



Dokumentation

Globaler Markt für Uran und Brennelemente

Globaler Markt für Uran und Brennelemente

Aktenzeichen: WD 5 - 3000 - 143/24
Abschluss der Arbeit: 22.10.2024
Fachbereich: WD 5: Wirtschaft, Energie und Umwelt

Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages unterstützen die Mitglieder des Deutschen Bundestages bei ihrer mandatsbezogenen Tätigkeit. Ihre Arbeiten geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste geben nur den zum Zeitpunkt der Erstellung des Textes aktuellen Stand wieder und stellen eine individuelle Auftragsarbeit für einen Abgeordneten des Bundestages dar. Die Arbeiten können der Geheimschutzordnung des Bundestages unterliegende, geschützte oder andere nicht zur Veröffentlichung geeignete Informationen enthalten. Eine beabsichtigte Weitergabe oder Veröffentlichung ist vorab dem jeweiligen Fachbereich anzuzeigen und nur mit Angabe der Quelle zulässig. Der Fachbereich berät über die dabei zu berücksichtigenden Fragen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	4
2.	Versorgung im Brennstoffkreislauf Uran	4
2.1.	Uranvorkommen und -abbau	10
2.2.	Herstellung von Brennstäben und Brennelementen	25
2.2.1.	Arten von Kernbrennelementen für verschiedene Reaktoren	28
2.2.2.	Angebot und Nachfrage in der Brennstoffherstellung	34
2.2.3.	Bereitstellung von Brennstoffherstellung weltweit	34
2.2.4.	Sekundärversorgung aus dem Recycling	38
3.	Marktwirtschaftliche Entwicklung	39
4.	Beschaffung von Brennelementen deutscher AKW-Betreiber in der Vergangenheit	44

1. Einleitung

Die vorliegende Arbeit hat die Versorgung im Brennstoffkreislauf Uran zum Inhalt, die den Abbau und die Konzentrierung des Uranerzes, die Konversion und Anreicherung sowie die Herstellung von Brennelementen umfasst.

In den weiteren Ausführungen wird hierbei auf den globalen Markt für Brennelemente, deren Alternativen bei der Beschaffung sowie die deutsche Beschaffung in der Vergangenheit eingegangen.

Die vorliegende Arbeit trägt zu den genannten Themen Quellen dokumentarisch zusammen, erhebt dabei aber keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die angegebenen Quellen werden aufgelistet, eine Auswertung, Bewertung der Quellen und die Prognose des weiteren Bedarfs an Brennelement-Rohstoffen sind nicht Gegenstand der Arbeit.

2. Versorgung im Brennstoffkreislauf Uran

Das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz veranschaulicht den Brennstoffkreislauf wie folgt:¹

„Unter Versorgung versteht man den Weg des Urans von der Erzgewinnung bis zur Anlieferung der fertigen Brennelemente im Kernkraftwerk. Die Nutzung der Kernenergie ist auch in naher Zukunft nicht durch die Verfügbarkeit der Kernbrennstoffe (Uran) limitiert. Laut Angaben des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) betragen die Reichweiten der Uranvorräte ca. 240 Jahre bei einem konstanten weltweiten jährlichen Verbrauch von ca. 65.000 Tonnen Uran.

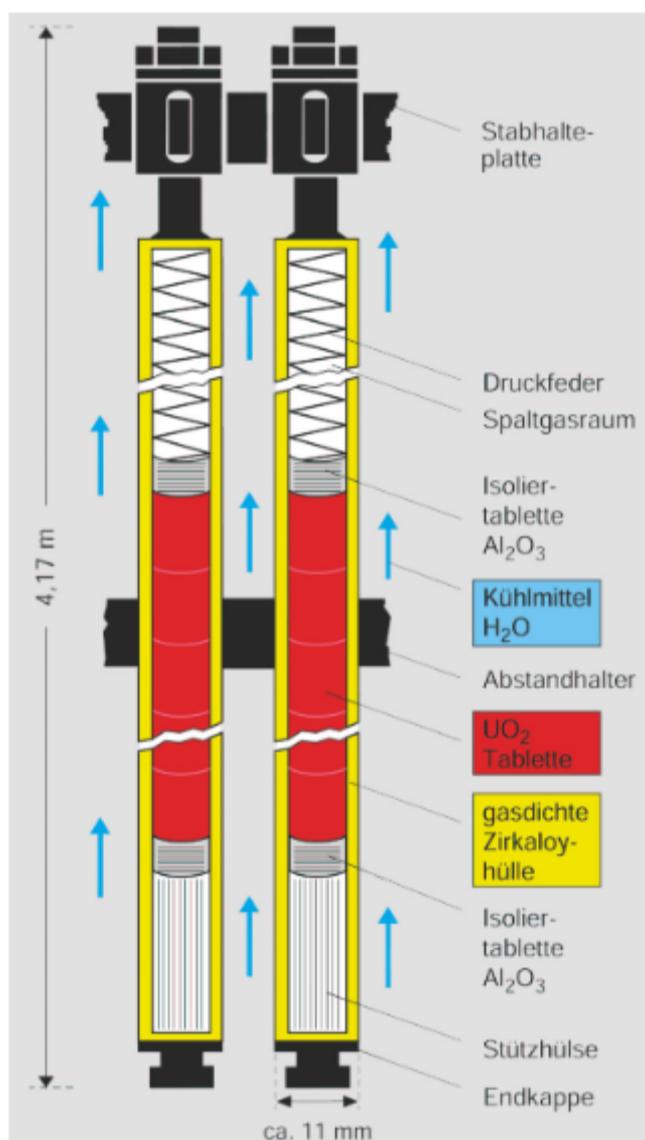
Die einzelnen Versorgungsstufen sind:

- Suche, Abbau und Konzentrierung des Uranerzes,
- Konversion und Anreicherung und
- Herstellung der Brennelemente

Brennelement-Herstellung:

- Das Urandioxid wird zu Tabletten gepresst und zu einer Keramik gesintert.
- Die Tabletten werden in die Brennstäbe gefüllt und gasdicht eingeschlossen:

1 https://www.stmuv.bayern.de/themen/reaktorsicherheit/ver_entsorgung/index.htm.



Quelle:  Informationszentrale Kernenergie

Viele Brennstäbe bilden ein Brennelement.

In der Abbildung ist der Aufbau zylinderförmiger Brennstäbe im Längsschnitt wiedergegeben. Die Stäbe haben z. B. bei einem der heute üblichen Siedewasserreaktoren eine Länge von 4,17 m und einen äußeren Durchmesser von ca. 11 mm. Die Umhüllung besteht aus einer gasdichten Zirkonium-Legierung mit einer Wandstärke von 0,65 mm. Die Brennstäbe werden im Betrieb durch Wasser gekühlt.

Die aus Urandioxid gepressten, gesinterten und geschliffenen Brennstoff-Tabletten (sog. Pellets) befinden sich in dem mit Endkappen verschlossenen Rohr. Eine Druckfeder drückt von oben auf die Pellets und hält sie in einer Säule fest zusammen. Der dadurch oberhalb des Kernbrennstoffs geschaffene Raum dient zur Sammlung der bei der Kernspaltung entstehenden Edelgase und der leicht flüchtigen Spaltprodukte.

Brennelemente:

Im Aufbau und in der Anzahl der enthaltenen Brennstäbe unterscheiden sich die Brennelemente je nach Reaktortyp.

Beispiel für einen **Druckwasser-Reaktor (DWR)**² mit einer elektrischen Nettoleistung von 1300 MW (Megawatt):

- 193 Brennelemente
- 240-300 Brennstäbe pro Element
- Urangehalt pro Element ca. 530 kg

Beispiel für einen **Siedewasser-Reaktor (SWR)** mit einer elektrischen Nettoleistung von 1300 MW (Megawatt):

- 840 Brennelemente
- 81-100 Brennstäbe pro Element
- Urangehalt pro Element ca. 175 kg³

Die Einsatzzeit der Brennelemente im Reaktor beträgt 3-4 Jahre. Der jährliche Nachladebedarf an Uran beträgt etwa 30 Tonnen.

Die Wärmeenergie, die ein Brennelement im Laufe seiner Einsatzzeit im Reaktor erzeugt, nennt man Abbrand. Als Maßeinheit dafür dient die Wärmefreisetzung in Megawatt-Tagen pro Tonne Brennstoff = MWd/t.

- Der durchschnittliche Abbrand für ein Leichtwasserreaktor-Element liegt bei etwa 50.000 - 60.000 MWd/t.
- Bei der Umwandlung von Wärme in Strom werden pro Tonne Brennstoff rund 400 - 500 Mio. Kilowattstunden Strom erzeugt.

Als ein Teil der Versorgung ist auch die Rückführung von Uran und Plutonium aus der Wiederaufarbeitung anzusehen, welches wieder zu Brennstoff verarbeitet wird:

- Es entsteht ein Mischbrennstoff aus Uran und Plutonium, bei dem das spaltbare Plutonium das spaltbare U-235 ersetzt.

2 Alle Hervorhebungen durch Verfasser dieser Dokumentation.

3 Siedewasserreaktoren benötigen mehr Brennstäbe, da diese weniger Uran pro Brennelement aufweisen und sie kürzer als in einem Druckwasserreaktor sind, <https://kernd.de/de/reaktortypen/>.

- Die Herstellung von Mischoxid-Brennelementen (MOX) gleicht im Prinzip der Brennelement-Produktion aus frischem Natururan, verläuft aber wegen der Radiotoxizität des Plutoniums unter erhöhten Sicherheitsbedingungen.“

Die World Nuclear Association führt detailliert zu den einzelnen Kreislaufprozessen wie folgt aus:⁴

- „Der Kernbrennstoffkreislauf ist die Abfolge industrieller Prozesse, bei denen Strom aus Uran in Kernkraftwerken erzeugt wird.
- Uran ist ein verhältnismäßig häufiges Element, das auf der ganzen Welt vorkommt. Es wird in einer Reihe von Ländern abgebaut und muss aufbereitet werden, bevor es als Brennstoff für einen Kernreaktor verwendet werden kann.
- Der Brennstoff, der aus einem Reaktor entnommen wird, kann nach Ende der Nutzungsdauer wiederaufbereitet werden, so dass der größte Teil zu neuem Brennstoff recycelt wird.

Die verschiedenen Aktivitäten, die mit der Erzeugung von Strom aus Kernspaltungsreaktionen verbunden sind, werden zusammenfassend als Kernbrennstoffkreislauf bezeichnet. Der nukleare Brennstoffkreislauf beginnt mit dem Abbau von Uran und endet mit der Entsorgung von Atommüll. Mit der Wiederaufbereitung von Altbrennstoffen als Option für die Kernenergie bilden die Stufen einen geschlossenen Kreislauf.

Um Uran für die Verwendung in einem Kernreaktor vorzubereiten, durchläuft es die Schritte des Abbaus und der Mahlung, der Umwandlung, der Anreicherung und der Brennstoffherstellung. Diese Schritte bilden das ‚vordere Ende‘ des nuklearen Brennstoffkreislaufs.

Nachdem Uran etwa drei Jahre in einem Reaktor verbleibt, um Strom zu erzeugen, kann der verwendete Brennstoff eine weitere Reihe von Schritten durchlaufen, einschließlich vorübergehender Lagerung, Wiederaufbereitung und Recycling, bevor der anfallende Abfall entsorgt wird. Zusammen werden diese Schritte als ‚Backen‘ des Kraftstoffkreislaufs bezeichnet.

- Uran [sh. Pkt. 2.1]

Uran ist ein leicht radioaktives Metall, das in der gesamten Erdkruste vorkommt, 500-mal häufiger als Gold und etwa so häufig wie Zinn. Man findet es in den meisten Gesteinen und Böden sowie in vielen Flüssen und im Meerwasser. Es kommt zum Beispiel in Konzentrationen von etwa vier Teilen pro Million (ppm) in Granit vor, der 60 % der Erdkruste ausmacht. In Düngemitteln kann die Urankonzentration bis zu 400 ppm (0,04 %) betragen, und einige Kohlelagerstätten enthalten Uran in Konzentrationen von mehr als 100 ppm (0,01 %). Der größte Teil der Radioaktivität, die mit Uran in der Natur in Verbindung gebracht wird, ist in

4 World Nuclear Association, 2024, nuclear fuel cycle:Nuclear Fuel Cycle Overview, <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/nuclear-fuel-cycle-overview>, übersetzt mit KI.

der Tat auf andere Mineralien zurückzuführen, die durch radioaktive Zerfallsprozesse aus Uran gewonnen werden und im Bergbau und bei der Verarbeitung zurückbleiben.

Es gibt eine Reihe von Gebieten auf der Welt, in denen die Konzentration von Uran im Boden so hoch ist, dass die Gewinnung von Uran für die Verwendung als Kernbrennstoff wirtschaftlich machbar ist. Solche Konzentrationen von Mineralien – einschließlich Uran –, die wirtschaftlich gefördert werden können, werden als Erz bezeichnet.

- Uranabbau [sh. Pkt. 2.1]

Die Entscheidung, welche Abbaumethode für eine bestimmte Lagerstätte verwendet wird, hängt von der Art des Erzkörpers sowie von sicherheitstechnischen und wirtschaftlichen Erwägungen ab.

Zur Gewinnung von Uranerz werden sowohl oberirdische (in der Regel Tagebau) als auch Untertage-Abbautechniken eingesetzt. Im Allgemeinen wird der Tagebau dort eingesetzt, wo sich die Lagerstätten nahe der Oberfläche befinden, und der Untertagebau wird typischerweise für Lagerstätten in Tiefen von mehr als 120 m eingesetzt.

Da die Wände eines Tagebaus geneigt sein müssen, um einen Einsturz zu verhindern, sind die erforderlichen Löcher größer als die Erzlagerstätte selbst. Infolgedessen kann die Menge an Material, die entfernt werden muss, um an das Erz zu gelangen, sehr groß sein. Untertagebergwerke weisen eine geringe Oberflächenstörung auf, und die Menge an Material, die für den Zugang zum Erz entfernt werden muss, ist erheblich geringer als bei einem Tagebau. Im Untertagebau sind zum Schutz vor luftgetragener Strahlenbelastung besondere Vorsichtsmaßnahmen, die vor allem in einer erhöhten Belüftung bestehen, erforderlich.

Ein zunehmender Anteil des weltweiten Urans stammt heute aus dem In-situ-Laugungsbergbau (ISL), bei dem sauerstoffreiches Grundwasser durch einen sehr porösen Erzkörper zirkuliert, um das Uranoxid aufzulösen und an die Oberfläche zu bringen. ISL kann entweder schwach saure oder alkalische Lösungen verwenden, um das Uran in Lösung zu halten. Das ausgelaugte Uranoxid wird dann wie in einer herkömmlichen Mühle aus der Lösung zurückgewonnen.

- Uran-Mahlung

Bei der Mahlung, die in der Regel in der Nähe einer Uranmine durchgeführt wird, wird das Uran aus dem Erz (oder ISL-Sickerwasser) gewonnen. Die meisten Bergbauanlagen verfügen über eine Mühle, obwohl dort, wo die Minen nahe beieinander liegen, eine zentrale Mühle das Erz aus mehreren Minen verarbeiten kann.

In einer Mühle wird das Erz zerkleinert und zu einer feinen Aufschlämmung gemahlen, die in Schwefelsäure (oder manchmal einer starken alkalischen Lösung) ausgelaugt wird, um die Trennung von Uran aus dem Abfallgestein zu ermöglichen. Anschließend wird es aus der Lösung als Uranoxid (U_3O_8) Konzentrat zurückgewonnen. Nach dem Trocknen und in der Regel dem Erhitzen wird es in 200-Liter-Fässern als Konzentrat verpackt, das manchmal auch als "Yellowcake" bezeichnet wird (obwohl es normalerweise khakifarben ist). Das Uranoxid-

Konzentrat enthält in der Regel mehr als 80 % Uran. Im Vergleich dazu kann das ursprüngliche Erz nur 0,1 % Uran enthalten.

U₃O₈ ist das Uranprodukt, das verkauft wird. Etwa 200 Tonnen werden benötigt, um in einen großen Kernreaktor (1000 MWe^[5]) ein Jahr lang Strom zu erzeugen.

Der Rest des Erzes, der den größten Teil der Radioaktivität und fast das gesamte Gesteinsmaterial enthält, wird in Abraumhalden, in technischen Anlagen in der Nähe der Mine (oft in einer abgebauten Grube) gelagert. Abraumhalden müssen von der Umwelt isoliert werden, da sie langlebige radioaktive Stoffe in geringen Konzentrationen enthalten und giftige Stoffe wie Schwermetalle enthalten können. Die Gesamtmenge der radioaktiven Elemente ist jedoch geringer und viel kurzlebiger als im ursprünglichen Erz.

- Umwandlung und Anreicherung

Das Uranoxid-Produkt einer Uranmühle ist nicht direkt als Brennstoff für einen Kernreaktor nutzbar – eine zusätzliche Aufbereitung ist erforderlich. Nur 0,7 % des Natururans sind 'spaltbar' oder können gespalten werden, d. h. der Prozess, bei dem in einem Kernreaktor Energie erzeugt wird. Die Form (oder das Isotop) von spaltbarem Uran ist Uran-235 (U-235). Der Rest ist Uran-238 (U-238).

