

Faktenblatt

März 2017

Kernbrennstoff – Material mit besonderen Eigenschaften

Die Kernenergie verfügt über eine breite Vielfalt von langfristigen Optionen für eine nachhaltige Stromversorgung. Der Schlüssel liegt in den besonderen Eigenschaften des Kernbrennstoffs. Anders als bei der Verbrennung von Kohle, Öl oder Gas kann ausgedienter Kernbrennstoff aufgearbeitet und erneut zur Energiegewinnung eingesetzt werden. In der Nuklearwirtschaft ist Abfall nicht einfach Abfall – sondern gleichzeitig Rohstoff für die Energieversorgung künftiger Generationen.

Das Uran, so wie es in der Natur vorkommt, setzt sich im Wesentlichen aus zwei unterschiedlichen Atomkernen zusammen: Der allergrösste Teil des Natururans (99,3%) besteht aus Uran-238-Atomen. Der Rest mit einem Anteil von nur 0,7% ist Uran-235 mit drei Neutronen weniger im Kern.

Kernkraftwerke gewinnen primär Energie aus dem Spalten von Uran. In herkömmlichen Reaktoren, wie sie in der Schweiz in Betrieb stehen, wird jedoch vor allem das Uran-235 gespalten, während der grösste Teil des Urans-238 übrig bleibt. Zusätzlich muss bei diesem Reaktortyp der Anteil des Urans-235 im frischen Kernbrennstoff auf 3 bis 5% erhöht (angereichert) werden.

Durch das Spalten des Urans-235 im Reaktor eines Kernkraftwerks entstehen leichtere Atomkerne, die sogenannten Spaltprodukte. Sie verbleiben im Kernbrennstoff und tragen durch ihre Radioaktivität noch einige Prozente zur Energieabgabe des Reaktors bei, können aber sonst nicht mehr weiter verwendet werden.

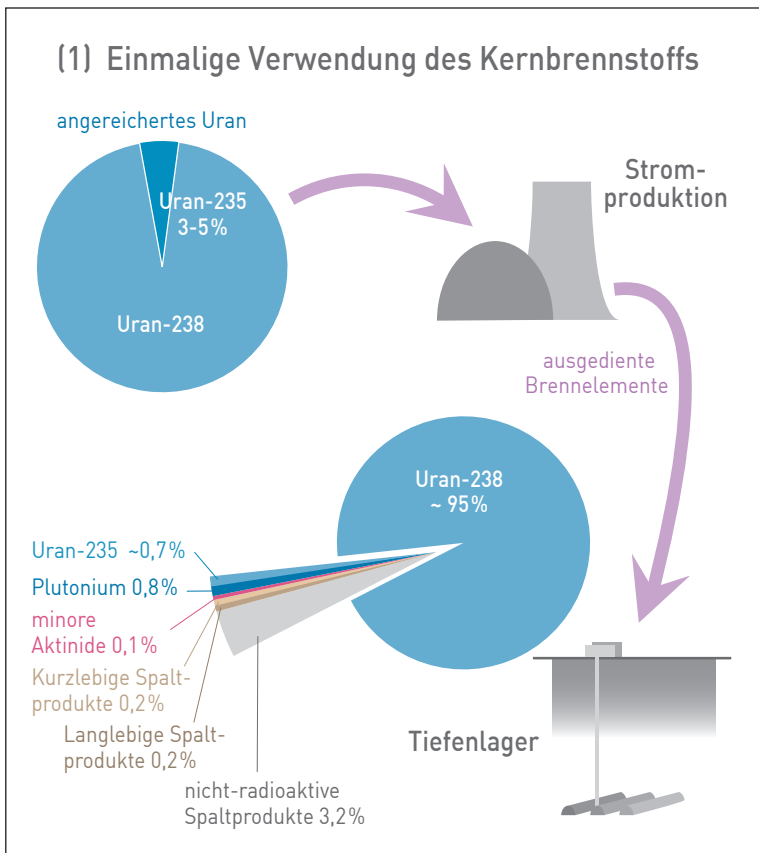
Plutonium

Gleichzeitig findet im Reaktor ein wichtiger Nebenprozess statt: Durch das Einfangen von Neutronen wandelt sich ein geringer Teil des schwer spaltbaren Urans-238 zunächst in Neptunium und danach in Plutonium-239 um, das wie das Uran-235 leicht spaltbar ist und zur Energieabgabe des Reaktors beiträgt. Ein Teil dieses Plutoniums wird jedoch nicht gespalten, sondern in noch schwerere Atomkerne umgewandelt. Diese im Reaktor aus dem Uran entstandenen neuen Elemente – hauptsächlich Neptunium, Americium und



Ein besonderes Material mit einer enormen Energiereserve für die Zukunft: Montage eines Brennelements mit Uran für den Einsatz in einem herkömmlichen Leichtwasserreaktor.

