wie Arbeitskosten und Steuern nicht proportional zur steigenden Effizienz. Sobald jedoch der Anteil an effizient erzeugter Energie am Gesamt-Energiemix steigt, sinken auch die Energiekosten entsprechend. Dann setzt der hohe Erntefaktor einen positiven Kreislauf aus preiswerter Energie, Innovation und nachhaltigem Wachstum in Gang.

Erntefaktor (Energy Return on Investment, EROI) = Verhältnis zwischen gelieferter nutzbarer Energiemenge und eingesetzter Energiemenge für Bau, Brennstoff, Wartung, Sicherheit, Rückbau usw. eines Kraftwerks

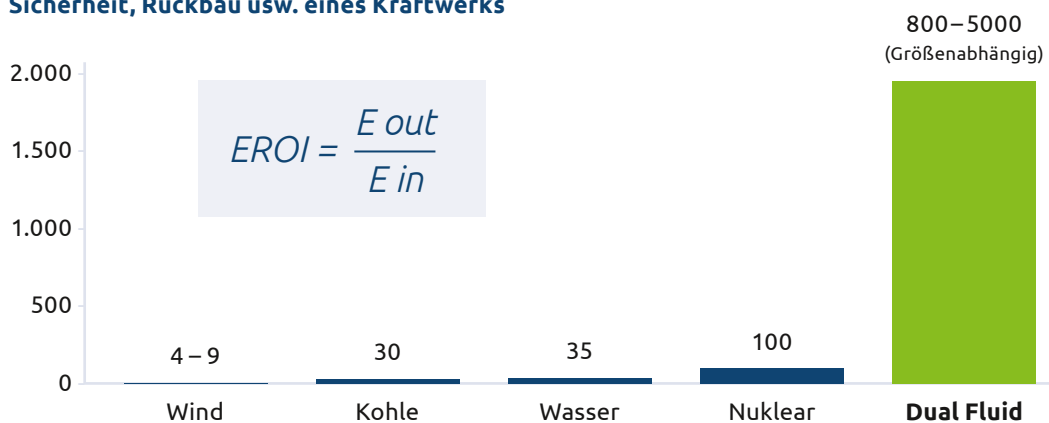


Abbildung 5: Erntefaktoren im Vergleich

¹⁶ Armin Huke et al, *Annals of Nuclear Energy* 80 (2015) 225: „Der Dual Fluid Reactor - Ein neues Konzept für einen schnellen Kernreaktor mit hohem Wirkungsgrad“; Daniel Weißbach, Götz Ruprecht et al, *Energy* 52 (2013) 210: „Energieintensitäten, EROIs (energy returned on invested) und Energierücklaufzeiten von stromerzeugende Kraftwerke.“

Warum Dual Fluid sicher ist

Dreifach geschützt durch die Natur



Das wichtigste Sicherheitsmerkmal der Dual Fluid Technologie ist die **Selbstregulation**. Die Spaltrate folgt automatisch der Energieentnahme: Wird dem System nur wenig Energie entzogen, steigt die Temperatur des Brennstoffs. Dann dehnt sich der flüssige Brennstoff aus. Infolgedessen sinken die Spaltrate und damit auch die Temperatur des Brennstoffs sofort. Eine Leistungsexkursion wie in Tschernobyl ist dadurch ausgeschlossen.¹⁷

Im unwahrscheinlichen Fall, dass sich das System über die normale Betriebstemperatur hinaus erhitzt – denkbar durch inadäquate Brennstoffmischung¹⁸ – bietet die **Schmelzsicherung** zusätzlichen Schutz. Die Schmelzsicherung ist ein aktiv gekühlter Abschnitt

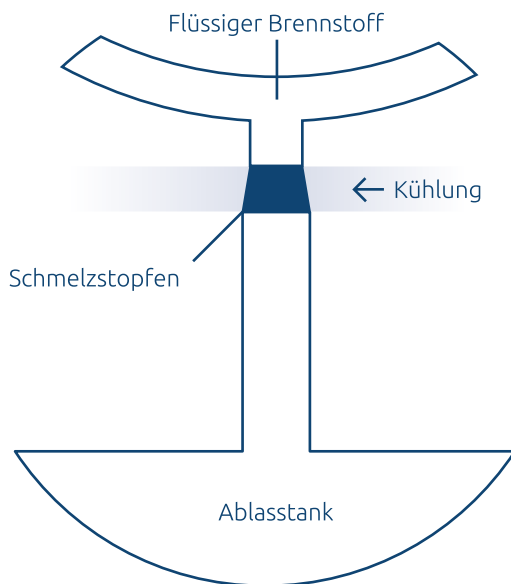


Abbildung 6: Skizze der Schmelzsicherung. Sobald die Kühlung nicht mehr ausreicht, fließt der Brennstoff in sichere Behälter ab. Die Kettenreaktion stoppt sofort.

