Brennstoffsysteme

Autor(en): **Buob, Karl H.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **96 (1978)**

Heft 21

PDF erstellt am: **29.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-73693

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

HERAUSGEGEBEN VON DER VERLAGS-AKTIENGESELLSCHAFT DER AKADEMISCHEN TECHNISCHEN VEREINE, 8021 ZÜRICH, POSTFACH 630

*Sicherheit der Kernkraftwerke V (Schluss) *)*

Brennstoffsysteme

Von **Karl H. Buob**, Windisch

Jede Energienutzung basiert auf einem *Primärenergieträger*, aus dem vorerst die Energie freigesetzt werden muss und nach dessen Besonderheiten sich die Technik richtet. In der Kerntechnik handelt es sich bei diesem Energieträger um die *Spalt- und Brutstoffe*, die gegenüber den konventionellen Rohstoffen — Holz, Kohle, Öl, Gas — grundlegend abweichende Eigenschaften aufweisen.

Die fossilen Energieträger sind Materialien, die durch Verbrennung, d.h. durch eine chemische Reaktion mit Sauerstoff, Energie abgeben. Dieser Prozess beruht darauf, dass die *chemischen Verbindungen*, die dabei entstehen, auf einem *tieferen Energieniveau* liegen. Der Vorgang der Wärmeerzeugung ist also im allgemeinen mit der Vorstellung der Verbrennung verbunden. Man spricht nun auch bei der Kernenergie von Brennstoff, obwohl bei der Energiegewinnung keine Verbrennung stattfindet. Die freigesetzte Energie beruht vielmehr auf *unterschiedlichen Energieniveaus verschiedener Atomkerne*, die durch Kernspaltung entstehen.

Bei der Spaltung eines Urankerns werden ca. 200 Millionen Elektronenvolt Energie frei. Davon entfallen rund 85 Prozent auf die kinetische Energie der Spaltprodukte, die in Form von *Wärme* an die Materie abgegeben wird. Der Rest entfällt auf die *Neutronen* und die *Anregungsenergie der radioaktiven Bruchstücke*.

Im Gegensatz zu den fossilen Brennstoffen, die vor ihrer Verwendung als Primärenergieträger keiner weitgehenden Veränderung bedürfen, muss der «Kernbrennstoff» aus dem Erz mit aufwendigen und technisch hochstehenden Prozessen erst extrahiert und in eine anwendbare Form gebracht werden. Ein zweiter wesentlicher Unterschied liegt darin, dass der umgesetzte fossile Brennstoff völlig verbraucht ist, während der Kernbrennstoff noch *Reste von Spaltstoff, neuen erbrüteten Spaltstoff* und *nicht verbrauchtes U-238* bzw. *Thorium* enthält. Will man diesen wertvollen Brennstoff einer erneuten Nutzung zuführen, muss man ihn zunächst von den in ihm enthaltenen langlebigen Aktiniden und den Spaltprodukten auf dem Wege der *chemischen Wiederaufbereitung* trennen. Der zurückgewonnene Brennstoff lässt sich wieder zu Brennelementen verarbeiten, während die Aktiniden und Spaltprodukte in eine solche Form zu bringen sind, dass sie einer *sicheren Endlagerung* zugeführt werden können.

Kernphysikalische Brennstoffzyklen

Kernphysikalisch lassen sich *zwei unterschiedliche Brennstoffzyklen* verwirklichen: Der Uran-Plutonium-Zyklus und der Thorium-Uran-Zyklus.

Der *Uran-Plutonium-Zyklus* geht vom Uran aus, das in der natürlichen Zusammensetzung 0,7% Spaltstoff U-235 und 99,3% Brutstoff U-238 enthält. Wesentlich ist, dass durch Neutroneneinfang im U-238 vorerst U-239 entsteht, das durch β-Zerfälle über das Neptunium-239 zum neuen Spaltstoff Plutonium-239 zerfällt.

Beim Brutstoff *Thorium* entsteht durch einen Neutroneneinfang und zwei nachfolgende β-Zerfälle der neue Spaltstoff U-233. Dieser Zyklus muss also mit einem *Fremdspaltstoff* in Gang gesetzt werden und in beiden Fällen spricht man von Zyklus, obwohl sich der Kreis nicht eigentlich schliesst, sondern ein andersartiger Spaltstoff einen Teil des ursprünglichen ersetzt. In beiden Fällen entstehen durch *Neutroneneinfang* und *Kernumwandlungen* geringe Mengen weiterer *Folgeprodukte*, die z.T. spaltbar sind, z.T. aber störende Nebenwirkungen für den Kreislauf haben.