Bei den meisten Reaktortypen muss die Konzentration des spaltbaren U-235-Isotops erhöht werden – typischerweise auf 3,5 % bis 5 % U-235b. Bei der Isotopentrennung, dem physikalischen Prozess der Konzentration (oder 'Anreicherung') eines Isotops im Verhältnis zu anderen Isotopen, muss das Uran in gasförmiger Form vorliegen. Das Uranoxid wird zunächst zu Urandioxid raffiniert, das als Brennstoff für solche Reaktortypen verwendet werden kann, die kein angereichertes Uran benötigen. Der Rest – der größte Teil des Uranoxids – wird dann in Uranhexafluorid umgewandelt, das bei relativ niedrigen Temperaturen ein Gas ist. Das Uranhexafluorid wird dann in 14-Tonnen-Zylinder abgelassen, wo es sich verfestigt. Diese starken Metallbehälter werden zur Anreicherungsanlage verschifft.

Bei der Anreicherung wird gasförmiges Uranhexafluorid in zwei Ströme getrennt: Der eine wird auf das erforderliche Niveau angereichert und wird als niedrig angereichertes Uran bezeichnet; der andere Strom wird in U-235 nach und nach abgereichert und wird einfach abgereichertes Uran genannt.

Der Hauptanreicherungsprozess in kommerziellen Anlagen verwendet Zentrifugen mit Tausenden von sich schnell drehenden vertikalen Rohren. Während sie sich drehen, führen die physikalischen Eigenschaften der Moleküle, insbesondere der Massenunterschied von 1 % zwischen den beiden Uranisotopen, dazu, dass sie sich trennen.

5 MWe - Megawatt elektrisch ist eine Leistungsangabe. Sie bezeichnet die elektrische Leistung des Generators einer Energieumwandlungsanlage, <https://www.chemie.de/lexikon/MWe.html>.

Das Produkt dieser Stufe des Kernbrennstoffkreislaufs ist angereichertes Uranhexafluorid, das wieder in angereichertes Uranoxid umgewandelt wird. Bis zu diesem Punkt im Zyklus kann das Brennstoffmaterial als fungibel angesehen werden (obwohl die Anreicherungsgrade variieren), aber die Brennstoffherstellung erfordert ein sehr spezifisches Design.

- Herstellung von Brennstoffen

Reaktorbrennstoff liegt im Allgemeinen in Form von Keramikpellets vor. Diese werden aus gepresstem Uranoxid (UO_2) gebildet, das bei einer hohen Temperatur (über $1400\text{ }^\circ\text{C}$) gesintert (gebacken) wird. Die Pellets werden dann in Metallrohre eingeschlossen, um Brennstäbe zu bilden, die zu einem Brennelement angeordnet sind, das für die Einführung in einen Reaktor bereit ist. Die Abmessungen der Brennstoffpellets und anderer Komponenten des Brennelements werden genau kontrolliert, um die Konsistenz der Eigenschaften und des Verhaltens des Brennstoffs zu gewährleisten.

In einer Brennstoffherstellungsanlage wird große Sorgfalt auf die Größe und Form der Verarbeitungsbehälter gelegt, um Kritikalität (eine begrenzte Kettenreaktion, bei der Strahlung freigesetzt wird) zu vermeiden. Bei niedrig angereicherten Brennstoffen ist die Kritikalität⁶ sehr unwahrscheinlich, aber in Anlagen, die spezielle Brennstoffe für Forschungsreaktoren verarbeiten, ist dies ein wichtiger Sicherheitsaspekt.

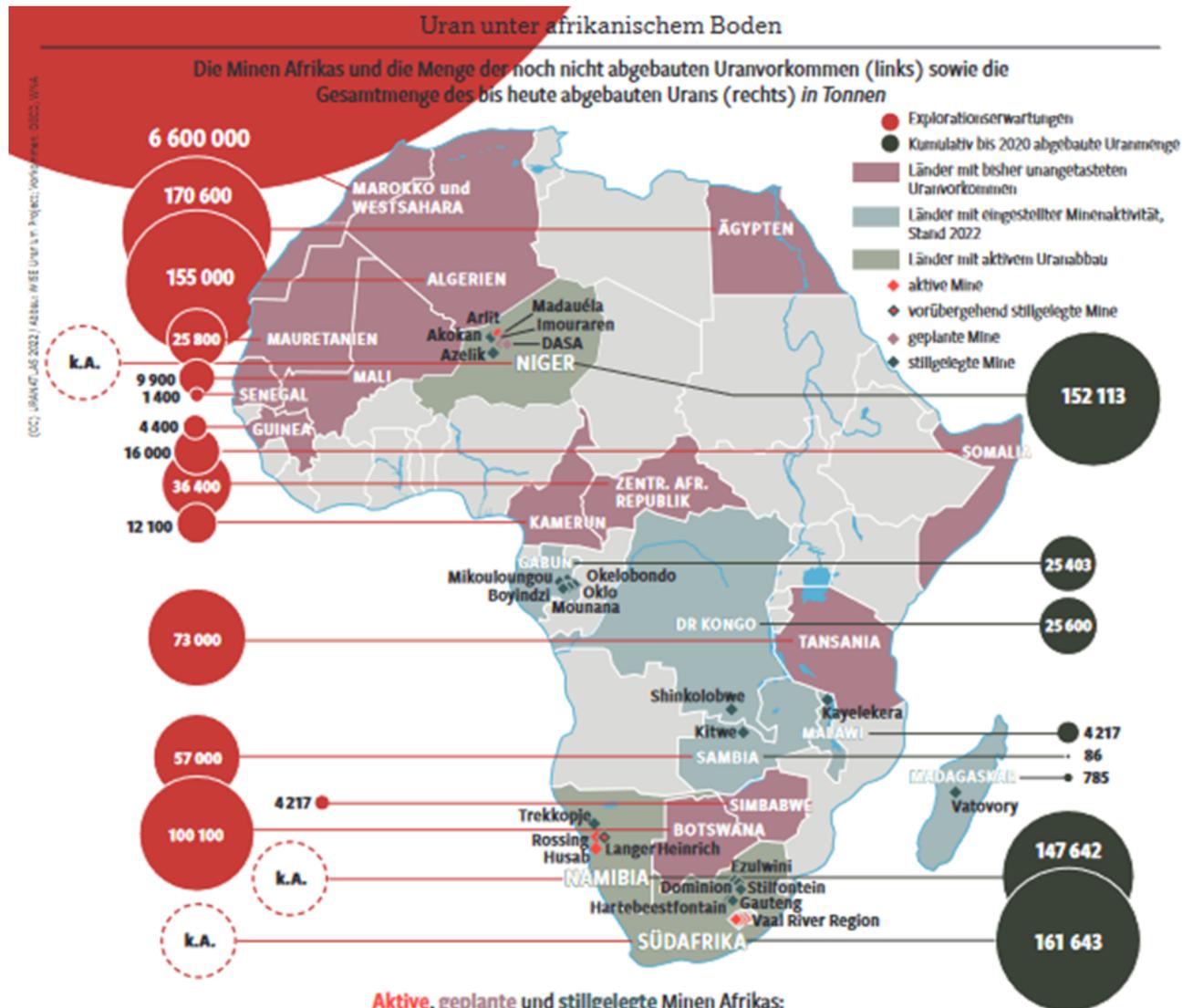
Ein 1000-MWe-Reaktor benötigt jedes Jahr etwa 27 Tonnen frischen, angereicherten Brennstoffs.“

2.1. Uranvorkommen und -abbau

Der Uranatlas aus dem Jahr 2022, ein Kooperationsprojekt der Nuclear Free Future Foundation, der Rosa-Luxemburg-Stiftung, der Umweltstiftung Greenpeace und des Bunds für Umwelt und Naturschutz Deutschland, verweist auf Grafiken zum weltweiten Uranvorkommen und -abbau.⁷ Weiterhin werden Quellen aufgelistet, die Informationen zu verschiedenen Themen entlang der Uranverwertungskette liefern. Es werden Uranvorkommen sowohl global thematisiert als auch vor dem Hintergrund spezifischer geopolitischer Fragestellung, beispielsweise spezifische Uranvorkommen in Afrika, Uranminen in Kanada vor dem Hintergrund dort lebender indigener Gruppen, die Gegenüberstellung stillgelegter und aktiver Minen in den USA, die Uranbergbausituation in den früheren Sowjetrepubliken, der Stellenwert Europas bei der weltweiten Förderung, Minen in Australien, Uranlieferwege, das Ranking der Länder hinsichtlich ihrer Uranproduktionsleistung sowie die Größe der Minen und die Darstellung der weltweiten Uran-Reserven. Es wird darauf hingewiesen, dass die Darstellungen unterschiedlichen frei verfügbaren Quellen

6 Kritikalität bezeichnet in der Kerntechnik sowohl die Neutronenbilanz einer kerntechnischen Anlage als auch den kritischen Zustand eines Kernreaktors oder einer Spaltstoffanordnung.
<https://www.chemie.de/lexikon/Kritikalit%C3%A4t.html>.

7 UranAtlas, 2022, Daten und Fakten über den Rohstoff des Atomzeitalters, Kooperationsprojekt der Nuclear Free Future Foundation, der Rosa-Luxemburg-Stiftung, der Umweltstiftung Greenpeace, dem Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland,
https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/atomkraft/Uranatlas_2022_2.pdf.



Aktive, geplante und stillgelegte Minen Afrikas: Wem sie gehören und wie viel Uran bisher aus ihnen geholt wurde

GABUN

- ◆ **Mounana:** 5 760 Tonnen, Tage- und Untertagebau, 1960-1999
- ◆ **Oklo:** 14649 Tonnen, Tage- und Untertagebau, 1970-1985
- ◆ **Okelobondo:** 3144 Tonnen, Untertagebau, 1988 geschlossen
- ◆ **Boyindzi:** 2471 Tonnen, Untertagebau, 1980-1991
- ◆ **Mikoulougou:** 85 Tonnen, Tagebau, 1997-1999

DR KONGO

- ◆ **Shinkolobwe:** 25 600 Tonnen, erste Uranmine der Welt. Tage- und Untertagebau seit ca. 1938, 1960 stillgelegt

MADAGASKAR

- ◆ **Vatovory:** 785 Tonnen, Tagebau, 1950er Jahre, franz. Atomministerium

MALAWI

- ◆ **Kayelekera:** Tagebau seit 2009, 4217 Tonnen. 85 % Paladin. 2014 stillgelegt

NAMIBIA

- ◆ **Rössing:** 73 012 Tonnen, Tagebau seit 1976, gehörte zu 68 % Rio Tinto, 2018 von CNNC übernommen
- ◆ **Husab (Rössing Süd):** Tagebau seit 2016, 11 062 Tonnen, 90 % Taurus Minerals Ltd (chin.)

- ◆ **Langer Heinrich:** Tagebau seit 2007, 16 810 Tonnen, 75 % Paladin, 25 % CNNC, 2018 vorübergehend stillgelegt
- ◆ **Trekkopje:** 437 Tonnen, 2011-2013. Ursprünglich 100 % Areva, 49 % an CGNPC (chin.) verkauft

NIGER

- ◆ **Arlit:** Tagebau seit 1971. 64 % im Besitz von Orano, 36 % Niger
- ◆ **Akokan (Akouta):** Untertage-Abbau seit 1974. 34 % hält Orano (frz.), 31 % Niger, 25 % OURD (jap.), 10 % ENUSA (span.). 2017 Produktionskürzung um 21 %. Akokan und Arlit: 152 113 Tonnen seit 1998

- ◆ **Azelik:** Tage- und Untertagebau 2007-2015. 615 Tonnen, 37 % CNNC, 33 % Niger, 25 % ZXJOY Invest, 5 % Korea Resources Corporation
- ◆ **DASA:** in Planung; Eigentümer: 90 % Global Atomic/Kanada, 10 % Niger

- ◆ **Imouraren:** in Planung; Eigentümer: 64 % Orano, 36 % Niger
- ◆ **Madaoula:** in Planung; Eigentümer: 80 % GomiEx/Kanada, 20 % Niger

SAMBIA

- ◆ **Kitwe:** 86 Tonnen in 50er Jahren

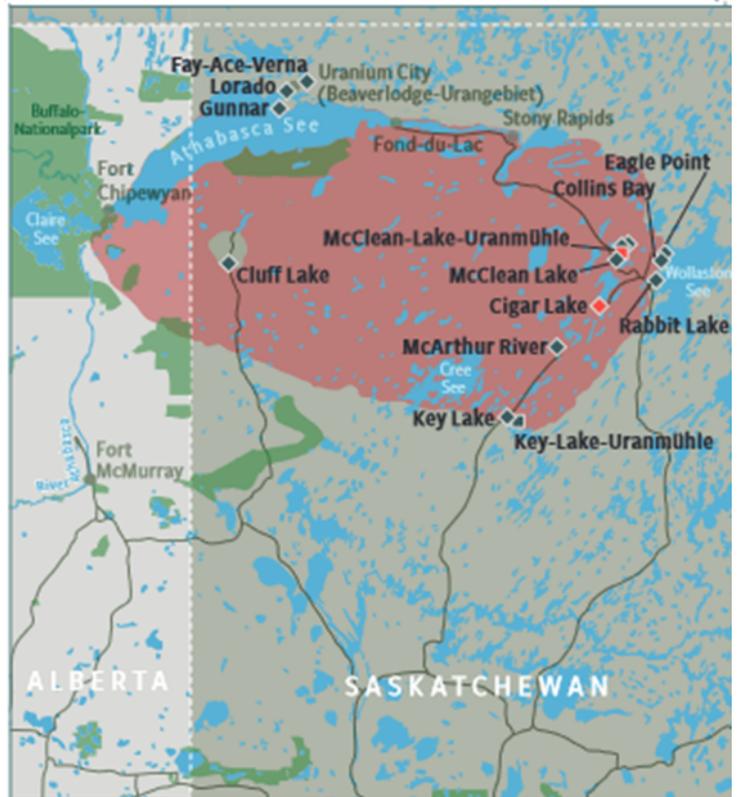
SÜDAFRIKA

- In Südafrika wird Uran als Nebenprodukt des Goldbergbaus gewonnen. Zuständig seit 1967: die Nuclear Fuels Corporation of South Africa, heute eine Tochter der Anglo Gold Ashanti
- Wichtige Miner:
- ◆ **Ezulwini** (früher Randfontein): 217 Tonnen, 2011-2017
 - ◆ **Vaal River Region (Kopanang, Moab Khotsoeng):** 3 817 Tonnen, 2011-2019
 - ◆ **Stilfontein** (k.A.)
 - ◆ **Dominion** (k.A.)
 - ◆ **Hartebeestfontain** (k.A.)
 - ◆ **Gauteng** (k.A.)

Kanadas Uraninteressen überlagern die Jagdgründe der Indigenen

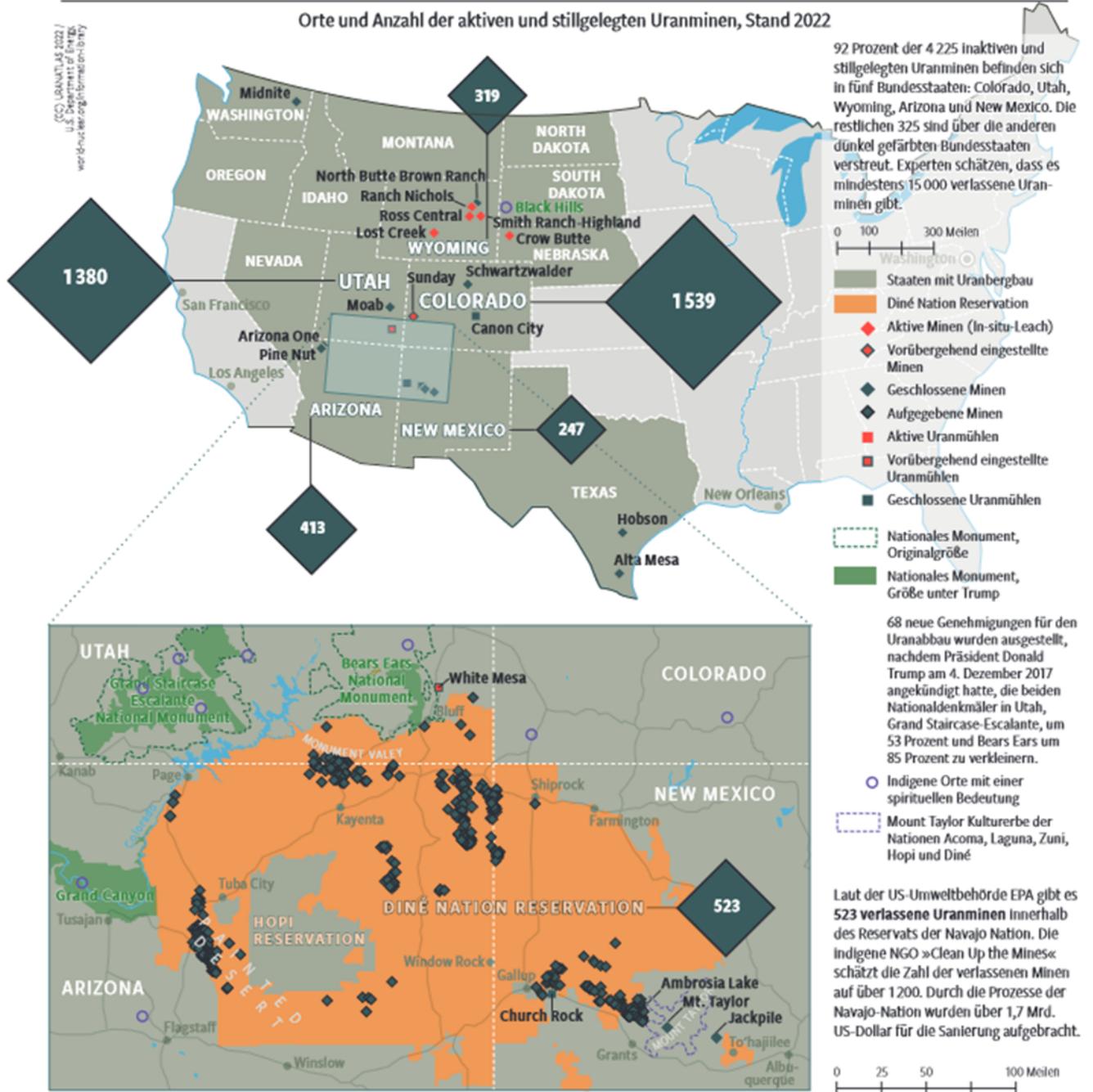
Die Uranminen und -mühlen Kanadas, Stand 2022