der Brennstoffleitung in der Nähe ihres tiefsten Punkts. Dort wird der Kraftstoff aktiv von außen gekühlt, so dass er lokal ausfriert und die nach unten führende Leitung verschließt. Erhitzt sich der Brennstoff stärker als vorgesehen, schmilzt der gefrorene Pfropfen und der Brennstoff fließt mit der Schwerkraft nach unten in sichere Behälter (Abb. 6). Die Kettenreaktion stoppt sofort. Bei einem Stromausfall passiert dasselbe.

Die Nachzerfallwärme wird dann rein passiv abgeführt. Eine aktive Kühlung ist nicht erforderlich. Dies schließt auch Unfälle wegen nicht abgeführter Nachzerfallwärme aus (Harrisburg, Fukushima). Eine reguläre Abschaltung des Systems unterscheidet sich nicht von einer Notabschaltung. Dieses einfache Sicherungssystem ist unzerstörbar und hat sich bereits im experimentellen Salzsammel-Reaktor der 60er Jahre bewährt.

Zum wirksamen Schutz vor Gewalteinwirkungen und Erdbeben kann der nukleare Teil der Anlage unterirdisch in einem dick bewanderten **Bunker** stehen. Zusätzlich zu den üblichen Vorschriften schützt eine spezielle Gasatmosphäre vor Bränden.

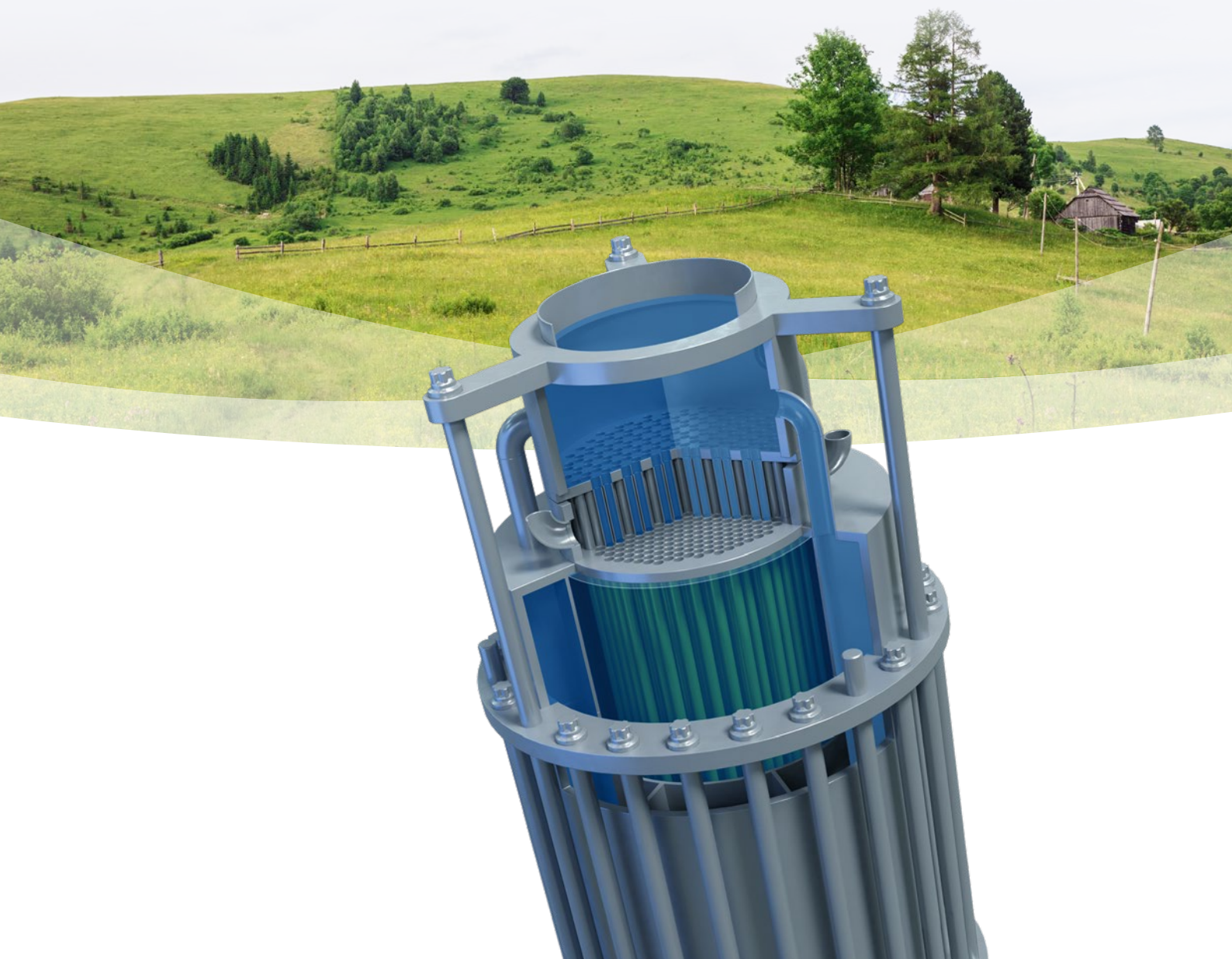
Selbst beim schlimmstmöglichen Unfall – einem Leck im Brennstoffkreislauf – würde kein radioaktives Material nach außen gelangen, da kein nennenswerter Druck herrscht und nichts explodieren kann.

