

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 64 (1973)

Heft: 16

Artikel: Wohin mit den radioaktiven Abfällen aus der Gewinnung von Atomkernenergie?

Autor: Rometsch, R.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-915591>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 21.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Energie-Erzeugung und -Verteilung

Die Seiten des VSE

Elektrizität und Umwelt

Eine Tagung des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Wohin mit den radioaktiven Abfällen aus der Gewinnung von Atomkernenergie?

Von R. Rometsch

Eine rege öffentliche Diskussion befasst sich seit Jahren immer wieder mit der industriellen Gewinnung von Energie aus Atomkernen. Die Spaltung schwerer Kerne, der Elemente Uran und Plutonium, ist zurzeit das einzige Verfahren von praktischer Bedeutung. Es ist gekoppelt mit einer auffälligen Begleiterscheinung: der Erzeugung künstlicher radioaktiver Stoffe. Sie werden summarisch als «Atomabfälle» bezeichnet und als Mittelpunkt eines entscheidenden Problemkreises der Atomenergiegewinnung dargestellt. Tatsachen und Meinungen wirbeln dabei oft bunt durcheinander.

Ich möchte hier versuchen, die wesentlichen Tatsachen zu vermitteln, die zur Beantwortung der Titelfrage benötigt werden. Getrennt von der Tatsachendarstellung werde ich im Schlussabschnitt auf die Beurteilung des «Problems» eingehen und dann auch mit meiner Meinung nicht hinter dem Berg halten.

Drei Hauptgruppen von Fragen sind mit Tatsachenmaterial zu beantworten.

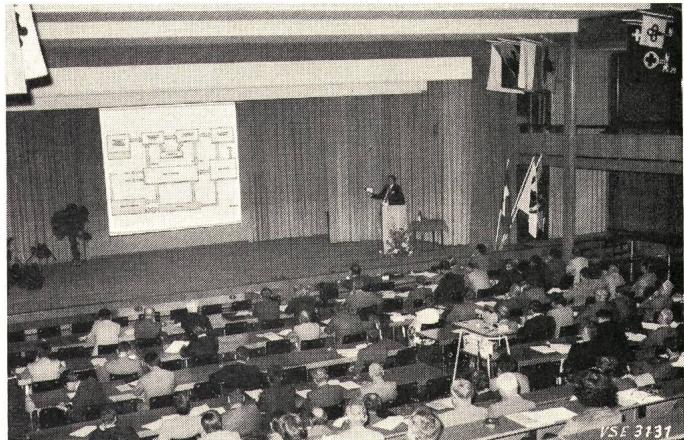
1. Welcher Art und Menge sind die radioaktiven Stoffe, die in den verschiedenen Teilen des Kernbrennstoff-Kreislaufes anfallen?

2. Welche Prinzipien werden angewendet, welche Gesetze, Vorschriften und internationalen Übereinkünfte gibt es, die den Verbleib der radioaktiven Abfälle regeln?

3. Welcher Art sind die entwickelten und erprobten Verfahren zur Behandlung und Lagerung dieser radioaktiven Stoffe?

Der Kernbrennstoff-Kreislauf und seine Abfallprodukte

Um einen Überblick über die verschiedenen Abfallarten und ihren Entstehungsort zu bekommen, muss der gesamte Brennstoffkreislauf betrachtet werden. Er besteht aus mehreren Fabrikanlagen, die weit auseinander liegen können und jeweils einige Verfahrensstufen zusammenfassen. In Fig. 1 ist der Brennstoffkreislauf der heute gebräuchlichsten Leichtwasserreaktoren zugrunde gelegt. Andere Reaktortypen erfordern ähnliche Betriebseinrichtungen; für Hochtemperaturreaktoren mit Thoriumzyklus sind die alternativen Zwischenprodukte in Klammern im Diagramm (Fig. 1) eingezeichnet.