(CC) USANWT LAS 2022 / U.S. Department of Energy, world.nuclear.org/information/ibrev



Der Uranboom in den USA: Wo das Atomzeitalter begann

Orte und Anzahl der aktiven und stillgelegten Uranminen, Stand 2022



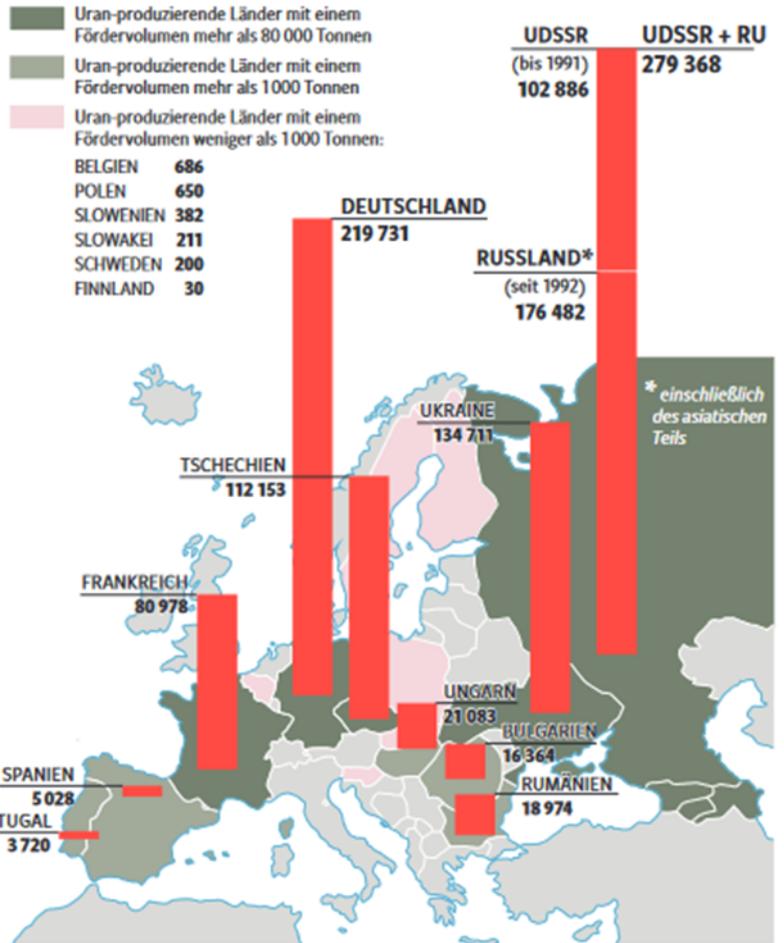
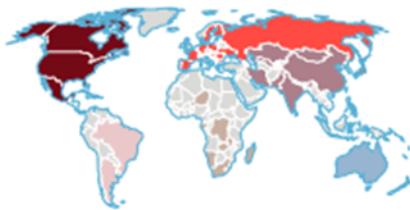
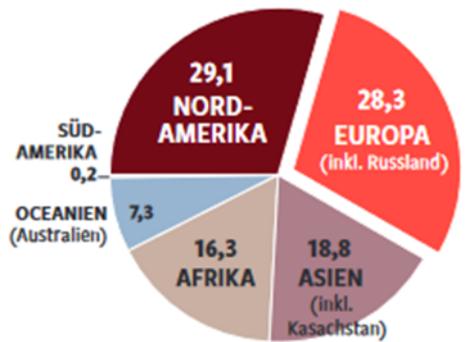
Die früheren Sowjetrepubliken als zentrale Uranlieferantinnen



Europas Anteil an der Uranförderung

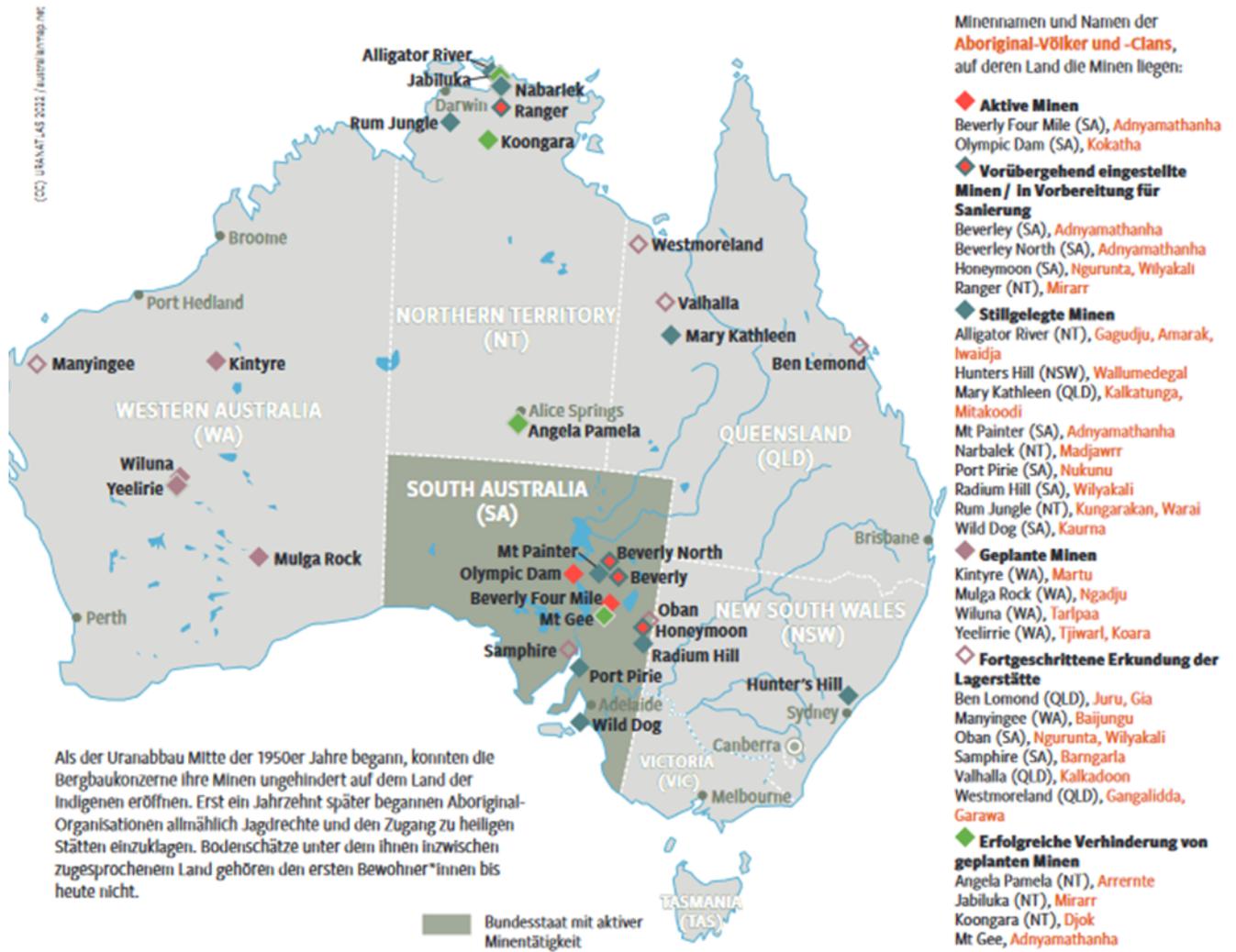
Kumulierter Uranabbau der einzelnen Länder *in Tonnen*

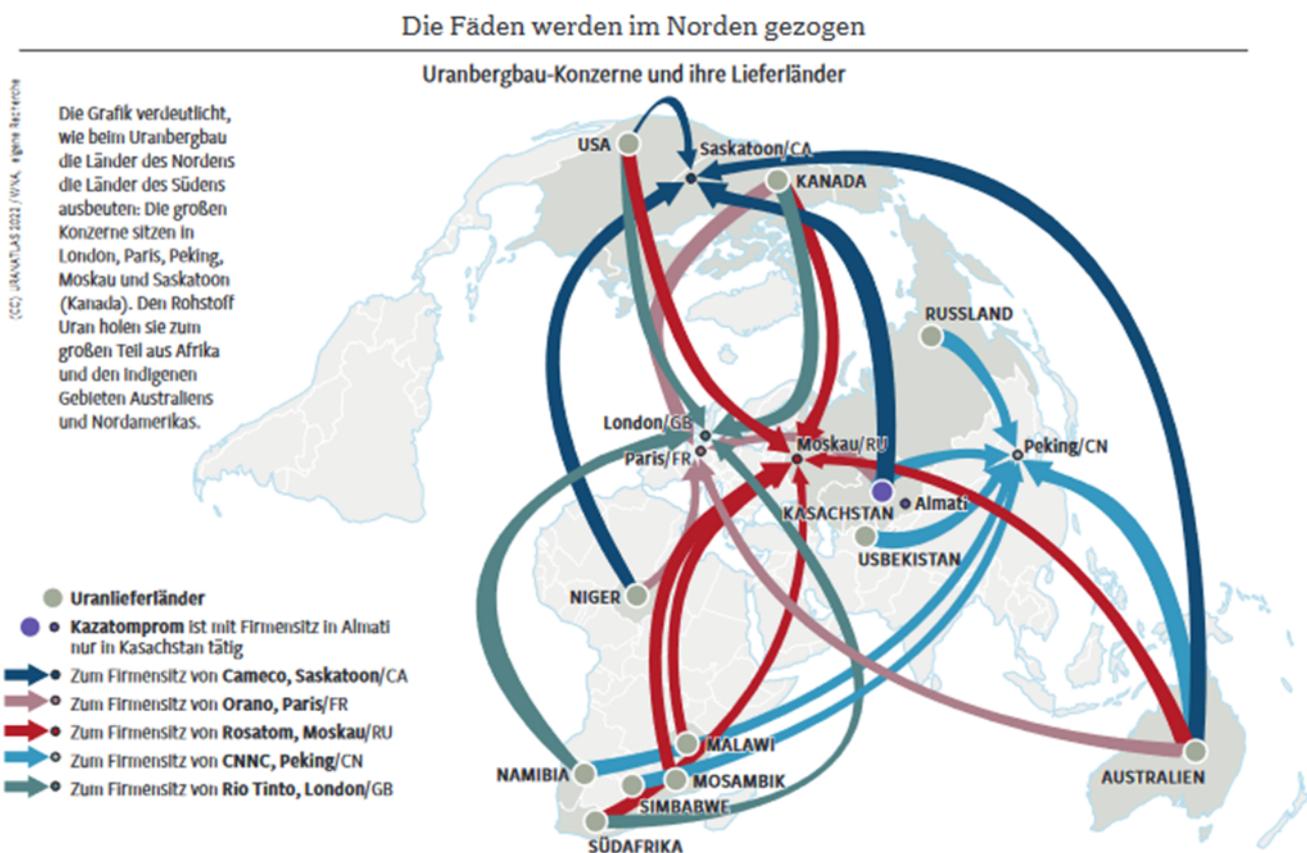
Anteil der Kontinente am Uranbergbau von 1945 bis heute *in Prozent*



Australisches Uran ist Aboriginal-Uran

Minentätigkeit in den fünf kontinentalen Bundesstaaten, Stand 2022





Technik + Einkauf verweist in seiner aktualisierten Onlineausgabe vom 8. September 2023 auf die folgenden Übersichten:⁸

8 Technik + Einkauf, 10. Jan. 2022 (aktualisiert am 08.09.2023), Kritische Rohstoffe/Uranhersteller 2022: Diese Unternehmen produzieren das meiste Uran, <https://www.technik-einkauf.de/rohstoffe/kritische-rohstoffe/diese-unternehmen-produzieren-das-meiste-uran-287.html>.

Länder mit der höchsten Uranproduktion

in Tonnen, Jahre 2020 bis 2022

	2020	2021	2022
Kasachstan	19.477	21.819	21.227
Kanada	3.885	4.693	7.351
Namibia	5.413	5.753	5.613
Australien	6.203	4.192	4.553
Usbekistan ¹	3.500	3.520	3.300
Russland	2.846	2.635	2.508
Niger	2.991	2.248	2.020
China ¹	1.885	1.600	1.700
Indien ¹	400	600	600
Südafrika ¹	250	192	200
Ukraine	744	455	100
USA	6	8	75
Pakistan ¹	45	45	45
Brasilien	15	29	43
Iran ¹	71	21	20

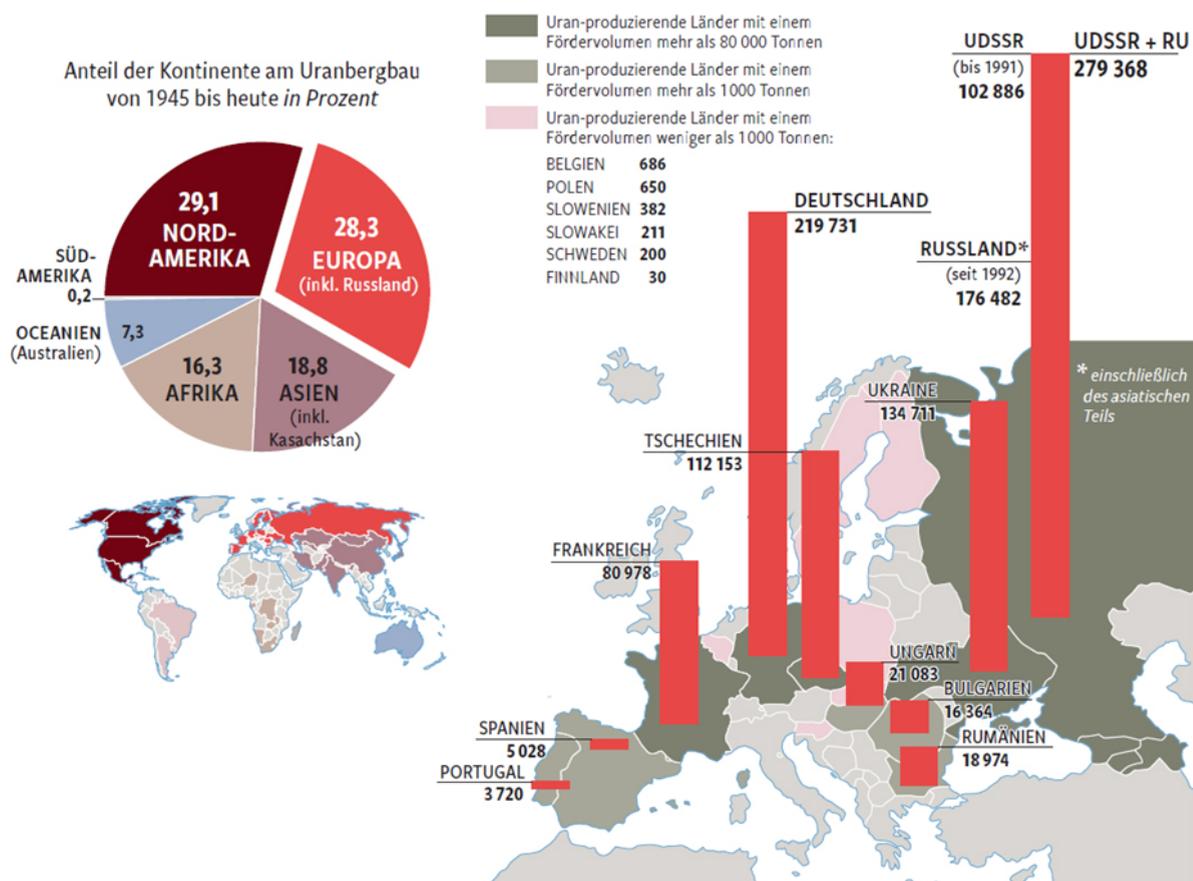
Tabelle: Dörte Neitzel / TECHNIK+EINKAUF • Quelle: World Nuclear Association • Erstellt mit Datawrapper

Die größten Uran-Minen weltweit 2022

In diesen Minen wird das meiste Uran gefördert.