¹⁷ Auch in heutigen Leichtwasserreaktoren ist eine Leistungsexkursion wie in Tschernobyl ausgeschlossen. Allerdings können sie sich nicht selbst regulieren, sondern benötigen aktive Steuerungstechnik, die den Reaktor komplexer und teuer macht.

¹⁸ Ursachen: Defekt oder Manipulation der Steuerungseinheit

Wir entwickeln Kernkraft
der fünften Generation:
**Emissionsfrei, hoch
effizient und sicher.**

dual-fluid.com



Durchdacht bis ins Detail

Antworten auf technische Fragen



Welche Materialien eignen sich?

Das Material, das die beiden Flüssigkeiten trennt, muss wärmeleitend und korrosionsbeständig gegenüber Blei und Metallbrennstoff sein. Im Vergleich zu Leichtwasserreaktoren ist die Auswahl an möglichen Strukturmaterialien relativ groß, denn die schnellen Neutronen im Dual Fluid Reaktor werden mit geringerer Wahrscheinlichkeit durch die Strukturmaterialien eingefangen. Dadurch verändern diese sich weniger schnell.

Prinzipiell geeignete Materialien gibt es bereits seit Jahrzehnten, aber sie enthalten seltene und teure chemische Elemente. Für die klassische Reaktortechnik und modernere Salzschnmelze-Konzepte kommen sie kaum infrage, da diese aufgrund der geringen Leistungsdichte größere Materialmengen benötigen.¹⁹ Auf Dual Fluid trifft das nicht zu: Da die Leistungsdichte ein Vielfaches ist, wird nur ein Bruchteil an Material benötigt. Daher kann das gesamte Spektrum moderner industrieller Werkstoffe genutzt werden. Selbst

die Verwendung von Edelmetallen als Bestandteil der Legierungen hätte einen relativ geringen Einfluss auf die Gesamtkosten des Systems.

Beispiele für solche Materialien sind Legierungen aus Refraktärmetallen²⁰ oder hochbeständige Keramiken wie Silizium, Titan oder Zirkoniumkarbid, die seit einiger Zeit in industriellen Anwendungen unter extremen Bedingungen eingesetzt werden.²¹ Darüber hinaus können hitzebeständige Beschichtungen mit Stoffen wie Yttriumoxid, das reinem Uran bis zu 1500 °C standhält, verwendet werden.

Da die Temperaturen im Reaktorkern deutlich niedriger sind und der Brennstoff nicht aus reinem Uran, sondern aus einem weniger aggressiven Uran-Chrom-Gemisch besteht, ist die Identifikation und Entwicklung des am meisten geeigneten Materials eine lösbare Entwicklungsaufgabe.²²

Im Gegensatz zu Leichtwasserreaktoren kommt das gesamte Spektrum industrieller Hochleistungsmaterialien infrage.

¹⁹ Ein weiterer Kostentreiber bei Leichtwasserreaktoren sind die Strukturmaterialien für Brennelemente, die regelmäßig ausgetauscht werden müssen.

²⁰ Refraktärmetalle sind korrosionsbeständig, haben einen hohen Schmelzpunkt und dehnen sich bei Erwärmung nur wenig aus. Ihre Wärmeleitfähigkeit ist hoch.

²¹ Auf dem Gebiet der Hochleistungskeramik hat die Werkstofftechnik zuletzt große Fortschritte gemacht. Deshalb kann heute ein komplexes Produkt wie ein Dual Fluid Kern, anders als vor zwei Jahrzehnten, hergestellt werden.