Ausgangspunkt für den Kernbrennstoff-Kreislauf ist die Gewinnung von Uran (bzw. Thorium) aus der Natur. Im allgemeinen sind die Uranerze niedrigprozentig; sie enthalten im Durchschnitt einige Kilogramm Uran pro Tonne. Das heißt, es müssen grosse Mengen Gestein aufbereitet werden, was durch Brechen, Mahlen und Auslaugen geschieht. Fast die gesamte Gesteinsmenge bleibt dann als Sand oder staubförmiger Abfall übrig. Dieses Material ist schwach radioaktiv, ungefähr wie das ursprüngliche Gestein; denn es enthält die Zerfallsprodukte des Urans, die auf Grund ihrer verschiedenen chemischen Eigenschaften nicht mit diesen extrahiert wurden und selber weiter radioaktiv zerfallen. Darunter sind gasförmige Elemente, die aus dem Pulver leichter entweichen können als aus dem ursprünglichen Gestein. Deshalb darf man in den USA diese Rückstände nicht mehr als Bausand verwenden. Die riesigen Mengen – bis heute haben sich allein in den Vereinigten Staaten 50 Millionen m³ angezahlt – werden in den Abbaugebieten (oder in der Nähe davon) gelagert, mit Erde überdeckt und zur Vermeidung der Winderosion bepflanzt. Die Konzentration der überall in der Erdatmosphäre vorkommenden radioaktiven Edelgase ist über diesen Lagerstätten leicht erhöht. Die nächsten vier Stufen des Brennstoffkreislaufes – Reinigung und Umwandlung der Urankonzentrate im Uranhexafluorid, Isotopenanreicherung, weitere chemische Umwandlung und Fabrikation der Brennelemente – können bezüglich Abfallproduktion zusam-

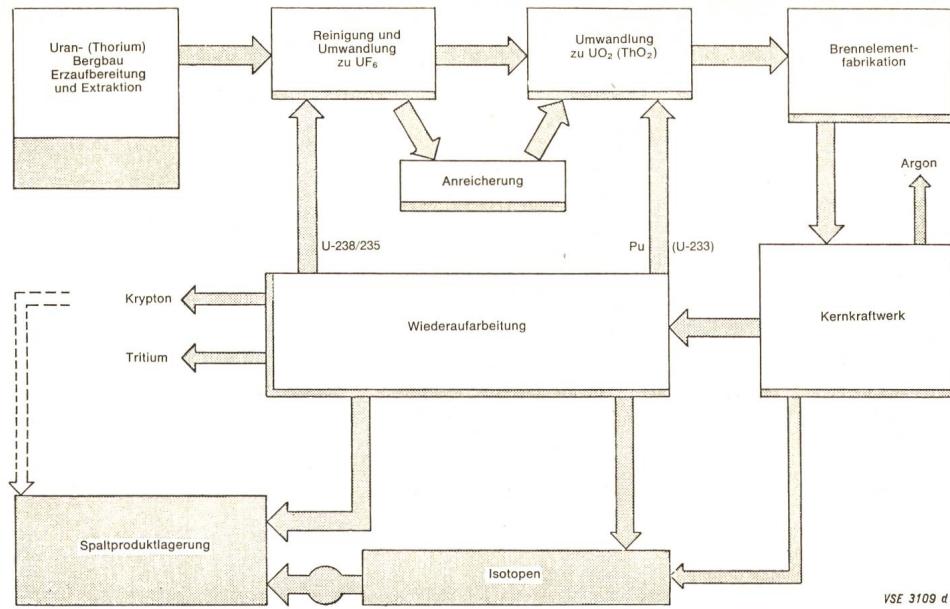


Fig. 1

men betrachtet werden. Sie liefern hauptsächlich feste Abfälle, auch unbrauchbar gewordene Einrichtungsgegenstände, die mit so wenig Uran oder Plutonium verseucht sind, dass es sich einerseits nicht mehr lohnt, diese Elemente zurückzugewinnen, dass aber andererseits die Gegenstände nicht der üblichen unkontrollierten Altstoffverwertung zugeführt werden können.

Erst in der folgenden Stufe des Spaltstoffkreislaufes, im Reaktor z. B. des Kernkraftwerks, treten die besonderen, eigentlichen Nuklearabfälle auf. Es sind die aus der energiependenden Uranspaltung hervorgehenden Spaltprodukte, ein Gemisch vieler verschiedener chemischer Elemente, deren durchschnittliches Atomgewicht der Hälfte des Uranatomgewichts entspricht. Die meisten Spaltprodukte sind radioaktiv, es sind Isotope der altbekannten chemischen Elemente aus dem mittleren Teil des periodischen Systems. Dazu kommen noch, mengenmäßig allerdings beträchtlich weniger, die Aktivierungsprodukte. Die Spaltreaktion ist ja eine durch Neutronen ausgelöste und vermittelte Kettenreaktion; sie geht also in einem intensiven Neutronenfeld vor sich, dem alle Strukturmaterialien und zirkulierenden Hilfsstoffe, wie Kühlmittel, ausgesetzt sind. Alle chemischen Elemente können mehr oder weniger stark Neutronen absorbieren, wobei unter Kernumwandlung Isotope, meist radioaktive, entstehen.