Die Uran- und Thorium-Reserven

Jede Aussage über die in Form von Uran und Thorium vorhandenen Energiereserven ist nur sinnvoll, wenn auch eine Aussage über die Art der *Nutzung* gemacht wird. Der Uranverbrauch variiert, sowohl was die Erstausstattung als auch was den laufenden Bedarf betrifft, je nach Reaktortyp sehr stark und ist natürlich von der installierten Reaktorleistung abhängig. Zum grössten Teil wird die Marktlage durch die *Leichtwasserreaktoren* bestimmt und daran wird sich in den nächsten 10—15 Jahren nicht viel ändern. *Langfristig* werden aber *Hochtemperaturreaktor* und *Schneller Brüter* einen wesentlichen Einfluss haben auf den Verbrauch an Uran und Thorium.

Die Voraussagen für den weltweiten Weiterausbau der Kernenergieprogramme wurden in den letzten Jahren drastisch reduziert, z.T. als Folge der Rezession aber auch infolge des Widerstandes der Bevölkerung. *Gültige Vorhersagen über den Uranbedarf lassen sich nicht machen* und wir beschränken uns hier auf technische Angaben über den spezifischen Energieverbrauch je installiertes MWe bei einer jährlichen Betriebsdauer von 7000 Stunden für die verschiedenen Reaktortypen (Tab. 1). Ein LWR von der Grösse, wie er in Gösgen gebaut wird, braucht demnach jährlich ca. 200 t U_3O_8.

Tabelle 1. Spezifischer Natururan-Bedarf verschiedener Reaktortypen

Reaktortypen	*Erstausstattung*		*Jährlicher Bedarf*	
	kg U/MWe	t U_3O_3/MWe	kg U/MWe	t U_3O_8/MWe
Fortgeschrittener gasgekühlter Reaktor (AGR)	600	0,780	130	0,169
Gasgekühlter Hochtemperatur-Reaktor (HTR)	1144	0,187	115	0,150
Schwerwasser Reaktoren (HWR)	131	0,170	111	0,144
Leichtwasser-Reaktoren (LWR)	460	0,598	168	0,219

*) Vgl. Schweiz. Bauzeitung, Heft 44 (1977), Heft 3, 6, und 19 (1978)

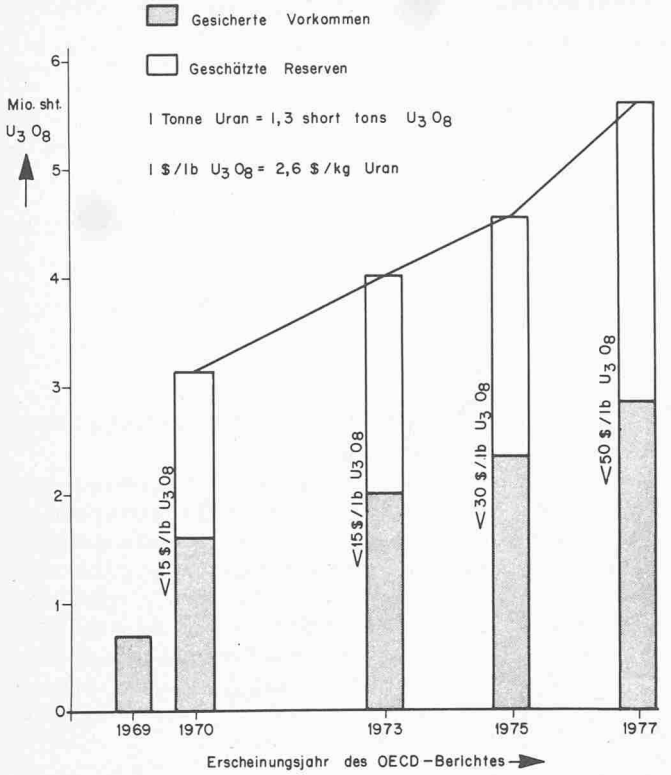


Bild 1. Uranreserven der Welt, zeitliche Entwicklung (Quelle: OECD-Berichte)

Die zur Zeit nachgewiesenen und geschätzten Vorkommen (ohne kommunistische Staaten), die zu einem Preis bis zu 50 $/lbs U_3O_8 abgebaut werden können, belaufen sich auf rund 4,3 Millionen Tonnen Uran (Bild 1). Die Zahlen für die weltweiten Reserven sind zudem laufend dem neuesten Stand der Prospektion anzupassen.

Die geographische Verteilung ist breit gestreut, mit den grössten Vorkommen in den *USA, Kanada, Australien, Südafrika,* aber auch in *Europa* sind abbauwürdige Vorkommen bekannt, besonders in *Frankreich, Schweden* und *Spanien.* Erst kürzlich wurde im *Schwarzwald* ein Lager mit Uranvorräten ausgemacht, die ungefähr den gleichen Energievorrat darstellen wie die deutschen Kohlevorräte. Vermehrte Prospektion wird ohne Zweifel weitere Lagerstätten zu Tage fördern und letztlich stellt das *Meerwasser* mit einem U-Gehalt von 2 mg/t einen Vorrat von 4 Milliarden Tonnen dar. Die Ausbeutung ist lediglich eine Frage des Preises.