Foto: Advanced Nuclear Fuels GmbH



– Die andere Option ist die Wiederaufarbeitung des ausgedienten Brennstoffs mit dem Ziel, einen Teil der darin enthaltenen Energierohstoffe zurückzugewinnen und nur die übrig bleibenden Reststoffe als nuklearer Abfall in ein Tiefenlager zu verbringen. Dieser Weg wird beispielsweise in Frankreich, Grossbritannien, den Niederlanden oder Russland beschritten.

Die Wiederaufarbeitung

Für die Wiederaufarbeitung werden die ausgedienten Brennelemente in spezielle Fabrikanlagen gebracht. Dort werden sie mechanisch zerstückelt und in Salpetersäure aufgelöst. Anschliessend werden das Uran und das Plutonium mit chemischen Verfahren abgetrennt und für die erneute Verwendung als Kernbrennstoff zurückgewonnen (siehe Grafik 2).

Das abgetrennte Uran kann erneut angereichert werden und steht so wieder für die Stromproduktion zur Verfügung. Die Rückführung des abgetrennten Plutoniums erfolgt über die Herstellung von sogenannten MOX-Brennelementen. MOX steht für Mischoxid. In diesen Brennelementen wird das Plutonium mit abgereichertem Uran¹ vermischt, um so die im Reaktor benötigte Konzentration von spaltbaren Stoffen einzustellen.

Übrig bleiben die Spaltprodukte und die minoren Aktinide. Beide werden in ein extrem haltbares Spezialglas eingegossen, in Stahlbehälter verpackt und in das Herkunftsland zurückgeschickt. Nach einer Zwischenlagerung werden diese Behälter als nuklearer Abfall in ein Tiefenlager verbracht.

Schonung der natürlichen Ressourcen

Die Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoff bietet einige Vorteile:

- **Schonung der natürlichen Ressourcen:** Durch das Rezyklieren der spaltbaren Stoffe kann bis zu 20% mehr Energie aus der ursprünglichen Menge Natururan gewonnen werden als bei der direkten Entsorgung des ausgedienten Kernbrennstoffs.
- **Entlastung der Tiefenlager:** Ein weiterer Vorteil besteht in der Entlastung der geologischen Tiefenlager vom relativ lang-

Curium – werden minore Aktinide genannt. Minor heissen sie deswegen, weil ihre Menge im Vergleich zum Plutonium deutlich geringer ist.

Ausgedient heisst nicht Abfall

Durch diese kernphysikalischen Prozesse verändert sich die Zusammensetzung des Kernbrennstoffs im Reaktor. Wenn ein ausgedientes Brennelement nach einigen Jahren Einsatz aus dem Reaktor entladen wird, besteht es immer noch zum allergrössten Teil aus Uran-238 und einem Rest von noch nicht gespaltenem Uran-235 (siehe Grafik 1). Neu dazu kommen die Spaltprodukte, das nicht gesplattene Plutonium und die minoren Aktinide. Für die Weiterbehandlung dieses ausgedienten Kernbrennstoffs gibt es zwei Optionen:

- Bei der sogenannten direkten Entsorgung werden die ausgedienten Brennelemente nach einer Zwischenlagerung schliesslich als Ganzes in ein geologisches Tiefenlager gebracht. Länder wie Schweden, Finnland oder die USA beschreiten diesen Weg.

¹ Als «abgereichert» wird jener Teil des Urans bezeichnet, der bei der Anreicherung übrig bleibt, d.h. dessen Gehalt an Uran-235 geringer ist als die 0,7% des Natururans.

lebigen Plutonium-239. Die im verglasten Abfall verbleibenden Spaltstoffe und minderen Aktinide zerfallen deutlich schneller. Die Zeitdauer, in der die eingelagerten Stoffe auf das Niveau von Natururan zerfallen, verkürzt sich beim Einsatz der Wiederaufarbeitung auf rund 16000 Jahre.