²² Die grundsätzliche Eignung einiger Hochleistungskeramiken ist belegt. Für konkrete Bauausführungen des Reaktors müssen Tests durchgeführt werden.

Sind Proliferation oder Strahlung ein Problem?

Waffenfähiges Plutonium lässt sich deutlich billiger und einfacher ohne einen Kernreaktor herstellen. Ein Dual Fluid Kraftwerk müsste stark umgebaut werden, um waffenfähiges Material zu gewinnen, weil das spaltbare Material im Reaktorkern permanent umgewandelt wird. Die Aufsichtsbehörden würden solche Umbauten bemerken. Da ein Dual Fluid Reaktor andererseits auch Plutonium aus alten Kernwaffen verwerten kann, kann er zur nuklearen Abrüstung beitragen.²³

Anders als oft angenommen wird, geben Kernkraftwerke so wenig Strahlung nach außen ab, dass davon keine Gefahr für Menschen, Tiere oder die Natur ausgeht. Da ein Dual Fluid Kraftwerk bei normalen Drücken

betrieben wird, besteht auch nicht die Gefahr einer Explosion oder eines ungewollten Druckausgleichs, der bei Fukushima zum Austritt von Radioaktivität geführt hat. Weil der nukleare Anlagenteil außerdem eingebunkert unter der Erde steht, würde selbst bei einem schweren Unfall oder einer Betriebsstörung keine Radioaktivität nach außen dringen – nicht einmal beim größten anzunehmenden Defekt, einem Leck im Brennstoff- oder Kühlkreislauf. Das Druckgefälle zeigt immer von außen nach innen.

²³ Wenige Wochen nachdem waffenfähiges Plutonium in den Reaktor eingespeist wird, wird es für Waffen unbrauchbar. Plutonium aus heutigen Reaktoren ist grundsätzlich nicht für Waffen verwendbar.

Eine Chance für private Investoren

Freier Wettbewerb der Ideen



In der Vergangenheit waren Großprojekte wie Raumfahrt oder neue Energietechnologien in staatlicher Hand, denn nur Regierungen konnten die erforderlichen hohen Summen aufbringen. Aber Regierungen verfolgen politische Interessen und haben wenig Anreize, wirtschaftlich zu denken. Ein freier Wettbewerb, in dem sich die besten und gewinnbringendsten Konzepte durchsetzen, wird durch einen staatlich finanzierten Energiesektor eher blockiert. So sehen wir uns aktuell einer Energiekrise ausgesetzt, die vor allem das Ergebnis staatlicher Fehllenkung von Investitionen ist.

Die vernetzte und globalisierte Wirtschaft hat heute die Möglichkeit, wettbewerbsorientierte Entwicklungen auch in besonders kapitalintensiven Sektoren zu finanzieren. Das zeigen etwa die diversen Weltraumprojekte bekannter Unternehmer, die kostengünstige Lösungen entwickelt haben. Angesichts der hohen Beträge, die bereits in diese Projekte investiert wurden, sollte es ebenso möglich sein, mit Milliarden privater Dollar einen Kernreaktor der Generation V zu entwickeln. Natürlich geschieht das in enger Abstimmung mit nationalen und internationalen Behörden, wie in der Raumfahrt auch. Doch die Annahme, dass nur der Staat solche Großprojekte mit Steuergeldern finanzieren kann, trifft längst nicht mehr zu.

So senkt Dual Fluid die Kosten für Kernkraft:

- » Das System ist wesentlich kompakter als heutige Leichtwasser- oder Salzschnmelzereaktoren und eignet sich daher für eine Serienproduktion,
- » der Betrieb unter Normaldruck macht ein Überdruck-Containment überflüssig,
- » der rein passive Abtransport der Nachzerfallswärme erspart das Notkühlsystem,
- » die benötigte Brennstoffmenge ist auf einen Bruchteil reduziert.

Investitionskosten für Prototyp und Serienproduktion

Alle Informationen und Kostenschätzungen in den folgenden Abschnitten beruhen auf zuverlässigen und öffentlich zugänglichen Quellen, soweit sie bestehende Technologien betreffen. Die Zahlen zu Dual Fluid wurden von den Autoren sorgfältig erarbeitet. Alle Quellen und Berechnungen sind auf Anfrage erhältlich.