Mine	Land	Betreiber	Typ	Produktion in Tonnen	Anteil an Weltproduktion
Cigar Lake		Cameco/Orano	Tiefbau	6.928	14%
Husab		Swakop Uranium (CGN)	Tagebau	3.358	7%
Inkai 1 bis 3		Kazatomprom/Cameco	ISL	3.201	7%
Olympic Dam		BHP Group	Tiefbau	2.813	6%
Karatau (Budenovskoye 2)		Kazatomprom/Uranium One	ISL	2.560	5%
Rössing		CNNC	Tagebau	2.255	5%
Somair		Orano	Tagebau	2.020	4%
Central Mynkuduk		Ortalyk	ISL	1.650	3%
South Inkai 4		Uranium One/Kazatomprom	ISL	1.600	3%
Kharasan 1		Kazatomprom/Uranium One	ISL	1.580	3%
Total Top 10				27.965	57%

Tabelle: Dörte Neitzel / TECHNIK+EINKAUF • Quelle: World Nuclear Association • Erstellt mit Datawrapper



Die größten Uranproduzenten 2020

1. KazAtomProm: 13.000 Tonnen
2. Orano: 4.453 Tonnen
3. Uranium One: 4.276 Tonnen
4. CGN: 3.671 Tonnen
5. Navoi: 3.500 Tonnen
6. CNNC: 3.333 Tonnen
7. BHP Billiton: 3.062 Tonnen
8. ARMZ: 2.846 Tonnen
9. General Atomic/Quasar: 1.806 Tonnen
10. b: 1.032 Tonnen

Quelle: World Nuclear Association

Die größten Uranlieferanten 2021

1. **Kazatomprom**: 11.858 Tonnen
2. **Orano**: 4.541 Tonnen
3. **Uranium One**: 4.514 Tonnen
4. **Cameco**: 4.397 Tonnen
5. **CGN**: 4.112 Tonnen
6. **CNNC**: 3.562 Tonnen
7. **Navoi**: 3.500 Tonnen
8. **ARMZ**: 2.635 Tonnen
9. **General Atomics/Quasar**: 2.241 Tonnen
10. **BHP Billiton**: 1.922 Tonnen
11. **Energy Asia**: 900 Tonnen
12. **Sopamin**: 809 Tonnen
13. **Vostgok**: 455 Tonnen

Quelle: World Nuclear Association

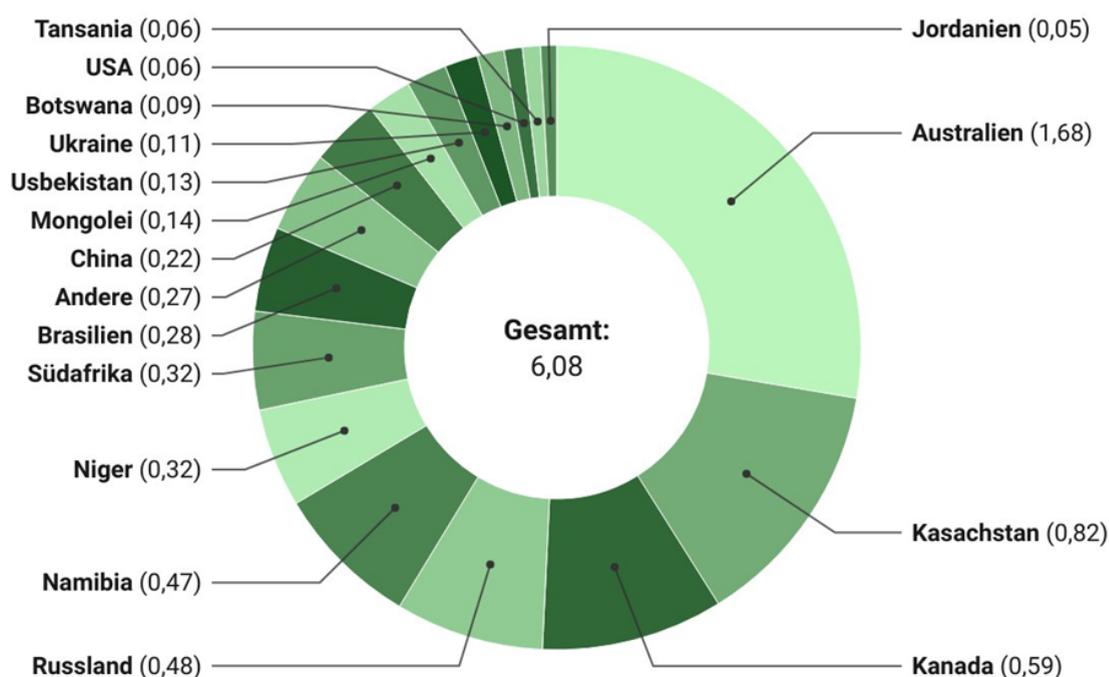
Die größten Uranproduzenten weltweit 2022

1. **Kazatomprom**: 11.373 Tonnen
2. **Cameco**: 5.675 Tonnen
3. **Orano**: 5.519 Tonnen
4. **CGN**: 4.627 Tonnen
5. **Uranium One**: 4.454 Tonnen
6. **Navoi**: 3.300 Tonnen
7. **CNNC**: 3.247 Tonnen
8. **BHP**: 2.813 Tonnen
9. **ARMZ**: 2.508 Tonnen
10. **General Atomics/Quasar**: 1.740 Tonnen

Quelle: World Nuclear Association

Weltweite Uran-Reserven

in Millionen Tonnen im Jahr 2021



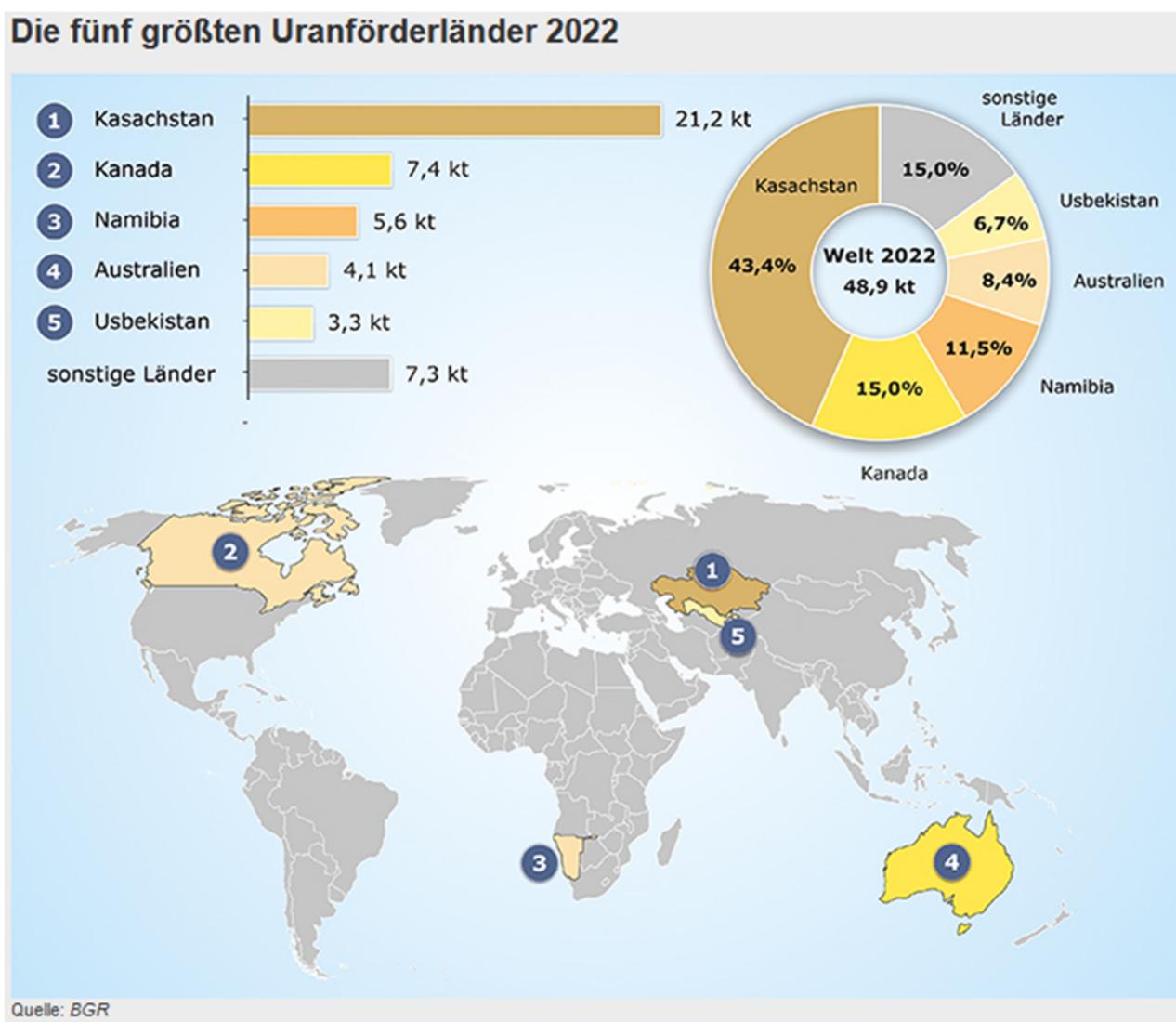
Grafik: Dörte Neitzel / TECHNIK+EINKAUF • Quelle: World Nuclear Association • Erstellt mit Datawrapper

Bei den Uranvorkommen muss immer zwischen „**erwarteten**“ Uranvorkommen (sh. S. 12, Marokko/Westafrika) und „**gesicherten**“ Uranvorkommen unterschieden werden.

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) führt zur weltweiten Uranförderung im Jahr 2022 wie folgt aus:⁹

„Rund 85 % der Weltförderung wurde von fünf Ländern erbracht, Kasachstan, Kanada, Namibia, Australien und Usbekistan. Größtes Förderland war mit über 21.200 t Uran erneut Kasachstan.“

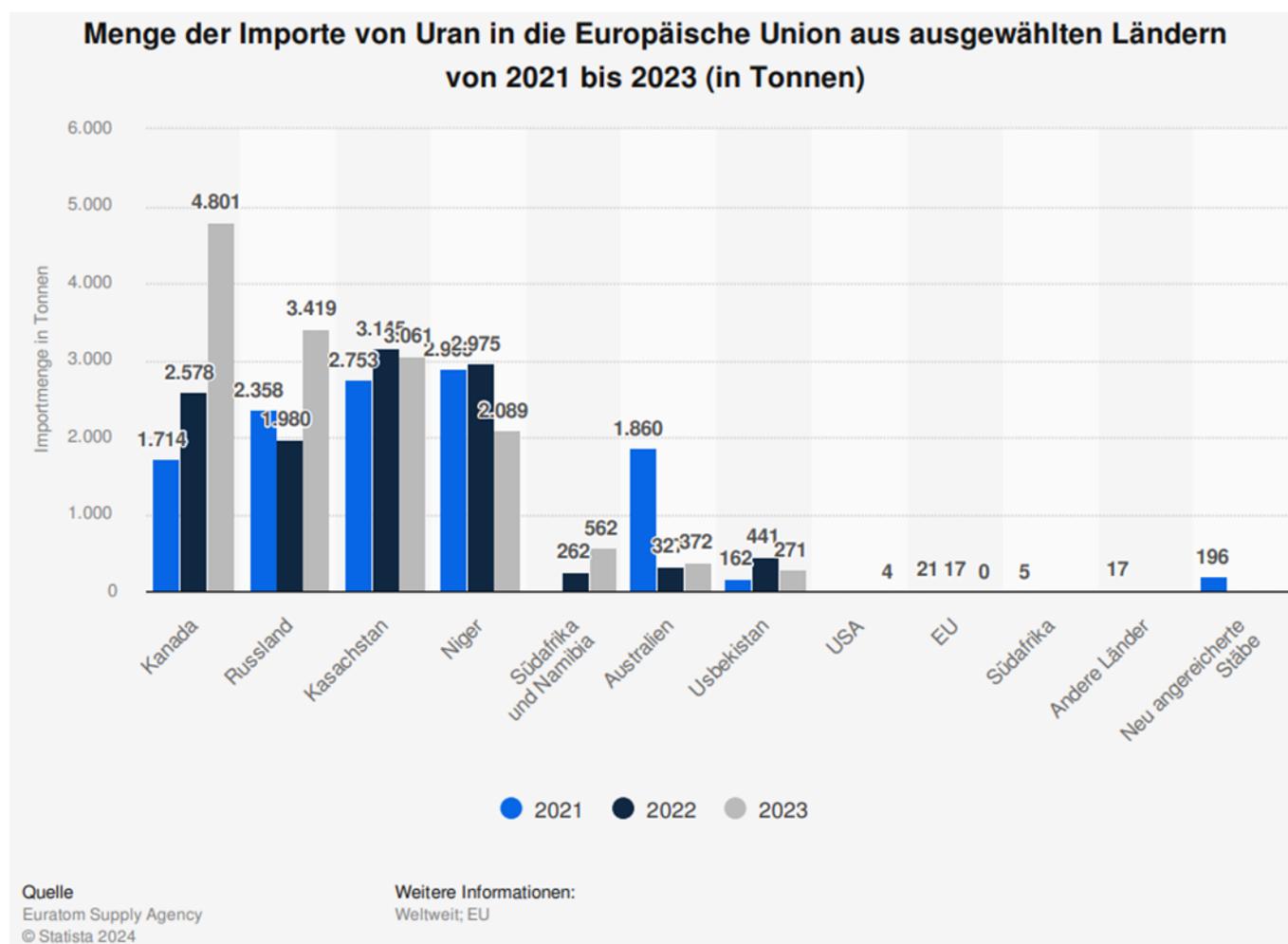
9 BGR, 2023, Kernbrennstoffe, https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Kernbrennstoffe/kernbrennstoffe_node.html.



In der Statista Datenbank werden Daten der Euratom Supply Agency zu Importen von Uran der EU in Grafiken verdeutlicht und bemerkt hierzu:¹⁰

„Im Jahr 2023 importierte die EU über 3.061 Tonnen an Uran aus Kasachstan und rund 2.089 Tonnen aus Niger.“

10 Euratom Supply Agency (13. August 2024), Menge der Importe von Uran in die Europäische Union aus ausgewählten Ländern von 2021 bis 2023 (in Tonnen) [Graph], in Statista Zugriff am 15. Oktober 2024, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1324521/umfrage/uranimport-in-die-eu-aus-ausgewaehlten-laendern/>.



2.2. Herstellung von Brennstäben und Brennelementen

Die World Nuclear Association verweist in einer Veröffentlichung auf die Herstellung der Brennstoffe (Brennstäbe und Brennelemente) wie folgt:¹¹

- „Die Herstellung von Brennstoffen ist der letzte Schritt bei der Umwandlung von Uran in Kernbrennstäbe.
- Die Brennstäbe, die in Baugruppen gestapelt sind, bilden den größten Teil der Struktur eines Reaktorkerns.

¹¹ World Nuclear Association, 2021, nuclear fuel cycle: Nuclear Fuel and its Fabrication, <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/fuel-fabrication>, übersetzt mit KI.

- Diese Umwandlung von einem fungiblen Material – Uran – zu High-Tech-Reaktorkomponenten unterscheidet sich konzeptionell von der Raffination und Aufbereitung fossiler Brennstoffe.
- Kernbrennelemente sind speziell für bestimmte Reaktortypen ausgelegt und werden nach hohen Standards hergestellt.
- Versorgungsunternehmen und Hersteller haben zusammengearbeitet, um die Leistung der Brennelemente erheblich zu verbessern, und ein internationales Programm für unfalltolerante Kraftstoffe ist im Gange.
- Während der gesamte derzeitige Brennstoff aus Oxid besteht, konzentriert sich Forschung und Entwicklung auf Metall, Nitrid und andere Formen. Der erste moderne Metallbrennstoff soll in kommerziellen Reaktoren erprobt werden.

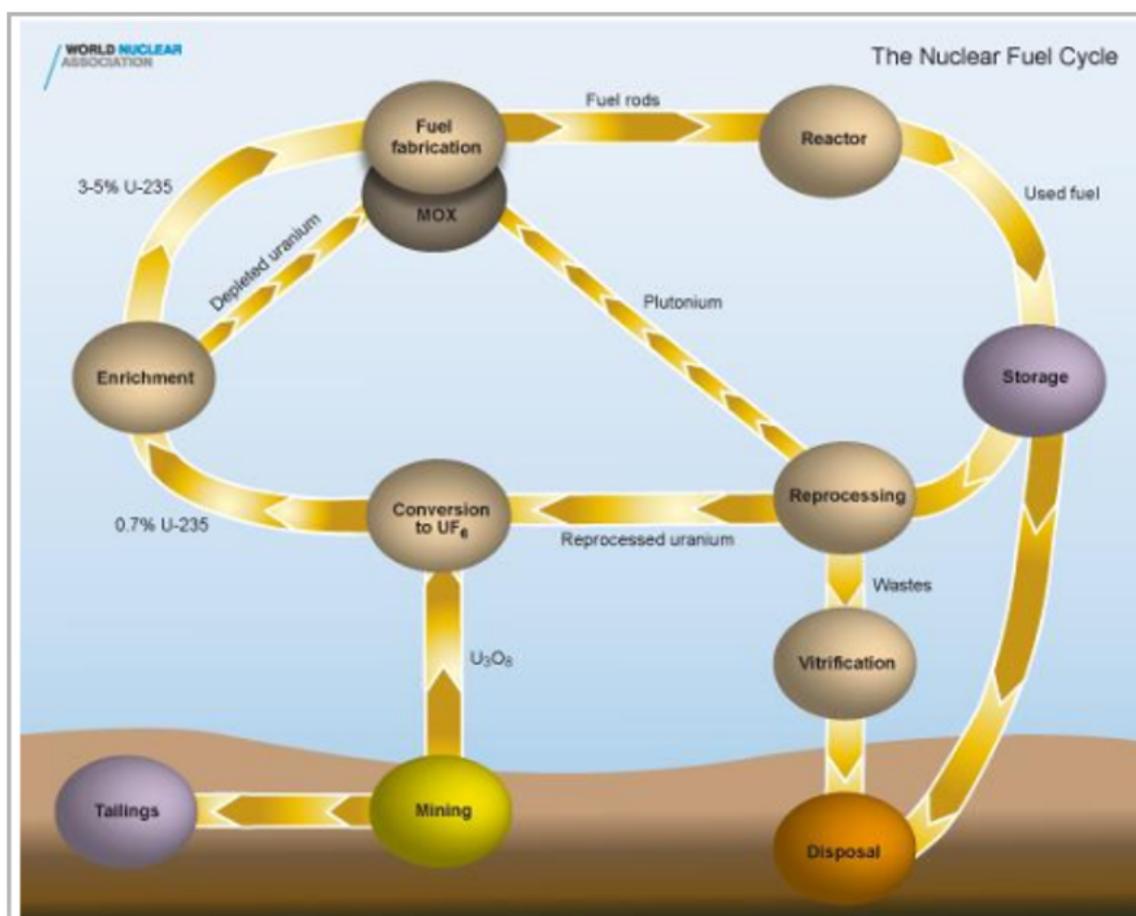
Kernreaktoren werden mit Brennstoff betrieben, der spaltbares Material enthält. Der Spaltprozess setzt große Mengen an nutzbarer Energie frei, und aus diesem Grund müssen die Spaltkomponenten – U-235 und/oder Pu-239 – in einer robusten physikalischen Form gehalten werden, die in der Lage ist, hohen Betriebstemperaturen und einer intensiven Umgebung mit Neutronenstrahlung standzuhalten. Brennstoffstrukturen müssen ihre Form und Integrität über einen Zeitraum von mehreren Jahren im Reaktorkern beibehalten, um das Austreten von Spaltprodukten in das Reaktorkühlmittel zu verhindern.