Bis auf den Bruchteil eines Prozentes bleiben die im Reaktor entstehenden Spalt- und Aktivierungsprodukte innerhalb der Brennelemente, verhaftet mit dem Spalt- und dem Hüllensmaterial. Sie verlassen das Kernkraftwerk mit den Brennelementen in abgeschirmten Transportbehältern und können erst in der nächsten Verfahrensstufe, der Wiederaufarbeitung, durch chemische Methoden abgetrennt werden. Das Ziel der Wiederaufarbeitung ist die Rückgewinnung des unverbrauchten Urans, die Isolierung des neu entstandenen Spaltstoffes Plutonium und – damit diese beiden Produkte als Brennstoffe wieder verwendet werden können – die saubere Abtrennung der Spaltprodukte. An dieser Stelle zeichnet sich der Weg der radioaktiven Abfallprodukte als eigener Zweig des Brennstoffzyklus ab, wie in Fig. 1 dargestellt. Die letzte Verfahrensstufe ist die Lagerung der Spaltprodukte, in die

auch alle Nebenströme von Abfallprodukten, nach Umwegen über Isopenanwendungen z. B., einmünden können. Die radioaktiven Abgase, wie aktivierte und tritiumhaltige Luft aus Kernkraftwerken oder Krypton und Tritium aus der chemischen Wiederaufarbeitung, stellen einen Sonderfall dar und werden im Zusammenhang mit den Abfallbehandlungsverfahren besprochen.

Um Ordnung in die in mannigfalter Form auftretenden festen Abfälle zu bringen, teilt man sie in Aktivitätskategorien ein; für den Mengenüberblick genügen drei:

- Rückstände aus der Erzaufbereitung
- schwachaktive feste Abfälle mit den Untergruppen:
 - kontaminierte oder aktivierte Einrichtungsgegenstände
 - kontaminierte Schutzkleidung und Reinigungsmittel
 - Rückstände von der Brennelementfabrikation
 - Filter, Ionenaustauscher und ähnliches aus kontinuierlichen Reinigungskreisläufen
 - in Asphalt oder Beton verfestigte mittelaktive Abfälle
 - hochaktive Abfälle, hauptsächlich Spaltprodukte in gelöster oder verfestigter Form

Für die Abschätzung der möglichen, dauernden Umweltbelastung sind die beiden letzten Kategorien von entscheidender Bedeutung. Um die Vielfalt der Angaben in der heutigen technisch-wissenschaftlichen Literatur über den nuklearen Brennstoffzyklus übersichtlich darzustellen, berechnet man am besten Mittelwerte der Abfallerzeugung, bezogen auf eine vorgegebene Leistung. Den Werten der Tabelle I sind 1000 MW installierte elektrische Leistung unter Verwendung von Leichtwasserreaktoren zugrunde gelegt. Bei 80 % Verfügbarkeit können damit 7 Milliarden kWh pro Jahr erzeugt werden, etwa ein Viertel des heutigen jährlichen Elektrizitätsverbrauches in der Schweiz. Die zugehörige jährliche Abfallproduktion umfasst 20 bis 200 m³ niedrigaktive und etwa 2 m³ hochaktive feste Stoffe.

Zur Vervollständigung des Bildes muss die Ansammlung der Abfälle über einen weiteren Zeitraum errechnet werden unter Berücksichtigung der voraussehbaren Zunahme der Kernenergieerzeugung. Es resultieren die Werte der Tabelle II für die Ansammlung bis zum Jahr 2000, wenn ange-

nommen wird, dass dann etwa 2 Millionen MWe Kernkraftwerksleistung auf der ganzen Welt, davon 10 000 MWe in der Schweiz, installiert sind.

Es ist zu beachten, dass diese Zahlen eine doppelte Akkumulierung über Zeit und über ein Land oder die ganze Welt darstellen. Um die Perspektive nach der anderen Seite zu erfassen, haben zwei amerikanische Autoren errechnet, wieviel radioaktive Abfälle pro Mensch entstehen, der sein Leben lang mit Kernenergie versorgt wird. Bezogen auf heutige Verhältnisse und eine mittlere Lebenserwartung von 70 Jahren erhielten sie weniger als einen Liter pro Person.