Die Entwicklungskosten für den Prototyp eines DF300-Reaktors betragen etwa 6 Mrd. US\$ (Zeithorizont: ca. 8 Jahre). Einschließlich der Fertigungsstraße für die Serienprodukti-

on wird eine Gesamtsumme im zweistelligen Milliardenbereich benötigt (Zeithorizont insgesamt: 13 bis 14 Jahre). Ein höherer Investitionsaufwand könnte die Prototypenentwicklung auf ca. 6 Jahre und die Serienfertigung auf 8 Jahre beschleunigen. Die Entwicklung des Modells DF1500 mit seinem Brennstoff-Recyclingsystem (Pyrochemical Processing Unit, PPU) erfordert erneut Investitionen im niedrigen zweistelligen Milliardenbereich, die mit den Einnahmen aus den ersten Verkäufen des DF300 finanziert werden soll.

Investitionskosten für Versorgungsunternehmen

Sobald die Serienproduktion anläuft, können Energieversorger ein Dual Fluid Kraftwerk erwerben. Die Gesamtinvestitionskosten des Betreibers für ein DF300-Kraftwerk betragen ca. 1,1 Mrd. US\$. Darin enthalten sind der Kaufpreis der gesamten Anlage, der Grundstückserwerb, die Bauplanung, der Genehmigungsprozess, die Errichtung der umliegenden Gebäude, die Bauzeitinsen, die Managementkosten und ein Puffer für unvor-

hergesehene Ausgaben. Dies führt zu spezifischen Investitionskosten von ca. 3,5 US\$/W. Die Markteinführung des DF1500-Kraftwerks ist für etwa 4 bis 5 Jahre nach dem Produktionsstart des DF300 geplant. Die Gesamtinvestitionskosten für die Betreiber des DF1500 werden auf ca. 4 Mrd. US\$ geschätzt, was spezifischen Kosten von 2,7 US\$/W in elektrischer Leistung entspricht.

Stromkosten

Vergleich Stromgestehungskosten (Levelized Cost of Energy, LCOE)

Stromkosten können anhand der Stromgestehungskosten (Levelized Cost of Energy, LCOE) verglichen werden: Zur Berechnung werden alle Beträge, die für Bau, Brennstoff, Betrieb und Rückbau eines Kraftwerks über seine gesamte technische Lebensdauer eingesetzt werden müssen, addiert. Die Summe wird durch die Gesamtmenge an elektrischer Energie geteilt, die das Kraftwerk bereitstellt. **Tabelle 1** zeigt einen Vergleich der Stromgestehungskosten zwischen Dual Fluid sowie heutiger Kernkraft, Kohle und Gas.²⁴

Stromgestehungskosten (LCOE)

	DF300	DF1500	Heutige Kernkraft	Kohle	Gas GuD	Gas OT
LCOE US\$/MWh	27	21	65	55	70	95
LCOE US¢/kWh	2,7	2,1	6,5	5,5	7,0	9,5

Tabelle 1: LCOE-Vergleich verschiedener Kraftwerkstypen (Quellen außer Dual Fluid: [Weltbank, 2020](#)). Gas GuD = Gas- und Dampfturbinenkraftwerk, Gas OT = Offene Gasturbine; Gas OT ist leichter regelbar als GuD-Kraftwerke und daher als Backup für schwankende Umgebungsenergien bevorzugt. Heutige Kernkraft: Werte für OECD-Länder. Kernkraft ist heute trotz höherem Erntefaktor durchschnittlich teurer als Kohle, bedingt durch hohen regulatorischen Aufwand, fehlende Serienproduktion und lange Bauzeiten.

Die Stromgestehungskosten für Wind- und Solarenergie sind mit denen von Kohle vergleichbar oder niedriger, je nach Standort und verwendetem System. Ein LCOE-Vergleich wäre jedoch irreführend, da Solar- und Windenergie hohe Zusatzkosten für Speicherung und Netzausbau erfordern, die der LCOE nicht abbildet. Vor allem aber können sie nicht die Grundlast abdecken, die für jedes Stromnetz unerlässlich ist.

Die Stromgestehungskosten von Dual Fluid liegen deutlich unter den Werten anderer Kraftwerkstypen: **Im Vergleich zu heutigen Kohle- und Kernkraftwerken halbiert DF300 die Stromkosten. DF1500 senkt die Kosten weiter.** Die Bepreisung von Kohlendioxidemissionen vergrößert den Preisvorteil von Dual Fluid zusätzlich.

²⁴ Gemäß branchenüblicher Praxis wurden die Jahressummen der Kosten (im Zähler) und der Energieproduktion (im Nenner) mit einem festen Satz von sieben Prozent abgezinst.