Die Standardbrennstoffform besteht aus einer Säule aus keramischen Pellets aus Uranoxid, die plattiert und in Rohre aus Zirkoniumlegierung eingeschweißt sind. Für den Brennstoff von **Leichtwasserreaktoren (LWR)** wird das Uran auf verschiedene Niveaus bis zu etwa 4,8 % U-235 angereichert. Der Brennstoff für unter Druck stehende **Schwerwasserreaktoren (PHWR)** besteht in der Regel aus unangereichertem Natururan (0,7 % U-235), obwohl auch leicht angereichertes Uran verwendet wird.

Die Leistung der Brennelemente hat sich seit den 1970er Jahren verbessert, so dass ein erhöhter Brennstoffverbrauch von 40 GWd/tU¹² auf mehr als 60 GWd/tU möglich ist. Dies korreliert mit einem erhöhten Anreicherungsgrad von etwa 3,25 % auf 5 % und der Verwendung fortschrittlicher brennbarer Absorberdesigns für DWR unter Verwendung von Gadolinium. Die Kernüberwachung, die detaillierte Echtzeitinformationen liefert, hat auch eine bessere Kraftstoffleistung ermöglicht.

Die Herstellung von Brennstoffstrukturen – Baugruppen oder Bündel genannt – ist die letzte Stufe des vorderen Endes des Kernkreislaufs, wie in unten folgender Abbildung 1 dargestellt, und macht weniger als 20 % der Endkosten des Brennstoffs aus. Der Prozess für die Herstellung von Uran-Plutonium-Mischoxid (MOX)-Brennstoffen ist im Wesentlichen derselbe – abgesehen von einigen spezifischen Merkmalen, die mit dem Umgang mit der Plutoniumkomponente verbunden sind.

Abbildung 1: Der geschlossene Kernbrennstoffkreislauf mit Darstellung des Flusses von Primär- und Recyclingmaterialien



Die Branche wird von vier Unternehmen dominiert, die die internationale Nachfrage nach Leichtwasserreaktoren bedienen: Framatome (ehemals Arteva/Frankreich), Global Nuclear Fuel (GNF/Japan), TVEL (Russland) und Westinghouse (USA). GNF ist hauptsächlich im Siedewasserreaktor-Geschäft (SWR) und TVEL im Druckwasserreaktor-Geschäft (DWR) tätig^[13].

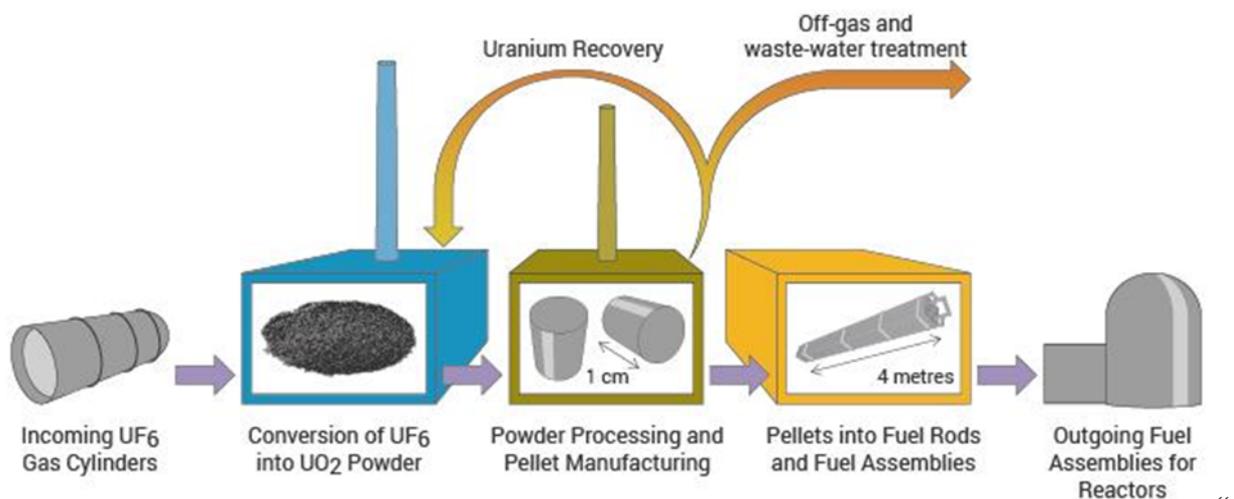
Es gibt drei Hauptphasen bei der Herstellung der Kernbrennstoffstrukturen, die in LWRs und PHWRs verwendet werden:

13 Ein Siedewasserreaktor (SWR) ist ein Leichtwasser-Kernreaktor. Ein Druckwasserreaktor (DWR), der ebenfalls in der Regel mit Leichtwasser betrieben wird, ist der gebräuchlichste Kernreakortyp (20 % der weltweiten nuklearen Energiegewinnung), European Nuclear Society (ENS), Nuclear power plants, world-wide, reactor types, <https://archive.ph/20150708181753/https://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/n/npp-reactor-types.htm#selection-163.0-163.47>.

1. Herstellung von reinem Urandioxid (UO_2) aus eingehendem Uran(VI)-Fluorid (UF_6) oder Uran(VI)-oxid (UO_3).
2. Herstellung von hochdichten, präzise geformten Keramik- UO_2 -Kügelchen.
3. Herstellung des starren Metallrahmens für die Brennelemente – hauptsächlich aus einer Zirkoniumlegierung – und Laden der Brennstoffpellets in die Brennstäbe, Abdichten und Zusammenfügen der Stäbe in die endgültige Brennelementstruktur.

Diese Schritte sind in Abbildung 2 dargestellt.

Abbildung 2: Der Prozess der Kraftstoffherstellung



2.2.1. Arten von Kernbrennelementen für verschiedene Reaktoren

Die World Nuclear Association führt zu Kernbrennelementen weiterhin aus:¹⁴

„Es gibt erhebliche Unterschiede zwischen den Brennelementen, die für die verschiedenen Reaktortypen ausgelegt sind. Dies bedeutet, dass die Versorgungsunternehmen nur eine begrenzte Auswahl an Anbietern von hergestellten Brennelementen, insbesondere für DWRs, haben.“

Sie unterscheidet dabei die folgenden Brennelementarten, die nachfolgend in tieferen technischen Details ausgeführt werden: DWR-Kraftstoff, SWR-Kraftstoff, PHWR (CANDU) Kraftstoff, AGR-Kraftstoff, RBMK-Kraftstoff, Schneller Brennstoff für Neutronenreaktoren.

¹⁴ <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/fuel-fabrication>, übersetzt mit KI.

- „DWR-Kraftstoff

Druckwasserreaktoren (DWRs) sind die **häufigste Art** von Kernreaktoren, die **zwei Drittel** der derzeit installierten nuklearen Erzeugungskapazität **weltweit** ausmachen. Ein DWR-Kern verwendet normales Wasser sowohl als Moderator als auch als primäres Kühlmittel – dieses wird unter erheblichem Druck (ca. 10 Megapascal [MPa]) gehalten, um ein Sieden zu verhindern, und seine Temperatur steigt auf etwa 330 °C, nachdem es den Brennstoff nach oben passiert hat. Anschließend gelangt es durch massive Rohre zu einem Dampferzeuger.

Der Brennstoff für westliche DWRs wird mit einer quadratischen Gitteranordnung gebaut, und die Baugruppen zeichnen sich durch die Anzahl der Stäbe aus, die sie enthalten, typischerweise 17×17 bei aktuellen Konstruktionen. Ein DWR-Brennelement ist zwischen vier und fünf Meter hoch, hat einen Durchmesser von etwa 20 cm und wiegt etwa eine halbe Tonne. Die Baugruppe hat freie Stangenpositionen – es bleibt Platz für das vertikale Einsetzen einer Steuerstange. Nicht jede Montageposition erfordert Brennstoff oder einen Steuerstab, und ein Raum kann als "Führungsfingerhut" bezeichnet werden, in den ein Neutronen-Quellenstab, ein spezielles Instrumentarium oder ein Testbrennstoffsegment platziert werden kann.

Ein DWR-Brennelement besteht aus einer unteren Düse, in der Stäbe durch das Gitter befestigt sind, und zum Abschluss der gesamten Baugruppe wird sie von einer oberen Düse gekrönt. Die unteren und oberen Düsen sind stark konstruiert, da sie einen Großteil der mechanischen Unterstützung für die Brennelementstruktur bieten. In der fertigen Baugruppe werden die meisten Stabkomponenten Brennstäbe sein, aber einige werden Führungshülsen sein, und ein oder mehrere werden wahrscheinlich für die Instrumentierung bestimmt sein. [...]

Ein 1100 MWe DWR-Kern kann 193 Brennelemente enthalten, die aus über 50.000 Brennstäben und etwa 18 Millionen Brennstoffpellets bestehen. Einmal geladen, verbleibt der Kraftstoff je nach Auslegung des Betriebszyklus mehrere Jahre im Kern. Während der Betankung wird alle 12 bis 18 Monate ein Teil des Brennstoffs - in der Regel ein Drittel oder ein Viertel des Kerns - zur Lagerung entnommen, während der Rest an einer Stelle im Kern angeordnet wird, die für den verbleibenden Anreicherungsgrad besser geeignet ist.

Russische DWR-Reaktoren sind in der Regel unter dem russischen Akronym WWER bekannt. Brennelemente für diese zeichnen sich durch ihre sechseckige Anordnung aus, sind aber ansonsten von ähnlicher Länge und Struktur wie andere DWR-Brennelemente. Das meiste wird von TVEL in Russland hergestellt, aber auch Westinghouse in Schweden stellt es her und erhöht die Kapazitäten dafür. TVEL regt die Verwendung von Erbium als brennbares Gift in Kraftstoffen an, die auf etwa 6,5 % angereichert sind, um die Intervalle zwischen den Tankvorgängen auf zwei Jahre zu verlängern.

- SWR-Kraftstoff

Siedewasserreaktoren (SWRs) sind der **zweithäufigste Kernreakortyp** und machen fast **ein Viertel** der installierten nuklearen Erzeugungskapazität aus. In einem Siedewasserreaktor wird Wasser im Reaktordruckbehälter am oberen Ende des Kerns direkt in Dampf umgewandelt und dieser Dampf (bei ca. 290 °C und 7 MPa) wird dann zum Antrieb einer Turbine verwendet.

In SWRs werden auch Brennstäbe verwendet, die aus zirkoniumummantelten Uranoxid-Keramik-Pellets bestehen. Ihre Anordnung zu Baugruppen basiert wiederum auf einem quadratischen Gitter mit Stiftgeometrien von 6x6 bis 10x10 oder 11x11. Die Lebensdauer des Brennstoffs und die Managementstrategie sind ähnlich wie bei einem DWR.

SWR-Brennstoff unterscheidet sich jedoch in bestimmter Hinsicht grundlegend von DWR-Brennstoffen: (i) Vier Brennelemente und eine kreuzförmige Steuerschaukel bilden ein "Brennstoffmodul", (ii) jede Baugruppe ist von ihren Nachbarn durch eine wassergefüllte Zone isoliert, in der sich die kreuzförmigen Steuerstabschaukeln bewegen (sie werden vom Boden des Reaktors aus eingesetzt), (iii) jedes BWR-Brennelement ist in einem Zirkoloy-Mantel oder Kanalkasten eingeschlossen, der den Kühlmittelfluss des Wassers durch die Baugruppe lenkt und während dieses Durchgangs den Siedepunkt erreicht, (iv) SWR-Baugruppen enthalten Wasserkanäle mit größerem Durchmesser – flexibel gestaltet, um eine angemessene Neutronenmoderation in der Baugruppe zu gewährleisten.

Die Zirkalrohre werden mit Wasser gefüllt, wodurch die Menge des Moderators^[15] im zentralen Bereich der Anordnung erhöht wird. In den Stäben werden unterschiedliche Anreicherungsstufen in unterschiedlichen Positionen verwendet – niedrigere Anreicherungen in den äußeren Stäben und höhere Anreicherungen in der Nähe der Mitte des Bündels. Ein SWR-Reaktor ist so ausgelegt, dass er mit 12-15 % des Wassers im oberen Teil des Kerns als Dampf betrieben wird und daher dort eine geringere moderierende Wirkung und damit einen geringeren Wirkungsgrad aufweist.

Bei vielen SWR-Modellen kann die Steuerung der Reaktivität zur Lastverfolgung durch Ändern der Zirkulationsrate im Kern erreicht werden. Strahlpumpen, die sich im Ringraum zwischen der Außenwand des Behälters und einer Innenwand, der sogenannten Abdeckung, befinden, erhöhen den Wasserfluss durch das Brennelement. Bei hohen Durchflussraten werden Dampfblasen schneller entfernt und somit die Mäßigung und Reaktivität erhöht. Wenn die Durchflussrate verringert wird, nimmt die Mäßigung ab, da die Dampfblasen länger vorhanden sind und daher die Reaktivität sinkt. Dies ermöglicht eine Abweichung von etwa 25 % von der maximalen Nennleistung, was eine leichtere Lastverfolgung als bei einem DWR ermöglicht.

Steuerstäbe werden verwendet, wenn die Leistung unter 75 % gesenkt wird, aber sie sind nicht Teil des Brennelements wie bei einem DWR. Sie werden von unten nach oben geschoben, so dass die Stäbe zuerst den unteren, reaktiveren Bereich der Brennelemente abfangen.

Die Herstellung von SWR-Kraftstoff erfolgt auf die gleiche Weise wie die von DWR-Kraftstoffen. [...]

SWR-Brennelemente arbeiten eher als einzelne Einheiten, und verschiedene Designs können in jeder Kernlast gemischt werden, was dem Versorgungsunternehmen mehr Flexibilität beim Brennstoffkauf bietet.

15 Ein Moderator (lat. moderare ‚mäßigen‘) dient dazu, freie Neutronen, die bei ihrer Freisetzung meist relativ energiereich (also schnell) sind, abzubremsen, [https://de.wikipedia.org/wiki/Moderator_\(Physik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Moderator_(Physik)).

Global Nuclear Fuels von GE entwickelt Brennstoffe mit neuem plattiertem Material – NSF – mit 1 % Niob, 1 % Zinn, 0,35 % Eisen (Nb, Sn, Fe), um die Verzerrung des Brennstoffkanals aufgrund chemischer Wechselwirkung mit Zirkoloid zu reduzieren oder zu eliminieren. Im Jahr 2013 wurde dieses Material in 8 % der Kerne verwendet. Toshiba und das Keramikunternehmen Ibiden in Japan entwickeln Siliziumkarbid-Hüllen oder Kanalkästen für SWR-Brennelemente.

Westinghouse plant, im Jahr 2019 Bleitestbaugruppen seines TRITON11 Kraftstoffs (11x11-Konfiguration) für SWRs zu produzieren. Dieser verfügt über ein zinnarmes Zirkonium-Kanalmaterial und eine neue Brennstoffummantelung. Darin heißt es, dass dieser Kraftstoff eine verbesserte Wirtschaftlichkeit, ein robustes mechanisches Design und ein leistungsstarkes Material aufweist. Er wurde sowohl für den Kurz- als auch für den Langzeitbetrieb sowie für leistungsgesteigerte Kerne und höhere Abbrandzeiten optimiert.

- PHWR (CANDU) Kraftstoff

Unter Druck stehende Schwerwasserreaktoren (PHWRs) sind ursprünglich ein kanadisches Design (auch "CANDU" genannt), das ~6 % der weltweit installierten nuklearen Erzeugungskapazität ausmacht ^[16]. PHWRs verwenden Druckrohre, in denen schweres Wasser den Kraftstoff moderiert und kühlt. Sie werden mit natürlichem (nicht angereichertem) oder leicht angereichertem Uranoxid-Brennstoff in keramischer Pelletform betrieben, der mit einer Zirkoniumlegierung ummantelt ist.