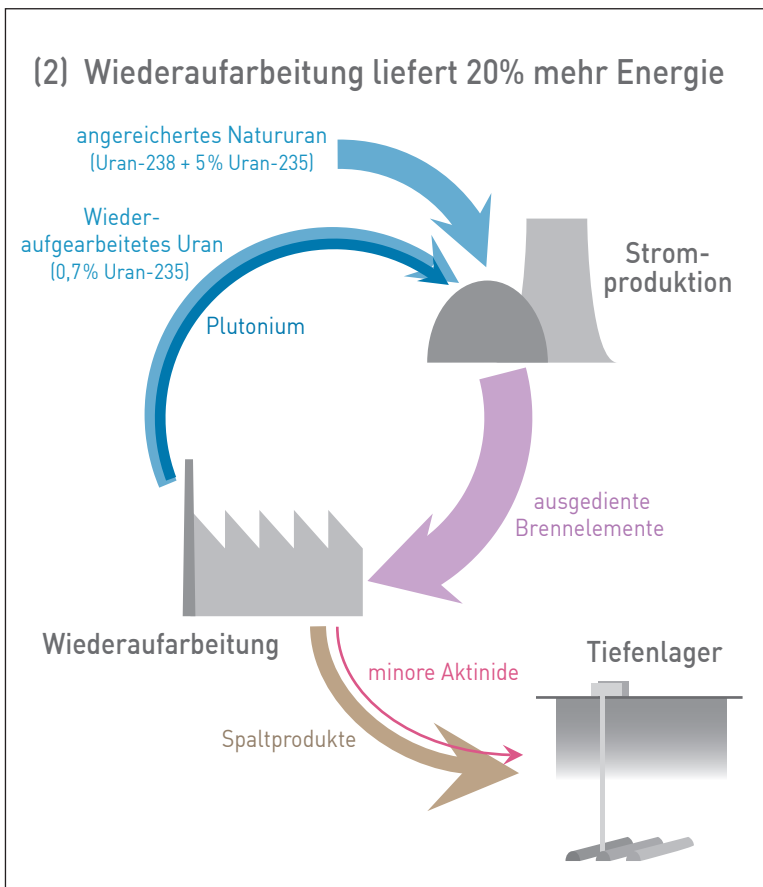
- **Schutz vor Missbrauch:** Der zu entsorgende verglaste Abfall enthält keine spaltbaren Stoffe mehr, die für Waffenzwecke missbraucht werden könnten, und ist daher einfacher lagerbar.

Die Wiederaufarbeitung ist heute technisch ausgereift und wird in einigen Ländern seit vielen Jahren im industriellen Massstab betrieben. In Europa stehen in Frankreich (La Hague in der Normandie) und in Grossbritannien (Sellafield in Nordengland) grosse Wiederaufarbeitungsanlagen in Betrieb. Kleinere derartige Anlagen gibt es in Russland, Indien und Japan.

Umwelt und Proliferation

Als Nachteile der Wiederaufarbeitung werden oft Umweltbelastungen, Transportgefahren und Risiken für die unkontrollierte Verbreitung von waffenfähigem Material (Proliferation) genannt. In der Praxis zeigt sich folgendes Bild:

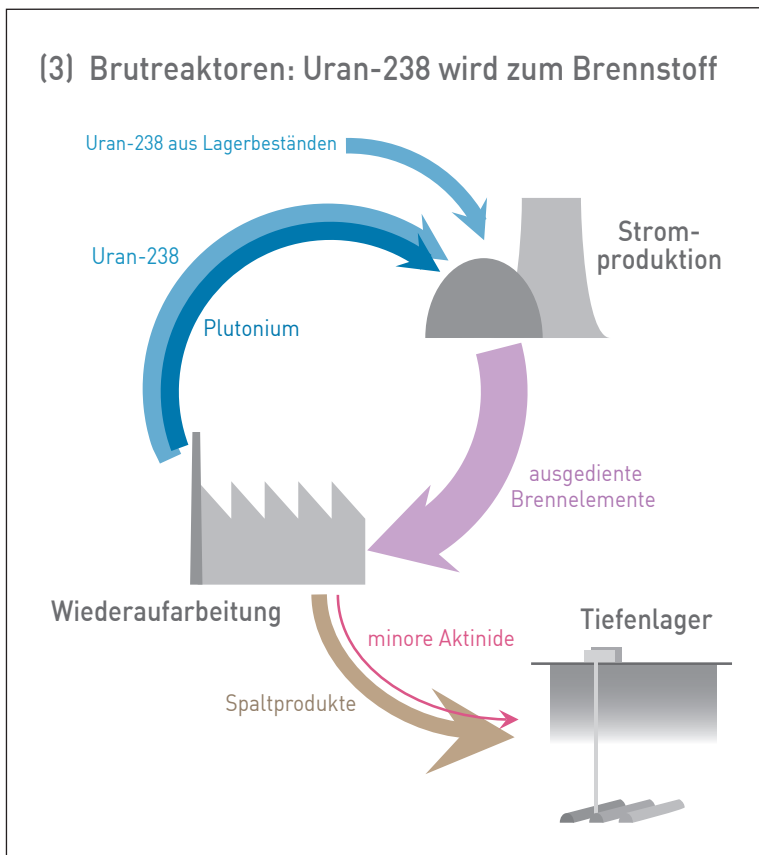
- **Umwelt und Transporte:** Bei beiden Optionen – direkte Tiefenlagerung oder Wiederaufarbeitung in Anlagen mit zeitgemäsem Umweltmanagement – liegen die Abgaben radioaktiver Stoffe weit unter den zugelassenen Grenzwerten und sind für Mensch und Umwelt unbedenklich. Das gleiche gilt für die Transporte von Kernbrennstoff, die in beiden Fällen unumgänglich sind.
- **Proliferation:** Bei der Wiederaufarbeitung fällt das abgetrennte Plutonium zwischenzeitlich in reiner Form an. Wiederaufarbeitungsanlagen und MOX-Fabriken unterstehen daher strengen nationalen und internationalen Kontrollen. Allerdings eignet sich das Plutonium in den ausgedienten Brennelementen wegen der Zusammensetzung seiner Atomkerne äusserst schlecht für Kernwaffen. Nach dem Recycling als MOX-Brennstoff ist das Plutonium für militärische Zwecke sogar völlig untauglich. Das Spaltmaterial für Kernwaffen wird von den Atommächten in speziell dafür errichteten Anlagen hergestellt. Bisher ist kein Fall bekannt, bei dem in Wiederaufarbeitungsanlagen abgetrenntes Plutonium für militärische Zwecke abgezweigt worden wäre.



Moratorium in der Schweiz

In der Schweiz wurde zunächst – im Sinne der Ressourcenschonung und der Minimierung des Plutoniums – der Weg der Wiederaufarbeitung beschritten. Im Jahr 2006 trat jedoch ein vom Eidgenössischen Parlament beschlossenes Moratorium für zehn Jahre in Kraft, sodass seither der ausgediente Kernbrennstoff unverändert in die Zwischenlagerung verbracht wird. Später werden die Brennelemente in dieser Form im künftigen Tiefenlager eingelagert. Die Wiederaufarbeitung bleibt dennoch als Option offen, da die Brennelemente bis zum Verschluss des Tiefen-

(3) Brutreaktoren: Uran-238 wird zum Brennstoff



Kernbrennstoffkreislauf (siehe Grafik 3) tritt Uran-238 und rezykliertes Plutonium an die Stelle des Urans-235.

Enorme Energiereserve

Die durch den Einsatz von Schnellen Brüttern und durch die Wiederaufarbeitung erschlossene Energiereserve ist enorm: Falls in den kommenden Jahrzehnten der weltweite Kernkraftwerkspark mit Schnellen Brüttern ergänzt wird, erhöht sich die aus einem Kilogramm Natururan erzeugbare Strommenge um mindestens das 50-Fache. Entsprechend vergrößert sich die Reichweite der Uranressourcen der Erde. Beim Einsatz von Schnellen Brüttern würden allein die bisher eingelagerten Reserven an abgereichertem Uran rein rechnerisch ausreichen, um die heutige weltweite Stromproduktion aus Kernkraftwerken für mehr als 4000 Jahre sicherzustellen – ohne dass eine einzige Uranmine betrieben werden müsste.

Schnelle Brüter sind bereits über Jahrzehnte in Frankreich, Japan, Russland und den USA im industriellen Massstab betrieben worden. Die Brütertechnik wird derzeit weiterentwickelt: In den Forschungs- und Entwicklungsprojekten im Rahmen des «Generation IV International Forum»² finden sich mehrere Varianten Schneller Brüter (siehe Faktenblatt des Nuklearforums Schweiz «Reaktorsysteme der Zukunft»).