Vollkostenanalyse

Im Gegensatz zum LCOE, der die durchschnittlichen Stromgestehungskosten über die gesamte Lebensdauer eines Kraftwerks angibt, stellt eine Vollkostenanalyse die Kostenstruktur für den Betrieb des Kraftwerks dar. Das erste Betriebsjahr ist am teuersten. Danach nehmen Zinsen und Abschreibungen von Jahr zu Jahr ab. **Tabelle 2** zeigt einen Vollkostenvergleich zwischen Dual Fluid und anderen Stromerzeugungsarten, wobei sich die Werte für Dual Fluid auf das teuerste erste Betriebsjahr beziehen. Die Werte für bestehende Kern-, Kohle- und Gaskraftwerke sind Durchschnittswerte über die gesamte technische Lebensdauer.

Mit einem Vollkostenwert von unter 50 US\$/MWh ist das DF300-Kraftwerk selbst im ersten Betriebsjahr deutlich günstiger als jedes andere Kraftwerk. Der Hauptgrund dafür ist, neben den relativ niedrigen Kapitalkosten, der geringe Brennstoffverbrauch. Mit dem DF1500 ergibt sich weiteres Kostensenkungspotential auf den Strommärkten. Mit Grenzkosten von 9,2 US\$/MWh und Vollkosten von 29US\$/MWh wird ein DF1500-Kraftwerk bereits im ersten Jahr Strom zur Hälfte der Kosten anderer Kraftwerke produzieren.

Vollkostenvergleich, US\$/MWh

	DF300	DF1500	Heutige Kernkraft	Kohle	Gas GuD	Gas OT
Betriebskosten	5,1	2,0	4,6	5,4	3,3	5,6
Brennstoffkosten	0,5	0,2	8,8	27,9	44,3	60,0
Wartungskosten	9,8	7,0	11,9	5,0	2,8	3,4
Grenzkosten	15,5	9,2	25,3	38,3	50,3	69,0
Kapitalkosten, Steuern, Abschreibungen	32,6	19,9	51,4	28,3	16,7	19,6
Vollkosten	48,1	29,1	76,7	66,7	67,0	88,6

Tabelle 2: In einem Vollkostenvergleich unterbietet Dual Fluid alle anderen Technologien deutlich. Die Werte von Dual Fluid sind für das teuerste erste Betriebsjahr berechnet. Alle anderen Werte sind Durchschnittswerte über die Lebensdauer des Kraftwerks (Quelle: [Weltbank, 2020](#)). Gas GuD = Gas- und Dampfkraftwerk, Gas OT = Offene Gasturbine; Gas OT ist leichter regelbar und daher als Backup für schwankende Umgebungsenergien bevorzugt.

Kosten für Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe

Wasserstoff

Das heute gängigste Verfahren zur Wasserstoffproduktion ist die Dampfreformierung aus Methan. Sie verbraucht fossile Brennstoffe und ist CO₂-intensiv. Mit den hohen Temperaturen eines Dual Fluid Kraftwerks kann dagegen Wasserstoff durch katalytische Thermolyse effizient und emissionsfrei aus Wasser hergestellt werden. **Ein DF300-Kraftwerk kann emissionsfreien Wasserstoff zu einem Preis herstellen, der konkurrenzfähig ist gegenüber der Dampfreformierung: 1,2 – 1,5 US\$/MJ.** DF1500 kann den Preis weiter senken. Zum Vergleich: Emissionsfreier Wasserstoff aus Windkraft kostet 6 – 8 US\$/MJ.

Hydrazin

Hydrazinhydrat ist ein flüssiger Kraftstoff mit benzinähnlichen Eigenschaften (einschließlich Toxizität). Mit Kernkraft hergestelltes Hydrazinhydrat kann eine erschwingliche und emissionsfreie Alternative zu Erdölprodukten für Autos und Flugzeuge sein. Es kann einfach in vorhandenen Verbrennungsmotoren genutzt werden, nachdem diese geringfügig verändert wurden. **Ein DF1500-Kraftwerk kann Hydrazin zu einem Preis liefern, der mit heutigen Kraftstoffen auf Ölbasis konkurriert: 0.6 – 1,1 US\$/MJ** (abhängig vom Herstellungsverfahren).

Ein Hydrazin produzierendes Dual Fluid Kraftwerk kann mit Ölproduktionskosten oberhalb von 40 US\$ pro Barrel konkurrieren. Nur Ölfelder mit primärer Ölgewinnung (z. B. im Nahen Osten) können so günstig produzieren. Diese Ressourcen werden zuerst und in absehbarer Zukunft erschöpft sein.