Mit der Einführung des Brüters lässt sich die in Natururan enthaltene Energie um etwa einen Faktor 60 besser nutzen, weil sie den Brutstoff U-238 in Spaltstoffe umwandelt. Damit wären die bekannten Unranvorräte von der gleichen Grössenordnung wie die heutigen bekannten Kohlevorkommen der Welt, d.h. die Energieversorgung wird durch Brüter für Jahrhunderte sichergestellt.

Der Brennstoffkreislauf des Brennstoffzyklus

Der Brennstoffkreislauf der LWR umfasst im wesentlichen folgende *Dienstleistungen:* Uranbeschaffung, Anreicherung, Herstellung der Brennelemente, Einsatz der Brennelemente im Reaktor, Wiederaufarbeitung und Abfallbeseitigung. Diese Schritte des Brennstoffzyklus werden nun einer näheren Betrachtung unterzogen.

Uran-Bergbau und Erzgewinnung

Nach dem heutigen Stand der Technik werden Erze mit einem Mindestgehalt von 0,05 bis 0,1% U_3O_8 als abbauwürdig angesehen, sofern der Erzkörper mehrere tausend Tonnen Uran enthält. Um solche Lagerstätten zu finden, stehen *geophysikalische* und *geochemische* Methoden zur Verfügung, die auf die besonderen Eigenschaften radioaktiver Mineralien ausgerichtet sind. Führt die Prospektion zu positiven Ergebnissen, kann das Uranvorkommen im *Tagbau* oder im *Tiefbau* abgebaut werden, je nach der Tiefenlage des Erzkörpers. Im Prinzip wendet man die gleichen Abbauverfahren an wie bei anderen Erzen. Wegen des geringen Urangehaltes muss jedoch die *Aufarbeitung an Ort und Stelle* vorgenommen werden, da weite Transportwege unwirtschaftlich sind.

Die *Besonderheiten des Uranbergbaus* liegen in der *Strahlung der Zerfallprodukte des Urans,* insbesondere des Radon-222 und seiner Tochterisotope. Für die Belüftung der Stollen wird deshalb 5—10mal mehr Frischluft benötigt als bei nicht uranhaltigen Gruben. Die Strahlenschutzbestimmungen sind äusserst streng und jeder Arbeiter führt laufend Buch über seine inkorporierte Strahlungsdosis. Nähert er sich der zulässigen Grenze, wird er an einen anderen Arbeitsplatz ohne Strahlenbelastung versetzt.

Die Erzgewinnung wird technisch noch erschwert durch den *unregelmässigen* Urangehalt der Lagerstätten. Durch engmaschiges Vorbohren und häufige Probenahme wird ein möglichst gleichmässiger Roherzgehalt angestrebt, um die Erzaufbereitung zu erleichtern.

Erz-Aufbereitung

Das Erz wird in verschiedenen Stufen gebrochen und gemahlen bis zu Korngrössen von 0,1 mm oder kleiner und dann der chemischen Auslaugung zugeführt. Die *Laugung* erfolgt entweder sauer oder alkalisch. Die uranhaltige Lösung wird durch Sedimentation und Filtration gereinigt und das Uran schliesslich mit einer Ionenaustauschertechnik extrahiert. Da neben Uran kaum andere Metalle in Lösung gehen, wird durch einen nachfolgenden Fällungsprozess fast quantitativ reines *Uransalz* ausgefällt. Das Konzentrat wird nach Trocknung bei 400° als sog. *Yellow Cake* in Fässer verpackt und der weiteren Verarbeitung zu UF_6 zugeführt. Dieser Schritt ist notwendig, um in gasförmiger Phase den Spaltstoff U-235 von 0,711% im Natururan auf 2—3,5% für LWR-Brennstoff anzureichern.

Anreicherung

Die Anreicherung beruht auf der Tatsache, dass die Diffusionsgeschwindigkeit der Isotope U-238 und U-235 durch poröse Membranen unterschiedlich ist. In der Praxis lässt man UF_6 aus Kammern mit höherem Druck durch Membranen in Kammern niedrigeren Drucks strömen. Durch die etwas höhere Geschwindigkeit der leichteren Uranmoleküle U-235 wird auf der Niederdruckseite ihre Konzentration erhöht. Die Wirkung ist jedoch sehr klein; somit müssen Tausende solcher Kammern in sogenannten Kaskaden hintereinander geschaltet werden.