In Russland hat im November 2016 in Belojarsk der mit 800 Megawatt elektrischer Leistung weltweit leistungsstärkste Schnelle Brüter den kommerziellen Betrieb aufgenommen. Ein weiterer grosser Brutreaktor steht in Indien vor der Fertigstellung.

Die Wiederaufarbeitung ist eine zwingende Voraussetzung für die Einführung der nachhaltigen Reaktorsysteme der vierten Generation.

Recycling der minoren Aktinide

In einem Brennstoff-Kreislauf mit Schnellen Brüttern ist es grundsätzlich möglich, auch die minoren Aktinide aus den ausgedienten Brennelementen abzutrennen und in die

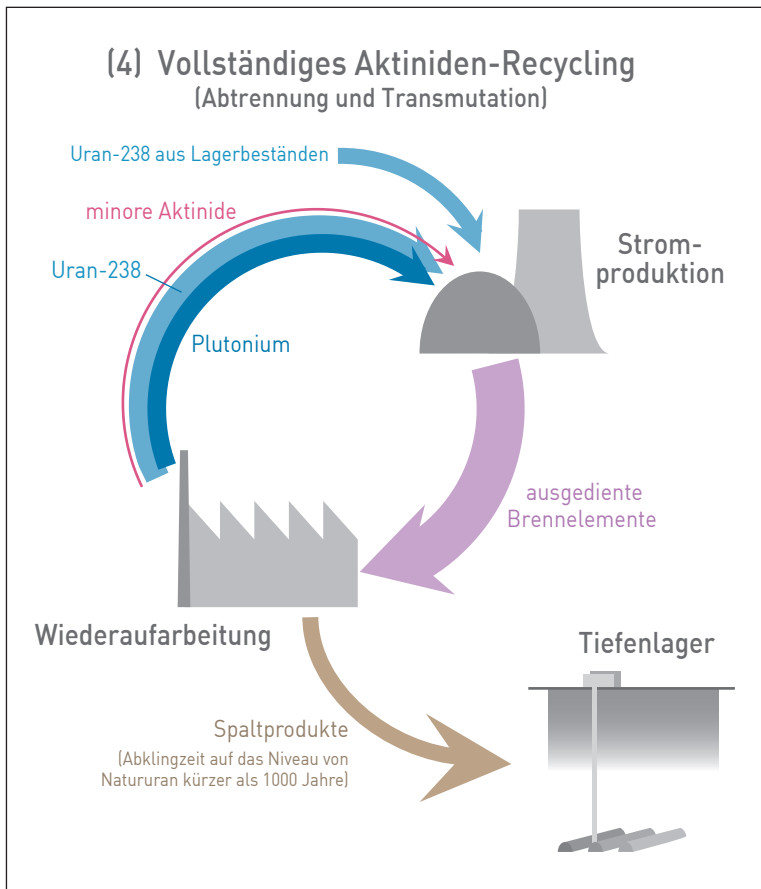
lagers jederzeit zurückgeholt werden können. Nach dem Verschluss ist das Rückholen zwar immer noch möglich, aber nur mit grossem Aufwand.

Der ressourcensparende MOX-Brennstoff wurde in der Schweiz von 1976 bis 2013 im Kernkraftwerk Beznau eingesetzt. Das Kernkraftwerk Gösgen nutzte MOX von 1997 bis 2012.

Recycling in Schnellen Brüttern

Die Möglichkeiten der nachhaltigen Kernbrennstoffnutzung sind damit aber nicht ausgeschöpft. In sogenannten Schnellen Brüttern wird das in den herkömmlichen Reaktoren kaum nutzbare Uran-238 zum Energierohstoff. Die in solchen Reaktoren vorhandenen energiereichen («schnellen») Neutronen wandeln dieses Uran in das leicht spaltbare Plutonium-239 um. Bei Bedarf können aus dem Uran-238 sogar mehr leicht spaltbare Atomkerne erzeugt («erbrütet») werden, als der Reaktor verbraucht. Bei einem solchen

² Informationen dazu finden sich unter: www.gen-4.org
Die Schweiz ist Mitglied dieser Organisation.



wandlung) bekannt. Voraussetzung für P&T ist die Weiterentwicklung der Wiederaufarbeitung. Entsprechende Verfahren sind im Labormassstab bereits erprobt worden.