Übersicht: Kosten für Kraftstoffe, konventionell oder mit Dual Fluid hergestellt

	Gesamt US\$/MJ ²⁵			
	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) ²⁶	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 Aufspaltung (z. B. SSAS)	2,0	1,0–1,4	0,6–0,95	0,4–0,6
Wasserstoffherzeugung, S-I oder HTE	1,8–2	1,2–1,5	0,9–1	0,7–0,8
Wasserstoff (aus Methan/Dampfreformierung, 2 US\$/kWh)	1,3–1,5	-	-	-
Wasserstoff aus Windenergie	6–8	-	-	-
Ammoniakproduktion heute	1,3	0,7	0,45	0,35
Ammoniakproduktion, direkte Aufspaltung (z. B. SSAS)	0,8	0,4	0,25	0,18

Tabelle 3: Kraftstoffproduktionskosten konventionell und mit Dual Fluid. Die fettgedruckten Werte erleichtern die wichtigsten Preisvergleiche. SSAS: Solid-State Ammonia Synthesis. S-I: Schwefel-Iod-Verfahren. HTE: Hochtemperatur-Elektrolyse

Business Case und Produkt-Pipeline

Dual Fluid wird nach Einführung der Serienproduktion Umsätze überwiegend aus dem Verkauf von Reaktoren generieren. Der erste Reaktor DF300 hat eine thermische Leistung von ca. 600 MW und eine elektrische Leistung von ca. 300 MW.

Der DF300 wird zu einem Preis von etwa 3.000 US\$ pro Kilowatt angeboten werden. Damit können Käufer bei 40 US\$/MWh Stromverkaufspreis eine Nettorendite von ca. 9% IRR erlösen. Im Kaufpreis inbegriffen ist das Brennstoffinventar für ca. 25 Jahre. Je nach Einsatzbedingungen reicht es längere Zeit,

beispielsweise bei überwiegendem Einsatz in Teillast. Nach dieser Zeit kümmert sich Dual Fluid um Abtransport und Neulieferung des Brennstoffs.

Die Reaktoren von Dual Fluid sollen zueinander identisch sein und eine Typengenehmigung durchlaufen haben, um den Genehmigungsaufwand für den Kunden zu minimieren. Die Serienproduktion soll je Fertigungslinie auf 50 Exemplare jährlich angelegt sein. In heutiger Währung ergibt sich bei Verkauf aller produzierten Reaktoren ein Einnahmepotential von ca. 45 Mrd. US\$ jährlich.

²⁵ Die Heizwerte von ölbasierten Kraftstoffen, Hydrazin, Wasserstoff und Ammoniak sind 42MJ/kg, 19MJ/kg, 125 MJ/kg und 18 MJ/kg

²⁶ Canadian Oil Sands Supply Costs and Development Projects (2016 – 2036), 2017, Canadian Energy Research Institute (CERI)

Die jährlichen Kosten der Fertigung werden ca. 10 Mrd. US\$ betragen. Aus den Überschüssen müssen die aufgelaufenen Entwicklungskosten (ca. 20 Mrd. US\$) finanziert werden. Die verbleibenden Gewinne sollen bis auf Weiteres nicht oder nur zu einem geringen Teil ausgeschüttet werden, sondern zur Entwicklung weiterer Produktlinien dienen. Dabei handelt es sich insbesondere um die Recyclinganlage (PPU / Pyrochemical Processing Unit), die große Variante des Kraftwerks DF1500 mit ca. 3.000 MW thermischer und 1.500 MW elektrischer Leistung, sowie die Variante DF30G mit ca. 30.000 MW thermischer Leistung, in der Kraftstoffe auf Kohlenstoff- und Stickstoff-Basis sowie Basischemikalien für die chemische Industrie synthetisiert werden können. Die langfristigen Zielkosten der Energie bei den größeren Varianten liegen bei etwa 10 US\$/MWh_{el} beim DF1500 und bei 3 bis 4 US\$/MWh_{th} beim DF30G.

In weiteren Entwicklungsschritten sollen neue Anwendungen von Nukleartechnik entwickelt werden, wie Nuklearbatterien mit mehreren

Jahrzehnten Lebensdauer, die in allen Arten von mobilen Anwendungen oder in kleinen stationären Anlagen eingesetzt werden könnten.

Mit diesem Entwicklungsplan ergibt sich für den Zeitpunkt des Beginns der Serienproduktion eine geschätzte Bewertung von Dual Fluid im Bereich von 150 Mrd. US\$. Wird das erhebliche Wachstumspotential eingepreist, könnte dieser Wert um ein Vielfaches übertroffen werden.