Prinzipien, Gesetze und Vorschriften

Als es Mitte der fünfziger Jahre klar wurde, dass die friedliche Nutzung der Kernenergie schon im nächsten Jahrzehnt breite praktische Bedeutung erlangen könnte, setzte eine weltweite Diskussion und technologische Erforschung des Abfallproblems ein. Die Grundfrage lautete: Kann man die entstehenden radioaktiven Substanzen schadlos in die Natur verdünnen, oder muss man sie konzentrieren und in besonderen Anlage unter Kontrolle beisammenhalten? Beide Möglichkeiten wurden eingehend untersucht, beide werden benutzt; die Kriterien zur Einweisung der Abfälle in die eine oder andere Behandlungsart haben sich jedoch mit der Zeit etwas verschoben.

Die Internationale Kommission für Strahlenschutz (ICRP, Int. Commission on Radiological Protection) erarbeitete Empfehlungen über «maximal erlaubte Konzentrationen» in Luft und Wasser für alle Radioisotopen. Zusammen mit zusätzlichen Erkenntnissen und Annahmen über biologische Kreisläufe von Radioisotopen gestatteten sie, die Abfälle in zwei grosse Gruppen aufzuteilen: in solche, die unter allen Umständen eingeschlossen und unter Kontrolle gehalten werden müssen, und in solche, die von den verschiedenen Medien unserer Umgebung aufgenommen werden können. Ausgedehnte Versuchsprogramme im Zusammenhang mit sorgfältig erwogenem stufenweisem Freisetzen radioaktiver Stoffe und genaue Untersuchung der wenigen Fälle unfreiwilligen Entweichens haben die Basis für die Gruppeneinteilung geschaffen. Es sind hauptsächlich die nationalen Atom-

energielaboratorien in allen Ländern, die diese Arbeit, vor allem den experimentellen Teil davon, geleistet haben und weiter leisten. Dazu kommen die Studien der regionalen und internationalen Organisationen, die auch für Erfahrungs- und Meinungsaustausch sorgen und Gesamtergebnisse in Monographien, Berichten und Empfehlungen festhalten.

Diese Schriften, die periodisch überarbeitet, in Expertengruppen erneut diskutiert und in revidierter Form wieder herausgegeben werden, geben den jeweiligen Stand der Technik an. Darüber hinaus spiegeln sie den Wandel der anerkannten Grundsätze wider. Danach hat sich z. B. die Trennlinie zwischen den Verfahrensprinzipien «Verdünnen/Abgeben» und «Konzentrieren/Kontrollieren» eindeutig zugunsten des letzteren verschoben.

Die Empfehlungen der internationalen Organisationen dienen oft als Grundlage für nationale Gesetze und Verordnungen. Es muss allerdings festgestellt werden, dass die gesetzlichen Bestimmungen über Abfallbehandlung und -lagerung in den einzelnen Ländern, auch in denjenigen mit hochentwickelten nuklearen Tätigkeiten, noch sehr allgemein gehalten sind. In den seltensten Fällen gehen sie über die Feststellung der Bewilligungspflicht jeder nuklearen Tätigkeit, inklusive Abfallbehandlung, hinaus. Belgien, Finnland, Frankreich, die Schweiz und die USA schreiben die Lagerung in bestimmten Behältern vor. In den Ländern der Europäischen Gemeinschaft sind Vorhaben, radioaktive Abwasser abzulassen, von der Kommission begutachtet zu lassen (Art. 37 des Euratom-Vertrages). Frankreich und die USA gestatten Versenken im Meer nur ausnahmsweise; in den USA gibt es außerdem eine Mengenbeschränkung für das Vergraben von radioaktiven Abfällen und ein allgemeines Verbot, solche zu verbrennen.

In der Bundesrepublik müssen die Abfälle in vorgeschriebener Verpackung den Landessammelstellen übergeben werden, während in der Schweiz das Departement des Innern mindestens einen Lagerplatz zur Verfügung halten muss und außerdem vorgeschrieben wird, flüssige radioaktive Abfälle «nach Möglichkeit» zu verfestigen. Damit wäre der Reigen der zurzeit in den einzelnen Ländern gültigen gesetzlichen Sonderbestimmungen bereits abgeschlossen.