PHWR-Brennstäbe sind ca. 50 cm lang und werden zu "Bündeln" mit einem Durchmesser von ca. 10 cm zusammengefügt. Ein Brennstoffbündel besteht aus 28, 37 oder 43 Brennelementen, die in mehreren Ringen um eine Mittelachse angeordnet sind. Aufgrund ihrer geringen Länge benötigen sie nicht die Stützstrukturen, die für andere Reaktorbrennstofftypen charakteristisch sind. PHWR-Brennstoff erreicht weder einen hohen Abbrand, noch verbleibt er sehr lange im Reaktorkern, so dass die Brennstoffpellets während ihrer Lebensdauer nur sehr wenig aufquellen. Das bedeutet, dass PHWR-Brennstäbe weder einen Spalt zur Pelletummantelung aufrechterhalten noch mit einem Füllgas stark unter Druck gesetzt werden müssen (wie bei LWR-Brennstoffen), sondern dass die Metallummantelung auf das Brennstoffpellet kollabieren kann, wodurch ein guter thermischer Kontakt gewährleistet wird.

Die Brennstoffbündel werden in horizontale Kanäle oder Druckrohre geladen, die die gesamte Länge des Reaktorbehälters (die sogenannte Calandria) durchdringen, und dies kann bei vollem Betrieb des Reaktors erfolgen. Je nach Modell werden etwa zwölf Bündel in jeden Brennstoffkanal geladen – ein 790-MWe-CANDU-Reaktor enthält 480 Brennstoffkanäle, die aus 5.760 Brennstoffbündeln mit über 5 Millionen Brennstoffpellets bestehen.

16 Prinzipiell ist ein Schwerwasserreaktor sowohl als Druckwasserreaktor als auch als Siedewasserreaktor denkbar, jedoch **arbeiten Stand 2022 alle kommerziellen Leistungsreaktoren, welche mit schwerem Wasser operieren, nach dem Druckwasserreaktor-Prinzip**. Deswegen wird häufig die Bezeichnung „PHWR“ pars pro toto für Schwerwasserreaktoren verwendet – das P steht hierbei für „pressurized“ also „Druck(wasser)“. Der am weitesten verbreitete Typ Schwerwasserreaktor ist der kanadische CANDU, auf welchem auch der indische IPHWR („Indian Pressurized Heavy Water Reactor“) und dessen Weiterentwicklungen basieren, <https://de.wikipedia.org/wiki/Schwerwasserreaktor>.

Die Betankung unter Last ist ein vollautomatischer Prozess: An einem Ende wird neuer Kraftstoff in einen Kanal eingebracht und am anderen Ende wird verbrauchter Kraftstoff aufgefangen. Diese Eigenschaft bedeutet, dass **der PHWR von Natur aus flexibel mit seinen Brennstoffanforderungen ist und mit verschiedenen Brennstoffen betrieben werden kann**, die unterschiedliche Verweilzeiten erfordern, z. B. Natururan, leicht angereichertes Uran, plutoniumhaltige Brennstoffe und Brennstoffe auf Thoriumbasis.

- AGR-Kraftstoff

Der moderne gasgekühlte Reaktor (advanced gas-cooled reactor, AGR) ist ein in Großbritannien entwickelter Kernreaktor der zweiten Generation, der nur in Großbritannien eingesetzt wird. AGRs machen etwa 2,7 % der gesamten weltweiten Kernkraftwerkskapazität aus. Sie verwenden ein vertikales Kraftstoffkanaldesign und verwenden CO₂ Gas – ein sehr schwacher Moderator – als primäres Kühlmittel.

AGR-Brennelemente bestehen aus einer kreisförmigen Anordnung von 36 edelstahlkaschiereten Brennstiften, die jeweils 20 angereicherte UO₂-Brennstoffpellets enthalten. Das Aggregat wiegt etwa 43 Kilogramm. Die Anreicherungsgrade variieren bis zu etwa 3,5 %. Edelstahl ermöglicht höhere Betriebstemperaturen, opfert aber einen Teil der Neutronenökonomie. Die Baugruppe ist mit einem Graphitmantel bedeckt, der als Moderator dient. Acht Baugruppen sind Ende an Ende in einem Brennstoffkanal gestapelt und durch die Oberseite des Reaktors nach unten eingeführt. Beim Betanken wird dieser gesamte Strang ausgetauscht. Die Lebensdauer des Kraftstoffs beträgt etwa fünf Jahre, und die Betankung kann unter Last über eine Betankungsmaschine erfolgen.

- RBMK-Kraftstoff

Der RBMK-Reaktor ist eine frühe sowjetische Konstruktion, die aus Reaktoren zur Plutoniumproduktion entwickelt wurde. Elf Blöcke sind in Betrieb (3 % der weltweiten Gesamtmenge), wobei die Steuerungssysteme und der Oxidbrennstoff seit 1990 stark modifiziert wurden. Es werden vertikale Druckrohre (knapp 1700 davon mit einer Länge von jeweils etwa 7 Metern) verwendet, die durch einen großen Graphitmoderator geführt werden. Gekühlt wird der Kraftstoff mit leichtem Wasser, das im Primärkreislauf wie in einem SWR kochen gelassen wird.

RBMK-Brennstäbe sind etwa 3,65 Meter lang, und ein Satz von 18 bildet ein Brennstoffbündel mit einem Durchmesser von etwa 8 cm. Zwei Bündel werden miteinander verbunden und an beiden Enden durch eine obere und eine untere Düse verschlossen, um ein Brennelement mit einer Gesamtlänge von etwa 10 Metern und einem Gewicht von 185 Kilogramm zu bilden. Seit 1990 hat RBMK-Brennstoff einen höheren Anreicherungsgrad, der von etwa 2 % auf durchschnittlich 2,8 % gestiegen ist (je nach Brennelement variiert von 2,5 % bis 3,2 %) und enthält jetzt etwa 0,6 % Erbium (ein brennbarer Absorber). Dies hat zur Folge, dass die Sicherheit insgesamt verbessert und der Kraftstoffverbrauch erhöht wird. Dieser neue Brennstoff kann bis zu sechs Jahre im Reaktor verbleiben, bevor er entfernt werden muss. Alle RBMK-Reaktoren verwenden nun recyceltes Uran aus WWER-Reaktoren.

Wie bei anderen Druckrohrkonstruktionen wie dem PHWR ist der RBMK-Reaktor in der Lage, unter Last betankt zu werden.

- Schneller Brennstoff für Neutronenreaktoren

Heute gibt es nur einen kommerziell betriebenen schnellen Reaktor (FNR) – den BN-600 in Belojarsk in Russland. Es befinden sich zwei FNRs im Bau – ein 800-MWe-Block in Russland und ein 500-MWe-Block in Indien (wo voraussichtlich fünf weitere gebaut werden). In China waren zwei BN-800-Blöcke geplant.

Schnelle Neutronenreaktoren (FNR) sind unmoderiert und verwenden schnelle Neutronen, um eine Spaltung zu verursachen. Daher verwenden sie meist Plutonium als Grundbrennstoff oder manchmal hochangereichertes Uran, um sie zu starten (sie benötigen etwa 20-30 % spaltbare Kerne im Brennstoff). Plutonium wird während des Betriebs aus U-238 gezüchtet. Wenn der FNR so konfiguriert ist, dass er ein Umwandlungsverhältnis von mehr als 1 hat (d. h. es werden mehr spaltbare als gespaltene Kerne gebildet), wie ursprünglich geplant, wird er als Fast Breeder Reactor (FBR) bezeichnet. FNRs verwenden flüssige Metallkühlmittel wie Natrium und arbeiten bei höheren Temperaturen. (Siehe auch Informationspapier zum schnellen Neutronenreaktor)

Neben dem Hauptbrennstoff FNR gibt es zahlreiche schwere Nuklide - insbesondere U-238, aber auch Am, Np und Cm, die im schnellen Neutronenspektrum spaltbar sind -, verglichen mit der geringen Anzahl von spaltbaren Nukliden in einem langsamen (thermischen) Neutronenfeld (nur U-235, Pu-239 und U-233). Ein FNR-Kraftstoff kann daher ein Gemisch aus transuranen Elementen enthalten. Es kann auch in einer von mehreren chemischen Formen vorliegen, darunter Standardoxidkeramik, Mischoxidkeramik (MOX), Einzel- oder Mischnitridkeramik, Hartmetalle und metallische Brennstoffe. Darüber hinaus kann FNR-Brennstoff in Pelletform oder unter Verwendung der "Vibro-Pack"-Methode hergestellt werden, bei der sortierte Pulver direkt in das Hüllrohr geladen und komprimiert werden. Karbidbrennstoffe, wie sie in Indien verwendet werden, haben eine höhere Wärmeleitfähigkeit als Oxidbrennstoffe und können Brutverhältnisse erreichen, die größer sind als die von Oxidbrennstoffen, aber geringer sind als die von Metallbrennstoffen.

Der Kern eines FNR ist viel kleiner als ein herkömmlicher Reaktor, und die Kerne sind in der Regel mit unterschiedlichen "Seed"- und "Blanket"-Bereichen ausgelegt, je nachdem, ob der Reaktor als "Brenner" oder als "Brüter" betrieben werden soll. In jedem Fall ist die Brennstoffzusammensetzung für die Samen- und Blanket-Region unterschiedlich – die zentrale Samen-Region verwendet Brennstoff mit einem hohen Spaltgehalt (und damit einer hohen Leistung und Neutronenemission), und die Blanket-Region hat einen niedrigen Spaltungsgehalt, aber einen hohen Anteil an neutronenabsorbierendem Material, das fruchtbar sein kann (für ein Zuchtdesign, B. U-238) oder ein Abfallabsorber, der umgewandelt werden soll.

BN-600-Brennelemente sind 3,5 m lang, 96 mm breit, wiegen 103 kg und bestehen aus oberen und unteren Düsen (zur Führung des Kühlmittelflusses) und einem zentralen Brennstoffbündel. Das zentrale Bündel ist ein sechseckiges Rohr und enthält für den Samenbrennstoff 127 Stäbe mit einer Länge von je 2,4 m und einem Durchmesser von 7 mm mit Keramikpellets in drei Urananreicherungsstufen; 17 %, 21 % und 26 %. Blanket-Brennbündel bestehen aus 37 Stäben, die angereichertes Uran enthalten. BN-600 Brennstäbe sind mit einer quellarmen Edelstahlverkleidung versehen.

FNRs verwenden flüssige Metallkühlmittel wie Natrium oder ein eutektisches Blei-Wismut-Gemisch, die höhere Betriebstemperaturen von etwa 550 °C ermöglichen und somit einen höheren Wirkungsgrad bei der Energieumwandlung aufweisen. Sie sind in der Lage, einen hohen Kraftstoffverbrauch zu erzielen.“

2.2.2. Angebot und Nachfrage in der Brennstoffherstellung

Die World Nuclear Association stellt die Nachfrage nach Brennstoffherstellungsdienstleistungen dem Bedarf an Uran gegenüber:¹⁷

„Die derzeitige jährliche Nachfrage nach LWR-Brennstoffherstellungsdienstleistungen drückt sich in einem Bedarf von etwa 7.000 Tonnen angereichertem Uran aus, das zu Baugruppen verarbeitet wird, und es wird erwartet, dass dieser Bedarf bis 2020 auf etwa 9.500 Tonnen ansteigen wird. Der Bedarf an PHWRs beträgt zusätzlich 3.000 t/Jahr und der Markt für gasgekühlte Reaktoren rund 400 t/Jahr.

Der Bedarf an Dienstleistungen in der Brennstoffherstellung wird in etwa mit dem Wachstum der nuklearen Erzeugungskapazität steigen. Die Fertigungsanforderungen werden jedoch auch durch Änderungen in den Reaktorbetriebs- und Brennstoffmanagementstrategien der Versorgungsunternehmen beeinflusst, die zum Teil auf technische Verbesserungen bei der Brennstoffherstellung selbst zurückzuführen sind. So haben beispielsweise die Abbrandmengen bei LWR-Ableitungen stetig zugenommen, da Verbesserungen im Brennstoffdesign dies ermöglichen haben, was tendenziell zu einer Verringerung des Fertigungsbedarfs geführt hat, da der Brennstoff über einen längeren Zeitraum im Reaktor verbleibt (obwohl es eine Grenze gibt, wie weit Abbrände verschoben werden können, ohne die für die Kritikalitätssicherheitsmargen in Brennstoffherstellungsanlagen geltende Anreicherungsgrenze von 5 % zu erreichen). Ein paralleler branchenweiter Fokus auf die Steigerung der Kraftstoffleistung und -zuverlässigkeit hat auch die Nachfrage nach Kraftstoff zum Austausch defekter Baugruppen verringert.

Die Pläne, viele neue Reaktoren zu bauen, wirken sich auf zweierlei Weise auf die Nachfrage nach Fertigungskapazitäten aus. Der Bedarf an Nachladungen steigt mit der neu installierten Reaktorkapazität, typischerweise 16 bis 20 Tonnen pro Jahr und GW. Zusätzlich erzeugen die ersten Kerne einen temporären Spitzenbedarf, da die benötigte Menge etwa drei- bis viermal so hoch ist wie die eines Reload-Batches in den derzeit betriebenen LWRs (und ein Teil der Anreicherung geringer ist). Eine durchschnittliche Anreicherung des ersten Kerns beträgt etwa 2,8 %.“

2.2.3. Bereitstellung von Brennstoffherstellung weltweit

Die World Nuclear Association führt hierzu aus:¹⁸

17 World Nuclear Association, 2021, nuclear fuel cycle: Nuclear Fuel and its Fabrication, <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/fuel-fabrication>, übersetzt mit KI.

18 Ebd.

„Dienstleistungen zur Herstellung von Brennstoffen werden nicht auf die gleiche Weise beschafft wie beispielsweise die Urananreicherung. Kernbrennelemente sind hochtechnisierte Produkte, die nach den individuellen Spezifikationen jedes Kunden hergestellt werden. Diese werden durch die physikalischen Eigenschaften des Reaktors, durch den Reaktorbetrieb und die Strategie für das Management des Brennstoffkreislaufs des Versorgungsunternehmens sowie durch nationale oder sogar regionale Genehmigungsanforderungen bestimmt.

Die meisten der Hauptbrennstoffhersteller sind auch Reaktorverkäufer (oder in deren Besitz), und sie liefern in der Regel die ersten Kerne und frühen Nachladungen für Reaktoren, die nach ihren eigenen Entwürfen gebaut werden. Der Markt für LWR-Kraftstoff ist jedoch zunehmend wettbewerbsintensiver geworden, und für die meisten Kraftstoffarten gibt es inzwischen mehrere konkurrierende Anbieter – am bemerkenswertesten ist vielleicht der russische Hersteller TVEL, der um die Herstellung von westlichem DWR-Kraftstoff konkurriert, und westliche Kraftstoffhersteller können WWER-Kraftstoff herstellen. Anfang 2016 stammten 41 % des ukrainischen WWER-Brennstoffs aus Westinghouse in Schweden. Im Mai 2016 vereinbarte Global Nuclear Fuel – Americas mit TVEL die Produktion seines TVS-K-Brennstoffdesigns in den USA für Westinghouse DWRs. TVEL plant auch, den Brennstoff in Europa zu vermarkten, und hat Bleibaugruppen bei Ringhals in Schweden qualifiziert.

Derzeit übersteigt die Brennstoffherstellungskapazität für alle Arten von LWR-Brennstoffen auf der ganzen Welt die Nachfrage erheblich. Es liegt auf der Hand, dass die Brennstoffherstellung nicht zu einem Engpass in der absehbaren Lieferkette für eine Renaissance der Kernenergie werden wird. Die Überkapazitäten werden durch Länder wie China, Indien und Südkorea verstärkt, die eine Selbstversorgung anstreben.

Im Mai 2014 wurde in einem Mitarbeiterbericht der Europäischen Kommission vorgeschlagen, dass als Investitionsbedingung für alle in der EU gebauten Nicht-EU-Reaktoren mehr als eine Brennstoffquelle vorhanden sein sollte. In der Europäischen Strategie für Energieversorgungssicherheit vom Mai 2014 forderte die Europäische Kommission: "Im Idealfall sollte auch eine Diversifizierung der Herstellung von Brennelementen stattfinden, aber dies würde aufgrund der unterschiedlichen Reaktordesigns einige technologische Anstrengungen erfordern." Im Juni 2015 wurden Westinghouse und acht europäischen Partnern im Rahmen des Euratom-Programms für Forschung und Ausbildung 2 Mio. EUR zur Verfügung gestellt, um "die Versorgungssicherheit mit Kernbrennstoff für Reaktoren russischer Bauart in der EU zu gewährleisten", insbesondere für WWER-440-Typen. Das Konzeptdesign wurde im Mai 2017 abgeschlossen, basierend auf dem Treibstoff, den Westinghouse in den Jahren 2001-07 an Loviisa geliefert hatte.

Die **weltweite Produktionskapazität von LWR-Brennstoffen** ist in nachfolgender Tabelle 1 dargestellt. Die Rückumwandlungskapazitäten sind besonders ungleich verteilt. Für einige Verarbeiter stellt es einen Engpass dar. Einige Verarbeiter verfügen nicht über Umwandlungsmöglichkeiten und müssen solche Dienstleistungen auf dem Markt einkaufen, während andere mit Überkapazitäten sogar Verkäufer von UO₂-Pulver sind.