Das *Gaszentrifugenverfahren* nützt ebenfalls das unterschiedliche Isotopengewicht zur Trennung aus, wobei jedoch die Gravitation die treibende Kraft ist. Auch beim *Trenndüsenverfahren* beruht die Entmischung der Uran-Isotope auf ihrer unterschiedlichen Masse. Um 100 Tonnen 2,5prozentiges Uran herzustellen, werden rund 540 Tonnen Natururan benötigt, wobei der Rückstand noch 0,3% U-235 enthält. Der Energieaufwand ist ganz beträchtlich und beträgt 2400 kWh/kg Urantrennarbeit UTA beim Diffusionsverfahren bzw. 200 kWh/kg UTA bei den Zentrifugen.

Neue Verfahren sind in Entwicklung wie das *Lasertrennverfahren* und ein französisches Verfahren mit *flüssigem Ionenaustausch,* von dem angegeben wird, es sei nur für Anreicherungen bis zu einigen Prozenten geeignet. Im Blick

auf die nicht Weiterverbreitung von Kernwaffenmaterial ist dieses letzte Verfahren besonders interessant. Die abgereicherten Rückstände werden für die spätere Verwendung in Brutreaktoren gelagert. Sicherheitstechnisch bieten sie keine Probleme.

Brennelementherstellung

Die Anfertigung der Brennelemente beruht auf hochstehenden technischen Verfahren, die heute erprobt und ausgereift sind. Die Brennelemente sind so ausgelegt, dass eine *günstige Wärmeproduktion* gewährleistet ist *und* die *Spaltprodukte sicher zurückgehalten* werden. Aus ökonomischen Gründen müssen die Verfahren zur Massenproduktion geeignet sein und eine Qualitätskontrolle bei jedem Fabrikationsschritt ermöglichen. Zentrales Problem im Betrieb ist die *Maximierung von spezifischer Leistung und Lebensdauer der Brennelemente,* wobei der *Sicherheitsaspekt das wichtigste Einzelproblem* darstellt.

In den Leichtwasserreaktoren bestehen die Brennelemente aus *Rohrbündeln mit gesinterten Uranoxidtabletten in dicht verschweissten dünnwandigen Rohren.* Als Ausgangsprodukt dient das aus der Anreicherung kommende UF_6, das zu sinterfähigem Urandioxid-Pulver umgewandelt wird. Dieses chemisch einfache Verfahren wird in speziellen Behältern durchgeführt, die geometrisch so ausgelegt sind, dass keine kritischen Zustände eintreten können, d.h. dass das Anlaufen einer Kettenreaktion verunmöglicht wird. Diese Sicherheitsüberlegungen sind während der ganzen Fabrikationsphase, beim Transport und bei der Lagerung zu beachten.

Das Herstellen der UO_2-Pellets ist voll automatisiert. Der grüne Presskörper wird in einer Wasserstoffatmosphäre bei 1700° durch den Sintervorgang auf die gewünschte Dichte geschrumpft und dann auf eine Durchmessertoleranz von ± 10 bis 25 µm geschliffen.

Der nächste Schritt führt zu den Einzelstäben durch Einfüllen der UO_2-Tabletten in *Hüllrohre aus Zirkonlegierungen.* Die Hülle dient als Schutz vor chemischen und mechanischen Angriffen des Brennstoffes durch das Kühlmittel und um den Eintritt der Spaltprodukte in den Kühlkreislauf zu verhindern. Die Rohre werden 100prozentig auf Fehlerfreiheit geprüft und dann unter Schutzgas verschweisst.

Als letzter Schritt werden die einzelnen Brennstäbe zu *Bündeln* zusammengebaut. Es wird dazu eine tragende Konstruktion aus Abstandhaltern mit gitterförmigen Stabhalteplatten montiert. An die Masshaltigkeit der ca. 4 m langen Brennelemente werden hohe Anforderungen gestellt.

Es gibt genügend Fabrikationskapazität für die Brennelementfertigung. Einige Hersteller wurden in den letzten Jahren aus dem Markt verdrängt oder konnten nicht Fuss fassen. Die Fabrikationskapazität kann sich leicht dem Bedarf anpassen. Für den Bau einer neuen Fabrikationsanlage ist eine Bauzeit von etwa zwei Jahren nötig. Kapazitätsüberschuss entstand, weil die Kernkraftwerkbauprogramme der verschiedenen Länder Verzögerungen erlitten haben und noch erleiden.

Über die *Funktionsweise der Brennelemente* wurde in einem früheren Artikel der Serie berichtet *(K. H. Alex und H. R. Lutz).* Hier soll deshalb lediglich auf die technischen Probleme eingegangen werden, die sich für Material und Konstruktion aus dem Betrieb ergeben.