Industrielle Verfahren zu akzeptablen Kosten gibt es derzeit aber noch nicht. Zuvor müssen noch eine Reihe wissenschaftlicher und technischer Aufgaben gelöst werden, was nur in internationaler Zusammenarbeit möglich ist. Angestrebt wird von der Wissenschaft ein Verfahren, bei dem das Plutonium und die minoren Aktinide gemeinsam als Mischung zurückgewonnen werden können. Das erhöht nochmals den Schutz vor dem Abzweigen von bombenfähigem Material.

Grossprojekt der EU in Belgien

P&T ist alternativ auch durch den Einsatz sogenannter beschleunigergetriebener Systeme (Accelerator Driven Systems, ADS) möglich. Erfolgreiche Versuche dazu fanden unter anderem am Paul Scherrer Institut des ETH-Bereichs in Villigen (Kanton Aargau) im Rahmen eines «Megapie» genannten Experiments statt.

Die EU will in den kommenden Jahren im belgischen Forschungszentrum SCK-CEN in Mol den Prototypen eines beschleunigergetriebenen Vielzweck-Forschungsreaktors errichten. Das Projekt «Myrrha» (Multipurpose Hybrid Reactor for High-technology Applications) dient unter anderem der Entwicklung von P&T-Verfahren. Die Projektkosten belaufen sich auf 960 Millionen Euro.

Grenzen bei der Abfallentsorgung

Die Möglichkeit, durch P&T die relativ langlebigen, stark radioaktiven Stoffe aus dem Reaktorbetrieb in kurzlebige umzuwandeln und die zu entsorgende Abfallmenge zu minimieren, erscheint aus Sicht der aktuellen Diskussionen um die Entsorgung der radioaktiven Abfälle besonders attraktiv.

Dabei ist allerdings zu beachten: Die Transmutation ist nur bei den Aktiniden möglich. Die Spaltprodukte in den ausgeedienten Brennelementen können ebenso wenig transmutiert werden wie die heute bereits verglasten hoch radioaktiven Abfälle aus der Wieder-

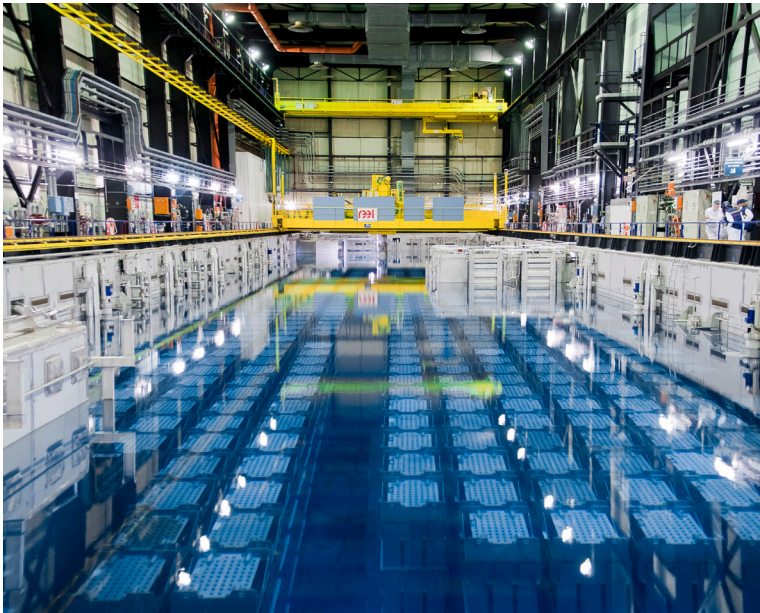
Kernkraftwerke zurückzuführen. Dort können sie unter Energiegewinn in viel kurzlebige Atomkerne gespalten werden (siehe Grafik 4). In einer solchen Nuklearwirtschaft mit mehrfacher Rezyklierung der Aktinide müssten im Prinzip nur noch die Spaltprodukte entsorgt werden. Die Radiotoxizität³ im Tiefenlager würde in diesem Fall in weniger als tausend Jahren unter den Wert des ursprünglichen Natururans absinken.

In der Praxis werden jedoch die zurückgeführten Aktinide im Reaktor nicht vollständig gespalten und auch beim mehrfachen Durchlaufen der Wiederaufarbeitung bleiben Spuren von Aktiniden im Abfall zurück. Sie müssen, zusammen mit den Spaltprodukten, ins Tiefenlager verbracht werden.