Tabelle 1: Weltweite Produktionskapazität von LWR-Brennstoffen, Tonnen/Jahr

	Hersteller	Ort	Umwandlung	Pelletierung	Stange/Montage
Brazilien	INB	Resende	160	120	400
China	CJNF Jianzhong	Yibin	800	800	800
	CBNF	Baotou	0	0	400
	CNNFC (englisch)	Baotou	200	200	200
Frankreich	Framatome-FBFC	Römer	1800	1400	1400
	Orano	Malvési	Unter konst.		
Deutschland	Framatome-ANF	Lingen	800	650	650
Indien	DAE Nuclear Fuel Complex	Hyderabad	48	48	48
Japan	NFI (DWR)	Kumatori	0	383	284
	NFI (BWR)	Tokai-Mura	0	250	250
	Mitsubishi Kernbrennstoff	Tokai-Mura	450	440	440
	Globaler Kernbrennstoff – Japan	Kurihama	0	620	630
Kasachstan	Ulba	Ust Kamerogorsk	0	108	200
Korea	KNFC	Daejeon	700	700	700
Russland	TVEL-MSZ*	Elektrostal	1500	1500	1560
	TVEL-NCCP	Nowosibirsk	450	1200	1200
Spanien	ENUSA	Juzbado	0	500	500
Schweden	Westinghouse AB	Västerås	787	600	600
Vereinigtes Königreich	Westinghouse**	Springfelder	950	600	860
USA	Framatome Inc	Richland	1200	1200	1200
	Globaler Kernbrennstoff – Nord- und Südamerika	Wilmington	1200	1000	1000
	Westinghouse	Columbia	1600	1594	2154
Gesamt			12,645	13,913	15,476

* Enthält ca. 220 tHM für RBMK-Reaktoren

** Enthält ca. 200 tHM für AGR-Reaktoren

Quelle: World Nuclear Association Nuclear Fuel Report 2021, Tabelle 8.2

NB Die oben genannten Zahlen liegen etwa 40 % über den Betriebskapazitäten, die den Bedarf decken.

Tabelle 2: Weltweite PHWR-Brennstoffherstellungskapazität, Tonnen/Jahr

	Hersteller	Ort	Stange/Montage
Argentinien	KONNUAR	Córdoba & Eizeiza	160
Kanada	Cameco	Port Hope	1500
	GNF-Kanada	ToronPeterborough	1500
China	CNNFC (englisch)	Baotou	246
Indien	DAE Nuclear Fuel Complex	Hyderabad	1000
Pakistan	PAEC	Chashma	20
Korea	KEPCO	Dejeon	800
Rumänien	SNN	Pitesti	250
Gesamt			5476

Quelle: Nuclear Fuel Report 2021 der World Nuclear Association, Tabelle 8.3, von der IAEA

Die LWR-Brennstoffherstellungsindustrie hat sich in den letzten Jahren rationalisiert, darunter:

- Als Westinghouse Electric von Toshiba gekauft wurde, erwarb Kazatomprom einen Anteil von 10 % an diesem Unternehmen (das anschließend an Toshiba verkauft wurde).
- Global Nuclear Fuels wurde als Joint Venture zwischen General Electric, Toshiba und Hitachi gegründet, obwohl Toshiba seinen Anteil von 14 % im Jahr 2018 an Hitachi verkaufte und seinen Anteil auf 40 % erhöhte. Es gibt zwei "Niederlassungen", GNF-A (Amerika) und GNF-J (Japan) mit unterschiedlichen Eigentümerstrukturen. Es ist vor allem für BWR-Kraftstoff bekannt.
- Toshiba erwarb 52 % der Anteile an Nuclear Fuel Industries (NFI) in Japan und erklärte sich dann bereit, den Restbetrag von Sumitomo (24 %) und Furukawa (24 %) zu kaufen, um das Unternehmen in hundertprozentiges Eigentum zu überführen.
- Mitsubishi Heavy Industries und AREVA (30 %) beteiligten sich an Mitsubishi Nuclear Fuel und gründeten ein Joint Venture für die Herstellung von Kraftstoffen in den USA.
- Kazatomprom und AREVA haben den Bau einer Brennstofffabrik mit einer Kapazität von 1200 Tonnen pro Jahr in Kasachstan vereinbart.*

* Kazatomprom hat angekündigt, bis 2030 bis zu einem Drittel des weltweiten Marktes für die Herstellung von Kraftstoffen zu beliefern, wobei China ein früher Großkunde sein wird.“

2.2.4. Sekundärversorgung aus dem Recycling

Die World Nuclear Association bemerkt zum Recycling:¹⁹

„Derzeit werden bei MSZ in Elektrostal, Russland, etwa 100 t/Jahr an wiederaufbereitetem Uran (RepU) produziert (Kapazität 250 t/Jahr) für AREVA-Verträge. Eine Produktionslinie im AREVA-Werk in Romans, Frankreich, ist für die Herstellung von 150 t RepU pro Jahr zu Brennstoff lizenziert. DWR-Baugruppen dieses Typs wurden bereits an französische, belgische und britische Reaktoren geliefert, und eine Menge RepU-Pulver wurde von Russland nach Japan geschickt. Begrenzte RepU- und angereicherte RepU-Kapazitäten (ERU) gibt es auch anderswo.

Derzeit wird fast der gesamte kommerzielle MOX-Brennstoff (Gemisch aus Uranoxid und Plutoniumoxid) im MELOX-Werk von AREVA in Marcoule (Frankreich) hergestellt. Mit einer Kapazität von 195 Tonnen/Jahr und einer guten Produktionsrate trägt diese Anlage nicht nur dazu bei, Uran- und Anreicherungsbedarf zu sparen, sondern auch LWR-Fertigungskapazitäten auf dem Markt freizusetzen.

Die britische MOX-Anlage Sellafield hatte eine geplante Kapazität von 120 t/Jahr, wurde aber auf 40 t/Jahr herabgestuft und erreichte nie dieses Niveau an zuverlässiger Produktion, bevor sie 2011 geschlossen wurde. Die russische MOX-Anlage für schnelle Reaktoren in Schelesnogorsk wurde 2015 in Betrieb genommen. Die japanische MOX-Anlage Rokkasho-Mura soll bis 2022 in Betrieb gehen, und die US-amerikanische MOX-Anlage in Savannah River sollte MOX-Brennstoff aus Waffenplutonium produzieren, aber dieses Projekt wurde nun beendet.

Der Markt für MOX-Kraftstoffe hat sich in letzter Zeit mit der Einstellung der Verwendung in Belgien, Deutschland und der Schweiz (Moratorium) etwas abgeschwächt, und die anhaltende Beladung mit MOX-Kraftstoff in Japan ist nach dem Unfall von Fukushima zurückgegangen.“

19 World Nuclear Association, 2021, nuclear fuel cycle: Nuclear Fuel and its Fabrication, <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/fuel-fabrication>, übersetzt mit KI.

Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

Tabelle 3: Weltweite Produktionskapazität für MOX-Brennstoffe, Tonnen/Jahr

	Hersteller	Ort	Pelletierung	Stange/Montage
Frankreich	Orano	Marcoule	195	195
Indien	DAE Nuclear Fuel Complex	Tarapur	50	50
Japan	JAEA	Tokai-Mura	5	5
	JNFL	Rokkasho-Mura*	130	130
Russland	MCC	Schelesnogorsk	60	60
Gesamt			440	440

* Betriebsbereit bis 2022

Quelle: World Nuclear Association Nuclear Fuel Report 2019, Tabelle 8.7, aktualisiert

3. Marktwirtschaftliche Entwicklung

Hinsichtlich marktwirtschaftlicher Entwicklungen werden exemplarisch nachfolgend einige Medienberichte zu Fragen des Urankreislaufs dargestellt:

Le Monde diplomatique veranschaulicht in einem im Jahr 2022 erschienenen Artikel die marktwirtschaftlichen Rahmenbedingungen des Urankreislaufs wie folgt:²⁰

„Lange Zeit schien es, als sei die zivile Nutzung der Atomenergie gegen geopolitische Spannungen immun. Zumindest behaupteten dies ihre Befürworter seit den 1950er Jahren. Bereits zwei Jahrzehnte vor dem Ölpreisschock von 1973 wurde in den Verhandlungen zum Vertrag zur Gründung der Europäischen Atomgemeinschaft (Euratom) als ein Ziel genannt, „die übermäßige Abhängigkeit der mächtigen Industrieländer von instabilen Regionen zu verringern“.

Diese Sichtweise beruht zunächst auf der Annahme, der **Uranmarkt** unterscheide sich von anderen Rohstoffen und berge nur ‚geringe geopolitische Risiken‘, wie Valérie Faudon erklärt, Generalsekretärin der Société française d'énergie nucléaire (SFEN), der Dachorganisation der französischen Atomindustrie. So sei beim Uran, das in 52 Ländern vorkommt, die geografische Konzentration geringer als bei den fossilen Brennstoffen.

Zudem werde Uran auch in stabilen Staaten wie Kanada, Australien und Südafrika gefördert, was die Risiken ausgleiche, wie sie etwa in Niger bestehen, dem viertgrößten Produzenten der Welt, der in einer instabilen Region liegt. Da das Uran nur etwa 5 Prozent des

20 Le Monde diplomatique, 09.06.2022, Geopolitik der Brennstäbe: Auch Atomenergie schafft Abhängigkeiten, <https://monde-diplomatique.de/artikel/!5857605>.

Endpreises von Atomstrom ausmacht, seien die Folgen eines möglichen Rohstoffpreisanstiegs ohnehin begrenzt.

Inzwischen scheinen diese Überlegungen allerdings überholt. Seit Mitte der Nuller-Jahre häufen sich die Anzeichen, die auf eine „Geopolitisierung“ des zivilen Nuklearsektors hindeuten. Der wichtigste Einschnitt war dabei zweifellos das Jahr 2007, als der russische Präsident Wladimir Putin die Atomindustrie seines Landes in einem einzigen Unternehmen, Rosatom, bündelte, um den Weltmarkt zurückzuerobern.

Tatsächlich wird die zivile Atomenergie weltweit inzwischen von einem chinesisch-russischen Duopol beherrscht. Die Strategie des Kremls ist aufgegangen: Durch die Kontrolle von 10 Prozent des Uranbergbaus, 36 Prozent der Urananreicherung, 22 Prozent der Brennstoffherstellung und 36 Reaktorbauprojekten im Ausland beherrscht Rosatom de facto den Weltmarkt. Dank seiner vertikalen Integration und seiner engen Kontakte zu den russischen Botschaften und Handelskammern gehört der Konzern zu den ersten Anlaufstellen für Länder, die einen eigenen Nuklearsektor aufbauen wollen.

Die chinesische Regierung wiederum gliederte die Branche in drei Unternehmen: die China National Nuclear Corporation (CNNC), die China General Nuclear Power (CGN) und die State Power Investment Corporation (SPIC). Jedes dieser Unternehmen dient als Plattform für unterschiedliche Technologien. Obwohl die Regierung eine Kooperation wünscht, stehen die drei in der Praxis in Konkurrenz zueinander. CNNC scheint dabei die Oberhand gewonnen zu haben, seit der Konzern ein Komplettangebot nach dem Vorbild von Rosatom zusammengestellt hat.

Doch Aufträge sind rar. Bisher hat nur Pakistan, ein historischer Verbündeter Chinas, CNNC sechs Reaktoren abgekauft, wobei der erste im Juni 2000 und der letzte im März 2022 in Betrieb ging. Versuche, in Großbritannien und Rumänien Fuß zu fassen, blieben erfolglos, nachdem sich die amerikanisch-chinesischen Beziehungen unter Präsident Donald Trump abgekühlt hatten. Dasselbe gilt für Südostasien und Subsahara-Afrika, wo im russisch-chinesischen Wettstreit Moskau die Nase vorn hat. So gewann Rosatom etwa 2008 den Auftrag für den Bau des AKWs Ruppur in Bangladesch.

Und die USA? Zwischen 1964 und 1974 stammten noch acht von zehn weltweit exportierten Reaktoren entweder direkt von einem US-Unternehmen – wie in Belgien, Brasilien, China, Indien, Mexiko, Schweden, der Schweiz, Spanien, Südkorea oder Taiwan – oder von lokalen Unternehmen, die eine Lizenz von einem US-Hersteller erworben hatten – wie in Frankreich, Deutschland, Japan oder Italien.“ [...]

Focus online berichtet in einem im Jahr 2023 erschienenen Beitrag zur Preisentwicklung:²¹

21 Focus online, 19.11.2023, 125 Prozent Plus in drei Jahren: Russland, Niger, Kernkraft: Warum die Uran-Preise seit Jahren explodieren, https://www.focus.de/finanzen/boerse/125-prozent-plus-in-drei-jahren-russland-niger-kernkraft-warum-die-uran-preise-seit-jahren-explodieren_id_237264064.html.

„Rund 100 Atomkraftwerke sind derzeit auf der Welt geplant oder bereits im Bau, die meisten davon in China, Russland und Indien. Atomkraft wird global nicht so schnell verschwinden wie in Deutschland. Die Internationale Energie-Agentur (IEA) geht davon aus, dass die nuklearen Kapazitäten bis 2050 sogar verdoppelt werden müssen, um eine CO₂-freie Stromerzeugung zu erreichen. Der Anteil von Kernkraft würde dabei aber stabil bei rund 8 Prozent bleiben.“

Für doppelt so viele Atomkraftwerke wird auch doppelt so viel Uran als Brennstoff benötigt. Dabei wird das Metall jetzt schon knapp. Seit Ende 2020 ist der Preis für Uran auf dem Weltmarkt um rund 125 Prozent gestiegen. Und das könnte erst der Anfang sein: Matthew Langsford, Investor beim australischen Unternehmen Terra Capital, rechnet mit 'dramatischen Aufwärtsbewegungen von 50 Prozent, 100 Prozent oder sogar noch mehr' in den kommenden Jahren, wie er gegenüber der Finanznachrichtenagentur Bloomberg sagt.

Dabei wird das Element zum Engpass des Kernkraft-Ausbaus. Das hat vor allem politische Gründe, denn zwei der größten Uran-Förderländer sind derzeit kaum erreichbar. Russland hatte 2021 einen Anteil von rund 5,5 Prozent an der weltweiten Uran-Förderung. Bisher ist der Handel damit nicht mit Sanktionen belegt. Die USA, Südkorea, Schweden, aber auch viele osteuropäische Länder beziehen das Uran für ihre Anlagen aus Russland. Pro Jahr kostet das rund 1,7 Milliarden Dollar. Auch wenn der Export bisher nicht sanktioniert ist, versuchen Länder aber, sich wie bei Öl und Gas neue Lieferquellen zu erschließen.

Frankreich wiederum bezog das meiste Uran bisher aus seiner ehemaligen Kolonie Niger in Afrika. Doch seit dort Anfang August [2023] das Militär die Macht übernahm, sind die Lieferungen nicht nur praktisch, sondern auch moralisch fragwürdig geworden. Weil das afrikanische Land, immerhin mit 4,7 Prozent Marktanteil einer der größten Uran-Exporteure der Welt, damit ebenfalls als Lieferant weitgehend ausfällt, sind die Preise zuletzt stark gestiegen.

Das Pfund Uran kostete zuletzt 65,50 Dollar, was der höchste Stand seit zwölf Jahren ist. Nur direkt nach der Katastrophe von Fukushima war das Metall zuletzt teurer. 2017 hatte es seinen Tiefststand bei rund 19 Dollar erreicht. In sechs Jahren kletterte der Preis also um rund 244 Prozent. Großer Nutznießer dieser Entwicklung ist Kasachstan. Das zentralasiatische Land hat mit 38 Prozent den größten Anteil an den uranium-fördernden Ländern und wird deswegen jetzt von den Importländern umgarnt. Aktuell ist Frankreichs Präsident Emmanuel Macron auf Staatsbesuch. Im Juli besuchte er bereits aus demselben Grund die Mongolei.

Der Preis für Roh-Uran ist dabei aber nur ein Flaschenhals auf dem Weg zum Kernkraftwerk. In den Brennstäben wird schließlich angereichertes Uran benutzt. Die Kapazitäten dafür sind aber in den vergangenen Jahren weltweit nicht ausgebaut worden. Stattdessen laufen die Raffinerien jetzt auf Hochtouren.

Die durch die beiden Probleme steigenden Preise sind ein Fest für Investoren. Die Hongkonger Bergbaufirma CGN Mining profitierte davon, indem ihr Aktienkurs dieses Jahr um 67 Prozent anstieg. Aktien anderer Wettbewerber wie NAC Kazatomprom aus Kasachstan und die Global Atomic Corporation aus Kanada verteuerten sich um rund 35 Prozent.

Von dieser Entwicklung können Sie auch als Kleinanleger profitieren. Zwar sind Investments in die Einzelaktien von Uran-abbauenden Unternehmen von Deutschland aus schwer, doch

es gibt ETFs, also passive Fonds, die den Markt abbilden. Der größte ist der HANetf Sprott Uranium Miners aus Irland. Er bildet die Aktien von 42 uran-fördernden Unternehmen ab, von denen die Hälfte aus Kanada stammt. Australien, Kasachstan und die USA nehmen die folgenden Plätze ein. In diesem Jahr stieg der ETF um 51 Prozent im Wert.“

Die Frankfurter Rundschau führt in einem Artikel vom 8. Oktober 2024 aus:²²

„Die Frage ist allerdings, wie realistisch die Renaissance-Pläne sind. AKW-Neubauten müssen in liberalisierten Strommärkten gegen Alternativen konkurrieren, die viel weniger kapitalintensiv sind und schneller gebaut werden können – vor allem die Erneuerbaren. Die Erfahrung mit neuen Reaktoren in Frankreich, Finnland und Großbritannien zeigen gewaltige Bauzeit- und Kostenüberschreitungen, ebenso die beiden Blöcke, die in den USA unlängst nach 15 Jahren Bauzeit ans Netz gingen. Die Reaktoren des AKW Vogtle im Bundesstaat Georgia kosteten 30 Milliarden Dollar, doppelt so viel wie geplant. In Großbritannien fiel der Beschluss zum Bau des neuen Doppel-Reaktors in Hinkley Point erst, nachdem die Regierung dem Betreiber eine Einspeisevergütung garantierte, die weit über Marktniveau liegt, und zusätzlich einen Inflationsausgleich. [...]