Technische Probleme beim Brennelement im Betrieb

Die Brennelemente unterliegen im Betrieb verschiedenen Beanspruchungen mechanischer, thermischer und chemischer Natur. Dazu kommen die spezifischen Einwirkungen der Neutronenstrahlung und der Spaltfragmente. Die durch Kernspaltung erzeugte Wärme führt zu einer Temperaturverteilung wie sie in Bild 2 schematisch widergegeben ist.

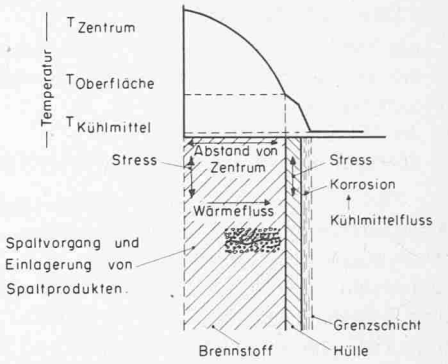


Bild 2. Schematische Darstellung von Wärmeverteilung, Wärmefluss und Spannungen in einem Brennelement

Die *mechanischen* Auslegungskriterien sind durch die Festigkeit des Hüllrohrmaterials selbst gegeben, aber auch durch die im Betrieb auftretenden Kräfte. Durch die Kernspaltung werden mehrere Mechanismen wirksam:

1. Aufbau eines erhöhten Druckes im Innern durch die freigesetzten gasförmigen Spaltprodukte.
2. Aufschwellen des UO_2-Gitters durch Einlagerung fester Spaltprodukte und Bildung von Poren, die zu einer Volumenvergrösserung führen.
3. Erzeugung von Wärmespannungen.

All diesen Faktoren wird in der Auslegung Rechnung getragen. Die auftretenden Spannungen führen zu keinen Schäden.

Auch die *Versprödung als Folge der Neutronenbestrahlung* und die *Korrosionseinwirkungen* lassen sich vorausberechnen. Der Stand der Technik erlaubt heute je Tonne Brennstoff 30000 MWd (Megawatt-Tage) Energie freizusetzen. Der Brennstoff muss deshalb nach rund drei Jahren aus dem Reaktor entfernt werden.

Die *Betriebserfahrungen* mit Brennelementen für Leichtwasserreaktoren sind gut. Weltweit wurden bisher mehr als 3,4 Mio Druckwasserreaktor-Brennstäbe eingesetzt, für welche die Spitzenabbrände bei 40000 MWd/MTU (gemittelt über ein Brennelement) liegen. In Siedewasserreaktoren wurden knapp zwei Mio Brennstäbe eingesetzt, die Spitzenabbrände von etwa 30000 MWd/MTU erreicht haben. Ein Mass für die *Qualität* der Brennelemente und damit der Brennstäbe im Reaktoreinsatz ist die *Brennstabfehlerrate,* das ist der Anteil Brennstäbe in einem Reaktor, der während der vorgesehenen Betriebsdauer undicht wird. Diese Fehlerraten wurden in den letzten Jahren wesentlich verbessert; sie betrugen zu Anfang der siebziger Jahre — mit geringfügigen Unterschieden für PWR und BWR sowie für die verschiedenen Brennelementhersteller — 1 bis 2 Promille der eingesetzten Brennstäbe. Bedingt durch eine bessere Konstruktion der Stäbe und durch schärfer kontrollierte Fertigungsmethoden liegt die Fehlerrate heute bei 0,1—0,2 Promillen.

Wesentlich in der Kernenergie ist ein lückenlos funktionierendes Gesamtsystem, und dazu gehört die Entsorgung mit den Schritten des Transportes, der Wiederaufarbeitung, der Behandlung der radioaktiven Abfälle und ihrer Endlagerung.

Transport von Kernbrennstoffen

Bei den Transportvorgängen ist das *Verschieben abgebrannter Brennelemente* bei weitem der *aufwendigste* Transportschritt.

Das ergibt sich aus

- der Strahlungsintensität der radioaktiven Spaltprodukte,
- der mit dem radioaktiven Zerfall verbundenen Wärmeentwicklung,
- der Radiotoxizität,
- der Spaltbarkeit des restlichen unverbrauchten Urans.

Die *Transportvorschriften* und die *Spezifikationen für die Transportbehälter* sind nach *Richtlinien der Internationalen Atomenergieorganisation* (IAEO) festgelegt. Sie müssen schwersten denkbaren Unfällen widerstehen und haben für ihre Zulassung härteste Tests zu bestehen. Dazu gehören der freie Fall aus 9 m Höhe, Untertauchen in Wasser während acht Stunden und Beständigkeit in Feuer von 800 °C während einer halben Stunde.