Damit vom ersten Jahr der Serienfertigung an mehrere Dutzend Reaktoren der DF300-Klasse abgesetzt werden können, muss der Bekanntheitsgrad der Technologie steigen. Das sollte insbesondere deshalb gelingen, da die Dual Fluid Technik disruptiv ist: Sie produziert Energie zu deutlich geringeren Kosten als fossile Energieträger, ist emissionsfrei und naturfreundlich. Diese Botschaft wird wesentlich dazu beitragen, die notwendige Unterstützung aus Politik, Wirtschaft und Medien zu erhalten. Auch der geplante Börsengang zur Mitte des Jahrzehnts wird helfen, den Bekanntheitsgrad von Dual Fluid zu steigern.

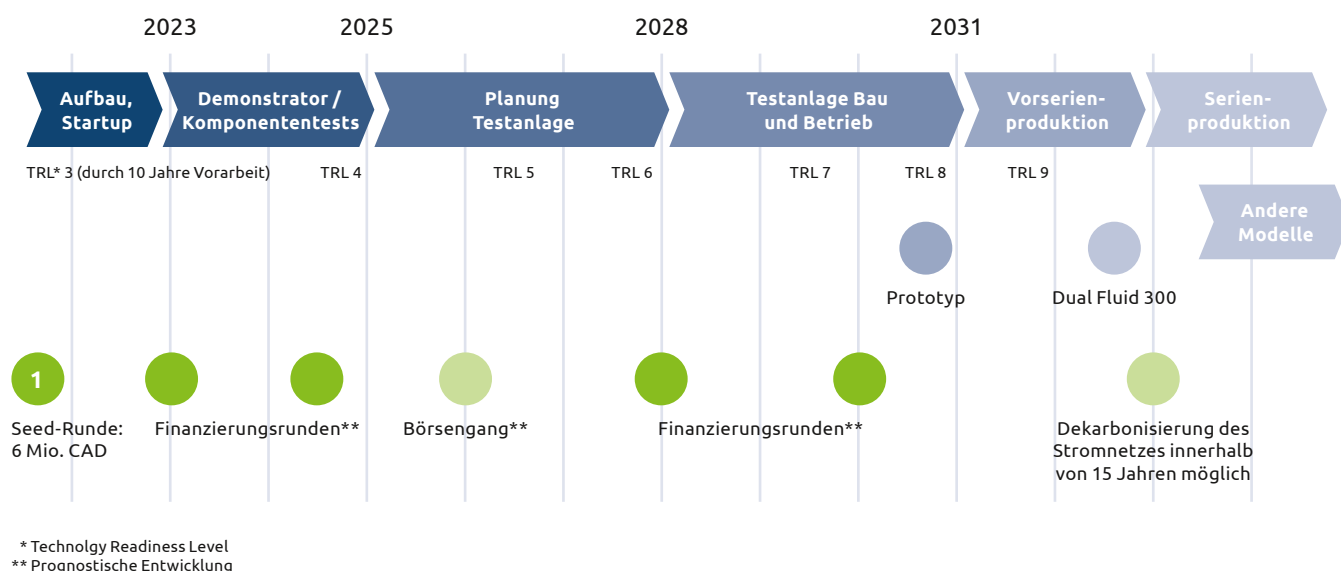


Abbildung 7: Entwicklungspfad zur Serienreife. Die Seed-Finanzierung wurde im Juni 2021 abgeschlossen.

Wissenschaftliche Publikationen

Jakub Sierchuła, Daniel Weißbach 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: “New methods for nuclear waste treatment of the Dual Fluid reactor concept”

Chunyu Liu et al, *Metals* 10 (2020) 1065: “Thermal Hydraulics Analysis of the Distribution Zone in Small Modular Dual Fluid Reactor”

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

Xiang Wang, Rafael Macian-Juan, *Int J Energy Res.* 42 (2018) 4313-4334: “Steady-state reactor physics of the dual fluid reactor concept”

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, Chunyu Liu, Rafael Macian-Juan, *Progress in Nuclear Energy* 110 (2018) 364-373: “Preliminary hydraulic analysis of the distribution zone in the Dual Fluid Reactor concept”

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

Xiang Wang, Dissertation, Technical University of Munich, Chair of Mechanical Engineering (2017): “Analysis and Evaluation of the Dual Fluid Reactor Concept”

Xun He, Dissertation, Technical University of Munich, Chair of Nuclear Engineering, (2016): “Validation of the TRACE Code for the System Dynamic Simulations of the Molten Salt Reactor Experiment and the Preliminary Study on the Dual Fluid Molten Salt Reactor”

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, Götz Ruprecht et al, *Energy* 52 (2013) 210: “Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants”