Der jüngst vorgelegte ‚World Nuclear Industry Status Report hebt hervor, dass die Zukunft der Atomkraft stark davon abhängt, wie sich die Kosten für die Ökostrom-Speicherung entwickeln. Batteriespeicher zum Beispiel haben sich stark verbilligt, und es werde erwartet, dass sie Grünstrom zum Beispiel in China bedarfsgerecht bereits 2025 billiger liefern können als neue Kohle- und Atomkraftwerke. ‚Die wettbewerbsfähigen Kosten ... könnten sich in den kommenden Jahren als entscheidender Faktor für die Energiepolitik erweisen‘, schreiben Schneider und die Co-Autoren. Auch laut der Internationalen Energieagentur (IEA) sollen Solar-plus-Speicher ab 2030 weltweit in allen Marktsegmenten konkurrenzfähig sein.“

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) bemerkt in einem 2023 erschienenen Beitrag zur weltweiten Nachfrage im Uranhandel im Zeitverlauf:²³

„Eine verringerte Nachfrage auf dem Uranmarkt seit 2011, verstärkt durch die Corona-Pandemie 2020/2021, führten zu einer marktbedingten Reduzierung der Gesamtproduktion von Uran. So fiel die Förderung von 2016 bis 2022 um rund 13.000 t Uran auf insgesamt rund 48.800 t (minus 21 %). In 2022 trug besonders die verstärkte Wiederaufnahme der Uranproduktion in Kanada (plus 2.600 t Uran) maßgeblich zur globalen Steigerung bei. [...]

Mit Stand Juni 2023 befanden sich 57 Kernkraftanlagen in 17 Ländern im Bau, darunter allein 21 in China. Asien ist für die Kernenergie eine der wachstumsstärksten Regionen der Welt. Insgesamt sind in Asien 121 Reaktoren in Betrieb und 38 im Bau. Dieser Trend wird sich in Zukunft voraussichtlich weiter verstärken. Auch in Europa setzen mehrere Länder auf

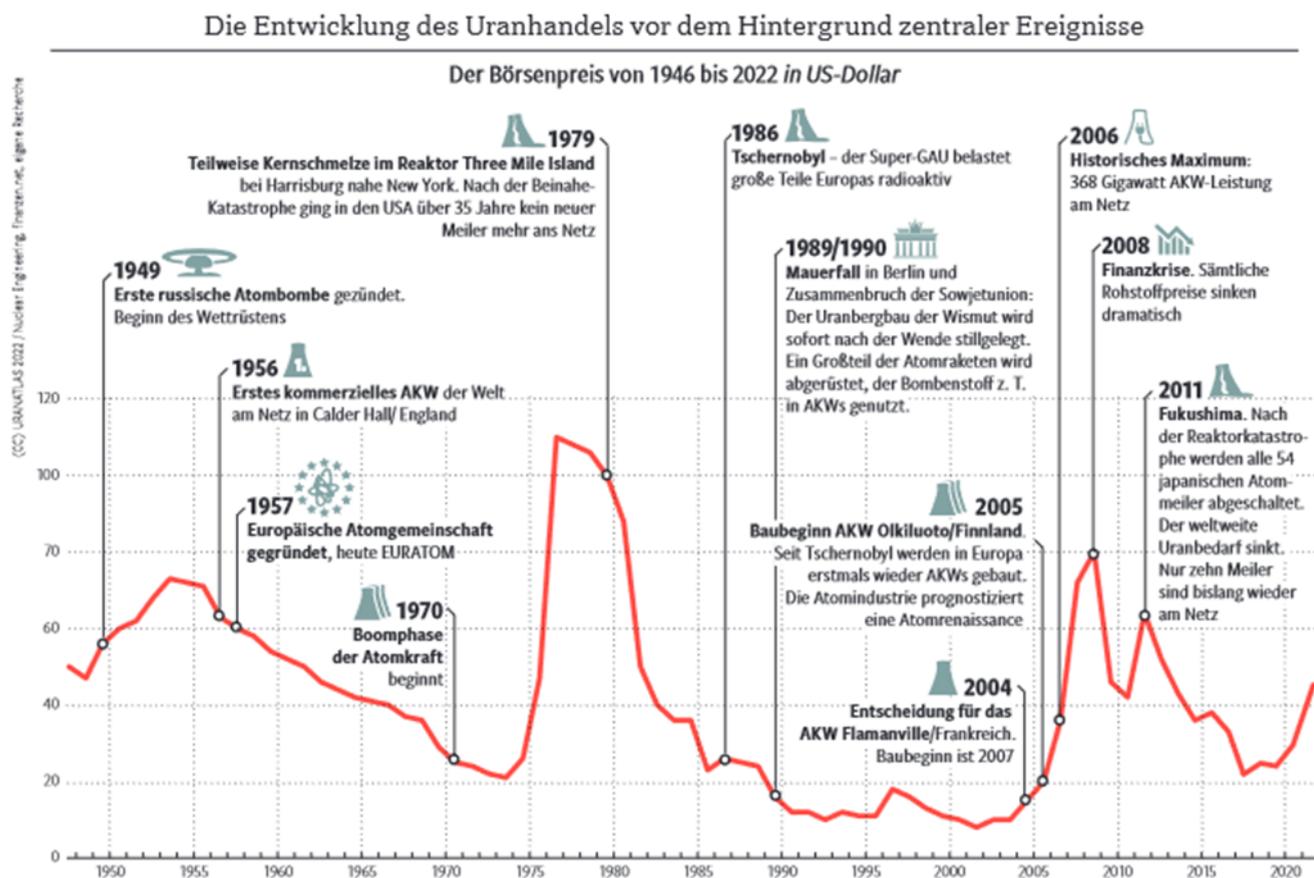
22 Frankfurter Rundschau, 08.10.2024, Atomkraft, ja bitte – oder doch lieber nicht? Das ist wirklich an der „Atom-Renaissance“ dran, <https://www.fr.de/wirtschaft/atomkraft-ja-bitte-oder-doch-lieber-nicht-das-ist-wirklich-an-der-atom-renaissance-dran-93342996.html>.

23 BGR, 2023, Kernbrennstoffe, https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Kernbrennstoffe/kernbrennstoffe_node.html.

Kernenergie als einen wichtigen Teil ihrer nationalen Energieversorgung, darunter auch Länder, die Kernenergie bisher nicht genutzt haben. Polen plant den Bau eines ersten Kernkraftwerkes bis 2033. In der Türkei soll 2024 der erste von vier im Bau befindlichen Reaktoren ans Netz gehen.

Aufgrund der derzeitigen Energiekrise in Europa rückt die Nutzung der Kernenergie auch bei einigen Ländern, die bereits Ausstiegsabsichten hatten, wieder in den Fokus. Länder wie Belgien, Niederlande oder Italien, die bereits einen Kernenergieausstieg beschlossen hatten, prüfen den Bau neuer Reaktoren oder verlängern die Laufzeiten bestehender Kernkraftwerke.“

Der Uranatlas aus dem Jahr 2022 zeigt die Entwicklung des Uranhandels vor dem Hintergrund zentraler Ereignisse auf:²⁴

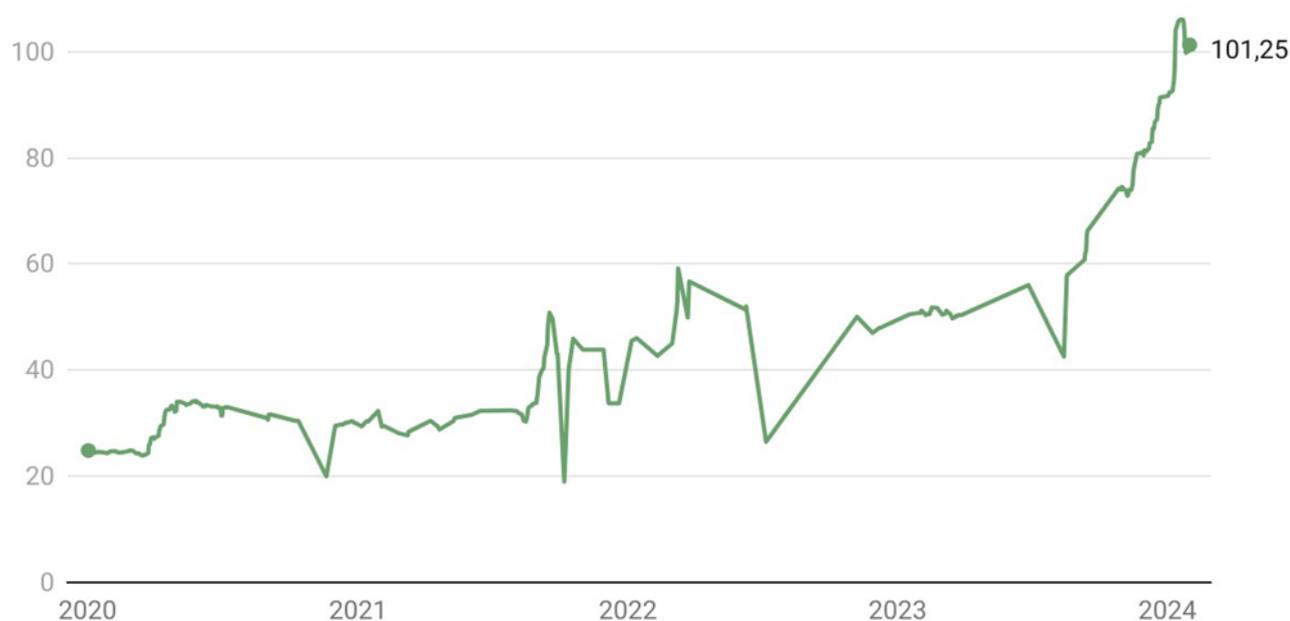


24 UranAtlas, 2022, Daten und Fakten über den Rohstoff des Atomzeitalters, Kooperationsprojekt der Nuclear Free Future Foundation, der Rosa-Luxemburg-Stiftung, der Umweltstiftung Greenpeace, dem Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/atomkraft/Uranatlas_2022_2.pdf.

Technik + Einkauf veranschaulicht in einer Grafik die weitere Preisentwicklung für Uran:²⁵

Uranpreis

in US-Dollar je Pfund U308 (als Indexzertifikat bzw. Indexfonds URAX) vom 1. Januar 2020 bis 31. Januar 2024



Grafik: Dörte Neitzel / TECHNIK+EINKAUF • Quelle: Finanzen.net • Erstellt mit Datawrapper

4. Beschaffung von Brennelementen deutscher AKW-Betreiber in der Vergangenheit

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) führt zu deutschen Kernkraftwerken wie folgt aus:²⁶

„Die Tätigkeit der BGR beinhaltet die Beratung der Bundesregierung im Bereich der geologischen Verfügbarkeit von Kernbrennstoffen als auch bei der Sanierung von Bergbaualtlasten. Die BGR stellt die Vertretung Deutschlands in der internationalen Urangruppe der Kernenergieagentur (Nuclear Energy Agency) der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit

25 Technik + Einkauf, 10. Jan. 2022 (aktualisiert am 08.09.2023), Kritische Rohstoffe/Uranhersteller 2022: Diese Unternehmen produzieren das meiste Uran, <https://www.technik-einkauf.de/rohstoffe/kritische-rohstoffe/diese-unternehmen-produzieren-das-meiste-uran-287.html>.

26 BGR, 2023, Kernbrennstoffe, https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Kernbrennstoffe/kernbrennstoffe_node.html.

und Entwicklung (OECD) und der Internationalen Atomenergieorganisation (IAEO) der Vereinten Nationen (UN).

Mit der Abschaltung der letzten drei deutschen Kernkraftwerke - Emsland in Niedersachsen, Isar 2 in Bayern und Neckarwestheim 2 in Baden-Württemberg - am 15. April 2023 wurde die Nutzung der Kernenergie in Deutschland beendet. Die Kernkraftwerke Grohnde, Gundremmingen C und Brokdorf wurden bereits im Jahr 2021 abgeschaltet.“

Die Energieplattform Verivox bemerkt zu den ehemaligen deutschen Kernkraftwerken:²⁷

„Der Reaktor bestimmt das Brennelement. Es gibt verschiedene Reaktortypen, die jeweils auch spezielle Brennelemente benötigen. In Deutschland sind **Siedewasser- und Druckwasserreaktoren sehr** verbreitet. Dort kommen Brennelemente zum Einsatz, die aus einem Bündel einzelner Brennstäbe bestehen. Ein Brennstab ist eine mit Uranpellets gefüllte Metallröhre. Das inzwischen abgeschaltete Kernkraftwerk Biblis wurde zum Beispiel mit Druckwasserreaktoren betrieben. In einem Reaktor befinden sich knapp 200 Brennelemente mit jeweils rund 230 Brennstäben. Ein Brennelement ist fast fünf Meter lang, hat einen Querschnitt von 23x23 Zentimetern und wiegt rund 800 Kilogramm. Brennelemente werden in speziellen kerntechnischen Anlagen gefertigt. [...]

Der Einsatz der Brennelemente in Kernkraftwerken dauert durchschnittlich vier Jahre. Nach etwa einem Jahr Betriebszeit wird ein Viertel der Kernbeladung durch frische Brennelemente ersetzt.“

Die WirtschaftsWoche (WiWo) führt in einem Beitrag aus dem Jahr 2022 zu den, ehemals auch von Deutschland, genutzten Brennelementelieferanten wie folgt aus:²⁸

„Es gibt weltweit eine ganze Reihe von Unternehmen, die Brennstäbe herstellen und liefern können. Für Deutschland sind der **französische Hersteller Framatome, der eine Fabrik in Lingen** betreibt, sowie die **amerikanisch-schwedische Firma Westinghouse** von besonderer Bedeutung. Auf Anfrage hat allerdings keines der Unternehmen geantwortet, um zu erläutern, wie lange die Lieferung von Brennstäben denn nun genau dauern würde. Ursprünglich hatten die Betreiber eine Lieferzeit von 12 bis 15 Monaten angegeben. Laut einiger Berichte hat die Bundesregierung dann aber noch einmal bei Westinghouse angefragt und die Information erhalten, dass man unter Umständen auch früher liefern könne. Vom Branchenverband Kerntechnik Deutschland heißt es nun auf WiWo-Anfrage, ‚frische Brennelemente‘ könnten in Abhängigkeit von möglicherweise bereits getätigten Vorleistungen

27 Verivox, Brennelement, <https://www.verivox.de/strom/themen/brennelement/>.

28 WirtschaftsWoche, 18.10.2022, Längere Laufzeit der Kernkraftwerke: Wo sollen die neuen Brennstäbe herkommen? <https://www.wiwo.de/technologie/forschung/laengere-laufzeit-der-kernkraftwerke-wo-sollen-die-neuen-brennstaebe-herkommen/28750524.html>.

innerhalb von ‚sechs oder sieben Monaten beziehungsweise ansonsten innerhalb von etwa 12 Monaten verfügbar sein‘.“

Die Tageszeitung (Taz) bemerkt zum französischen Atomkonzern Framatome ergänzend:²⁹

„In der Bundesrepublik werden AKW-Brennelemente seit 1979 im emsländischen Lingen gefertigt. Betreiber der Fabrik ist nach mehrmaligem Wechsel die Firma Advanced Nuclear Fuels (ANF), eine Tochterfirma des französischen Atomkonzerns Framatome, der wiederum zum staatlich dominierten Energieunternehmen Électricité de France gehört. Die Lingener Fabrik beliefert Atomkraftwerke unter anderem in den Niederlanden, in Belgien und in der Schweiz mit frischem Uranbrennstoff. Sie ist bislang, ebenso wie die Urananreicherungsanlage im westfälischen Gronau, vom deutschen Atomausstieg ausgenommen.

Statt einer raschen Stilllegung könnte Lingen künftig auch Kundschaft aus Osteuropa beliefern. Wie die Neue Osnabrücker Zeitung am Mittwoch berichtete, will ANF nicht mehr nur viereckige Brennelemente bauen, wie sie vorrangig in Reaktoren westlicher Bauart zum Einsatz kommen. Die Produktion solle vielmehr so umgestaltet werden, dass dort bald auch sechseckige Brennelemente montiert werden könnten, die in Atomkraftwerken russischer Bauart verwendet werden.

Bereits vor Beginn des Kriegs gegen die Ukraine hatte der russische staatliche Atomkonzern Rosatom Interesse an einem Joint Venture mit ANF in Lingen signalisiert. Ein entsprechender Antrag des russisch-französischen Konsortiums lag dem Bundeswirtschaftsministerium bereits vor, wurde aber zurückgezogen. Der Zeitung zufolge soll das Joint Venture zwischen Rosatom und Framatome nun in Frankreich angesiedelt werden.“

29 Taz, 7.12.2022, Herstellung von Brennelementen: Ministerium für Aus von Uranfabriken, <https://taz.de/Herstellung-von-Brennelementen/!5896960/>.