Die Transporte werden vorwiegend auf der *Strasse* abgewickelt. Um sich ein Bild vom Umfang zu machen, sei erwähnt, dass von den in LWR verwendeten Brennelementen je Jahr 25—30% ausgewechselt werden. Für ein KKW der 1000-MWe-Klasse entspricht dies ungefähr 30 Tonnen, die der Wiederaufarbeitungsanlage zugeführt werden.

Wiederaufarbeitung

Die Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen ist ein Verfahren, das teils aus mechanischen, teils aus chemischen Einzelschritten besteht. Solche *Anlagen* bestehen zur Zeit in den *USA, Grossbritannien, Frankreich* und eine Demonstrationsanlage in *Deutschland*. Ferner liegen Erfahrungen aus der Demonstrationsanlage in *Belgien* (Eurochemic) vor.

Auch die *Oststaaten,* die *UdSSR* und *China* beherrschen die Wiederaufbereitungstechnik, und *Indien* sowie *Japan* haben solche Anlagen gebaut.

Die Anlage in *La Hague* (Frankreich) hat eine Kapazität von 800 Tonnen im Jahr und die Anlage von *Windscale* (Grossbritannien) wird auf 2000 t Uran im Jahr ausgebaut. Bisher wurden vorwiegend metallische Brennelemente durchgesetzt, doch haben beide auch schon LWR-Brennstoff hohen Abbrandes verarbeitet, so unter anderem solche aus dem KKW *Mühleberg*. Der Vorgang wird in *vier Verfahrensstufen* durchgeführt:

- Empfang und Zwischenlagerung der Brennelemente,
- Head-End-Prozess,
- Extraktion,
- Tail-End-Prozess.

Die bestrahlten Brennelemente werden vor ihrem Transport mindestens sechs Monate in *Abklingbecken des Reaktors* gelagert. In dieser Zeit zerfallen die kurzlebigen Isotope, wodurch die Wärmeentwicklung und der Aktivitätspegel wesentlich gesenkt werden.

In der Wiederaufarbeitungsanlage verbleiben die Brennelemente bis zur weiteren Verarbeitung in grossen Wasserbecken gelagert. Defekte Elemente werden in Büchsen verschlossen. Das Wasser, das zur Abschirmung der Aktivität und zur Kühlung dient, wird im geschlossenen Kreislauf über Ionenaustauscher ständig gereinigt und gekühlt. Alle Einrichtungen sind gegen Kritikalität abgesichert und gegen Einwirkungen von Aussen, d.h. Erdbeben, Flugzeugabsturz, Explosion geschützt.

Der *Head-End-Prozess* umfasst das mechanische Zerlegen und Zerschneiden der Elemente in kleinere Stücke und das Auflösen von Uran, Plutonium und Spaltprodukten durch konzentrierte Salpetersäure. Zurück bleiben die unlöslichen metallischen Bestandteile aus Zirkon und rostfreiem Stahl, die abfiltriert werden.

Beim Zuschneiden und Auflösen werden die gasförmigen radioaktiven Spaltprodukte (Jod, Tritium, Krypton-85) einer besonderen Abgasbehandlung unterworfen und sicher gelagert. Die Brennstofflösung wird der Extraktionsanlage zugeführt.

Die *Extraktion* beruht in den meisten Anlage auf dem sog. *Purexprozess*. Man macht dabei von der Tatsache Gebrauch, dass eine organische Lösung (Tributylphosphat und Petroleum), die sich mit Wasser nicht vermischt, aus der wässerigen Lösung Uran und Plutonium extrahiert, nicht aber die Spaltprodukte. Mit einem zweiten Schritt wird das Plutonium vom Uran getrennt.

Die hochaktive, wässrige Lösung, die ca. 99,9% der Spaltprodukte enthält, wird eingedampft und bis zur endgültigen Konditionierung (Verglasung) in rostfreien Stahltanks zwischengelagert.

Unter *Tail-End* versteht man die Herstellung der Endprodukte Uranylnitrat, Plutoniumnitrat bzw. deren Oxide. Die Technik ist heute so weit fortgeschritten, dass weniger als 1% des Plutoniums in den Anlageteilen und in den Abfallösungen zurückbleibt. Auch diese geringen Mengen werden als Abfall einer strengen Kontrolle unterworfen und gehen in der Kontabilität nicht verloren.

Das Wiederaufarbeitungsverfahren ist bezüglich Sicherheit insofern ein einfacher Prozess, als es bei normalem Druck und bei Temperaturen bis maximal 130° abläuft. Der Schutz vor radioaktiver Strahlung wird dadurch gewährleistet, dass alle Einrichtungen in einem geschlossenen System, in sog. Heissen Zellen eingebaut sind und die Gebäude ein doppeltes Containment aufweisen. Auch die Kritikalitätssicherheit ist durch bauliche und verfahrenstechnische Massnahmen sichergestellt.