«Partitioning & Transmutation»

Das mehrfache Wiederaufarbeiten und Wiederverwenden der minoren Aktinide ist unter dem Begriff «Partitioning & Transmutation» (P&T, Abtrennung und anschliessende Um-

³ Die Radiotoxizität ist ein Mass für das durch die Strahlung radioaktiver Stoffe bedingte potenzielle Gesundheitsrisiko.



Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoff als Schlüssel zu einer nachhaltigen Nuklearwirtschaft: Ausgediente Brennelemente vor der Wiederaufarbeitung in La Hague in der Normandie.

Foto: Areva

⁴ Die heute in der Schweiz in Betrieb stehenden Kernkraftwerke gehören zur zweiten Generation und wurden in den vergangenen Jahrzehnten so nachgerüstet, dass auch sie höchste Sicherheitsanforderungen erfüllen.

aufarbeitung. Durch P&T erhöht sich zudem die Menge an schwach und mittel radioaktiven Abfällen.

Das bedeutet: Obwohl die verschiedenen Kernbrennstoff-Kreisläufe zu einer unterschiedlichen Zusammensetzung der radioaktiven Abfälle führen, verbleiben in jedem Fall langlebige Komponenten, die laut Gesetz in geologische Tiefenlager verbracht werden müssen.

Langzeitschutz durch Wirtsgestein

Zwar würde sich durch P&T der minoren Aktinide das radiologische Gefahrenpotenzial des Abfalls vermindern und die Abfälle könnten, da sie weniger Wärme abgeben, dichter gepackt werden. An der Erdoberfläche hätte das jedoch keine wesentlichen Auswirkungen auf die vom Gesetzgeber geforderten langfristigen Schutzziele für die Umwelt.

Das in der Schweiz gewählte Entsorgungskonzept sieht Tiefenlager vor, die über sehr lange Zeiträume so dicht sind, dass die Art und Menge des eingelagerten Materials von untergeordneter Bedeutung ist. P&T führt daher zu keiner wesentlichen Verbesserung

der Lagersicherheit, da der Langzeitschutz von Mensch und Umwelt vom tonhaltigen Wirtsgestein sichergestellt wird, das die Aktinide besonders gut zurückhält.

Generation III kein Hindernis

Die Entwicklung und der Einsatz von P&T machen nur Sinn im Rahmen eines langfristigen Kernenergieprogramms. P&T wird vor allem dann interessant, wenn die Schnellen Brüter der auf Nachhaltigkeit ausgelegten vierten Generation zum Einsatz kommen (siehe Seite 4) und sind daher ein wichtiges internationales Forschungsgebiet.

Darüber dürfen jedoch die bereits verfügbaren herkömmlichen Reaktorsysteme modernster Bauart nicht vergessen werden. Diese Systeme der sogenannten fortgeschrittenen dritten Generation stehen gegenwärtig in Europa, in den USA, in Russland und in Ostasien im Bau. Sie erfüllen höchste Sicherheitsansprüche und waren für die Erneuerung des heutigen Schweizer Kernkraftwerkparcs vorgesehen⁴.

Der Uranbedarf der Leichtwasserreaktoren der Generation III passt gut zur Brennstoffversorgung künftiger Brutreaktoren. Letztere benötigen ja kein Uran-235, sondern Uran-238 oder Plutonium, wie sie in den ausgedienten Brennelementen der herkömmlichen Reaktoren enthalten sind. In einem Brennstoffzyklus mit Brutreaktoren könnte nach und nach das gesamte im nuklearen «Abfall» eines Leichtwasserreaktors enthaltene Uran-238 und Plutonium für die Energieproduktion genutzt werden. Bei einer Betriebsdauer von 50 bis 60 Jahren würde ein heutiges Kernkraftwerk genug Energierohstoff liefern, um einen Brüter gleicher Leistung etwa 1000 Jahre zu betreiben.

Fazit:

Die ausgedienten Brennelemente in den heutigen Zwischenlagern stellen eine enorme Energiereserve für künftige Generationen dar. Dazu kommen noch die grossen Uranvorräte aus der Anreicherung. Technologisch gesehen, steht die Nukleartechnik beim Ausschöpfen ihres Potenzials erst am Anfang.