Behandlung radioaktiver Abfälle

Grundsätzlich unterscheidet man *drei Abfallklassen* aufgrund der spezifischen Aktivität, die in Curie/m³ gemessen wird:

1. Hochaktive Abfälle (HAW) $> 10^4$ Ci/m³
2. Mittelaktive Abfälle (MAW) 0,1—10^4 Ci/m³
3. Schwachaktive Abfälle (LAW) $< 0{,}1$ Ci/m³

Im *Normalbetrieb* fallen bei den Kernkraftwerken nur *schwach- und mittelaktive Abfälle* an. Die hochaktiven Abfälle sind vorerst in den Brennelementen fest eingeschlossen und treten erst in der Wiederaufarbeitungsanlage in Erscheinung. Das Endziel für alle Arten ist jedoch das gleiche, nämlich die *Verfestigung und Umhüllung mit einer stabilen Verpackung* und die *sichere Isolierung von der Biosphäre*.

Die *schwach- und mittelaktiven Abfälle,* die in der *Schweiz* in der Zeit von 1969 bis 1977 aus Forschung, Industrie, Medizin und den KKW angefallen sind, konnten in 3773 Fässer verpackt und im Meer versenkt werden. Diese Menge wird mit der Inbetriebnahme weiterer KKW ansteigen und im Jahre 1990 ca. 800 Fässer im Jahr ausmachen.

Mit *hochaktiven* Abfällen ist *nicht vor 1990* zu rechnen, da sie vorerst in den Wiederaufarbeitungsanlagen als konzentrierte Lösung gelagert werden. Mit der *grosstechnischen Verglasung* werden diese Lösungen in ein festes, stabiles Produkt übergeführt. Dabei wird das Volumen rund um den Faktor 10 verringert. Aus einem Reaktor von der Grösse des KKW *Gösgen* werden so letztlich im Jahr nur ungefähr 3 m³ an verfestigtem hochaktivem Abfall zu beseitigen sein.

Grundsätzlich werden auch alle mittel- und schwachaktiven Abfälle verfestigt und in eine *feste Matrix* eingeschlossen, wobei *Zement oder Bitumen* verwendet wird. Als *Behälter* werden *200-Liter-Standardfässer* verwendet. Die Verpackung samt radioaktivem Inhalt muss den Vorschriften des Strassen- und Bahntransportes genügen. Ein grösserer Teil der festen Ab-

fälle ist brennbar und eignet sich deshalb zur *Veraschung* in einer Verbrennungsanlage, wobei das Volumen um den Faktor 80 vermindert wird. Die Aktivität bleibt nahezu vollständig in der Asche, die mit Zement verrührt und verfestigt wird.

Die Verfahren für hochaktiven Abfall basieren auf jahrelangen Versuchen in Demonstrationsanlagen, in denen bis heute ca. 10 t hochaktives Glas mit rund 4 Millionen Curie an Spaltprodukten hergestellt wurden. Sowohl in *Marcoule* (Frankreich) als auch in *Windscale* (England) sind Grossanlagen in Betrieb und Erweiterungen im Bau. Auch in *Deutschland* wird an ähnlichen Verfahren gearbeitet. Die Borosilikatblöcke enthalten bis zu 25% Spaltproduktoxide; je Tonne aufgearbeitetes Schwermetall aus den Brennelementen entstehen also ca. 70 Liter Glas. Ausgehend vom Spaltinventar beim Ausbau der Elemente aus dem Reaktor klingt die anfängliche Aktivität im ersten Jahr während der Lagerung in den Wasserbecken schon bis auf ca. 1,5% des Anfangswertes ab.

Nach der Auflösung bleibt die Nitratlösung weitere 5—10 Jahre in den *Zwischenlagertanks,* wobei nochmals 75% der Aktivität abklingt. Die Verglasung wird dadurch wesentlich erleichtert. Der verfestigte Abfall kann ohne Schwierigkeiten während Jahrzehnten in *oberirdischen Bauwerken* zwischengelagert werden, bevor er endgültig in das Endlager übergebracht wird.

Endlagerung

Alle Länder, die Kernforschung und Kerntechnik betreiben, stehen vor dem Problem der sicheren Beseitigung der radioaktiven Abfälle, wobei die *Endlagerung in geologischen Formationen als die optimale Möglichkeit* betrachtet wird. In der *Bundesrepublik Deutschland* hat man bereits positive Erfahrungen mit der *Versuchsanlage Asse* gemacht und auch der Einlagerung hochaktiver Abfälle in *Salzstöcke* steht grundsätzlich nichts mehr entgegen. In *Italien* und *Belgien* werden vorwiegend *Tonschichten,* in *Schweden Granit* und in der *Schweiz* verschiedene Formationen, u.a. Anhydrit, geprüft. In den *USA* ist ein Endlager in einer *tiefen Salzschicht* im Bau.

Schwach- und mittelaktive Abfälle — die, wie schon beschrieben, in Fässern einbetoniert geliefert werden — werden einfach in grossen *unterirdischen Kavernen gestapelt und dann zugemauert.* Die *Standzeit* eines solches Lagers kann mit *400 Jahren* angegeben werden, weil in dieser Zeit die Aktivität so weit abgeklungen ist, dass sie mit der einer Uranmine verglichen werden kann.

Zur Zeit werden schwach- und mittelaktive Abfälle unter Aufsicht der *Nuclear Energy Agency* (NEA) der OECD *im Meer versenkt.* Die *Schweiz* hat sich an verschiedenen solchen Aktionen im *Nordatlantik, etwa 2000 km westlich der Kapverdischen Inseln,* beteiligt. Das Versenkungsgebiet, das in einer *Tiefe von 4500 m* liegt und die Art und Menge der Abfälle werden genau erfasst. Diese Art der Endlagerung ist recht aufwendig und teuer.

Für die hochaktiven Abfälle werden in den *unterirdischen Kavernen Bohrlöcher in die Sohle vorgetrieben,* die geometrisch so angeordnet sind, dass die aus dem Zerfall der Radioisotope resultierende Wärme zu keiner übermässigen Erhitzung führt. Durch das *Verschliessen der Lagerkammern* wird der Kontakt der radioaktiven Abfälle mit der Aussenwelt erschwert. Sollte es zum grössten anzunehmenden Unfall — dem *Wassereinbruch* — kommen, würden die Radionuklide wegen der Verfestigung der Abfälle nur sehr langsam ausgelaugt. Ein eigentliches Ausschwämmen durch Konvektion ist nicht möglich, sodass die Freisetzung der Radionuklide vorwiegend durch Diffusion denkbar wäre. Aufgrund von Versuchen und Rechnungen lässt sich dabei für einen Zeitraum von 10000 Jahren ein Weg von einigen hundert Metern abschätzen. Eine Gefährdung des Grundwassers und damit des Biozyklus ist somit selbst beim Eintreten dieses maximalen Störfalles wenig wahrscheinlich.

Neben dem Einschluss in geologische Formationen werden auch andere Methoden diskutiert, die aber zu teuer oder zu unsicher sind. Eine dieser Möglichkeiten ist die Transmutation der langlebigen Abfälle, d.h. die *Umwandlung in stabile und kurzlebige Isotope durch den Einfang von Neutronen.* Ein weiterer Vorschlag, der vor allem in den *USA* diskutiert wurde, ist der *Abschuss der Abfälle in den Weltraum.* Von gewissem Interesse hingegen ist die Idee, *im Meeresboden Bohrlöcher von 800 m Tiefe* vorzutreiben, sie mit Abfallkannen zu füllen und die *obersten 200 m wieder mit Beton und Sedimenten zu verriegeln.* Solche Lösungen sind jedoch nur auf der Basis internationaler Zusammenarbeit möglich.

Adresse des Verfassers: *K.H. Buob,* Dr.sc.nat., Lindhofstrasse 66, 5200 Windisch.

Ziele des Strahlenschutzes bei Kernkraftwerken aus der Sicht der Behörde

Von **Fritz Alder**, Gebenstorf

Die gesetzlichen Grundlagen, zusammen mit dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik, erlauben ohne Zweifel die Durchsetzung eines wirkungsvollen Strahlenschutzes. Im Gegensatz zu vielen Schadstoffemissionen als Folge der konventionellen Technik genügen die Kenntnisse auf dem Gebiet des Strahlenschutzes, um die möglichen Folgen des Betriebes von Kernkraftwerken vorauszusehen und unter Kontrolle zu bringen. Eine quantitative Abschätzung der Folgen aus dem Normalbetrieb von Kernkraftwerken zeigt, dass bei den heutigen Anforderungen der Sicherheitsbehörde das Strahlenrisiko vernachlässigbar ist. Unfälle, die zu einer signifikanten Erhöhung von Krebsfällen und genetischen Schäden in der Umgebung einer Anlage führen oder akute Strahlenerkrankungen hervorrufen können, werden seltener als einmal in 1 Million Jahren erwartet.

Im ersten Artikel dieser Serie «Sicherheit von Kernkraftwerken» [1] wurde bereits darauf hingewiesen, dass die *Sicherheit ein relativer Begriff* ist. Die Technik arbeitet darum auch meist mit dem *komplementären* Begriff *«Risiko» als Funktion der Wahrscheinlichkeit,* mit der ein Schaden auftritt und dem Ausmass des Schadens. Nun kann zwar durch Massnahmen aller Art die Wahrscheinlichkeit immer kleiner gemacht werden; Null wird sie nie, das heisst es wird *immer ein Restrisiko* verbleiben.