Vor einigen Jahren wurde in den Vereinigten Staaten von Amerika ein Vorstoß unternommen, eine spezifische, allgemeingültige Gesetzgebung zur Regelung der Abfallbehandlung einzuführen. Danach sollten alle radioaktiven Abfälle innerhalb der ersten fünf Jahre nach ihrem Entstehen verfestigt werden und innerhalb der zweiten fünf Jahre einem zentralen, staatlich kontrollierten Lager zugeführt werden. Eine entsprechende Grundsatzklärung über die Lizenzierung von neuen Anlagen zur Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen wurde Ende 1971 wirksam. Die zurzeit noch hängigen Betriebsbewilligungen für zwei solche Anlagen werden demnach Auflagen bezüglich der Verfestigung und des Abtransports der hochaktiven Abfälle enthalten. Allerdings ist der Lagerplatz, der Eigentum der Bundesregierung sein soll und unter deren Kontrolle zu stehen hat, noch nicht gefunden. Die Erforschung aller Möglichkeiten, Pläne für Errichtung und Betrieb, inklusive Aufstellung eines Benutzungstarifs, werden gemeinsam von der Atomenergiekommission und der Umweltschutzagentur durchgeführt.

Im November 1972 hat eine durch Vermittlung der Vereinten Nationen in London tagende Konferenz, an der Delega-

Brennstoffkreislauf: Leichtwasserreaktoren

Tabelle I

Leistung	1000 MWe
Produktion	7 · 10 ⁹ kWh/Jahr
Verbrauch	35 Tonnen/Jahr angereichertes Uran
Abfälle	Niedrigaktiv, fest 20 bis 200 m ³ /Jahr Hochaktiv, Lösung 20 bis 30 m ³ /Jahr oder verfestigt 2 m ³ /Jahr

Abfallakkumulierung bis zum Jahr 2000

Tabelle II

	Welt	Schweiz
Installierte Leistung	2 000 000	10 000 MWe
Feste und verfestigte Abfälle		
Niedrigaktiv: Kreislauf	500 000	3 000
	bis 5 Mio	bis 30 000 m ³
Nur Reaktoren		1 000
		bis 10 000 m ³
Hochaktiv: Kreislauf	50 000	350 m ³
Nur Reaktoren		—

tionen von 60 Regierungen teilgenommen haben, eine Konvention zur Verhinderung der radioaktiven Verseuchung der Meere ausgearbeitet. Danach werden die radioaktiven Materialien in drei Gruppen eingeteilt; diejenigen der ersten Gruppe dürfen überhaupt nicht ins Meer versenkt werden, diejenigen der anderen zwei Gruppen nur mit besonderer oder allgemeiner Bewilligung. Die Internationale Atomenergie-Organisation (in Wien) ist beauftragt, die Materiallisten für die drei Gruppen auszuarbeiten; die «London Convention» liegt zur Unterzeichnung und Ratifikation auf.

Verfahren zur Behandlung und Lagerung radioaktiver Abfälle

Die Ursache der Diskussion um Prinzipien und der gesetzgeberischen Bemühungen sind die Naturgesetze des radioaktiven Zerfalls. Sie bilden auch den Ausgangspunkt der zahlreichen Anstrengungen um die Erforschung und Entwicklung von Verfahren zur Behandlung und Lagerung radioaktiver Abfälle.

Fast alle Behandlungsmethoden gehen darauf aus, die Wirkungen der radioaktiven Strahlung auf das organische Leben während der ganzen Dauer ihres Auftretens auszuschliessen. Die Ausnahme bilden die Vorschläge, durch weitere Kernumwandlung die radioaktiven, zerfallenden Stoffe direkt oder auf dem Umweg über kurzlebige in stabile, nicht strahlende Materie überzuführen. Die extremen theoretischen und technischen Schwierigkeiten eines solchen Vorgehens stemmen es jedoch zum Gedankenexperiment.

Die Verfahren mit praktischer Bedeutung gehen alle von den gegebenen unveränderlichen Zerfallskonstanten der radioaktiven Stoffe aus. Sie werden als «Halbwertszeiten» angegeben; das ist diejenige Zeit, in der die Hälfte der ursprünglich vorhandenen Stoffmenge zerfallen ist oder, anders ausgedrückt, die Strahlenintensität der vorgegebenen Art von Atomkernen auf die Hälfte abgesunken ist. In der Tabelle III sind die Halbwertszeiten der für die Abfallbehandlung massgebenden radioaktiven Isotopen angegeben. Sie bestimmen durch ihre Strahlungseigenschaften und durch die Häufigkeit, mit der sie auftreten, den Charakter der hochaktiven Abfälle. Das bekannte Strontium-90 macht etwas über 5 % der im Reaktor entstehenden Spaltprodukte aus. Im unteren Teil der Tabelle sind auch Halbwertszeiten für ausgesuchte Transurane angegeben, Stoffe, die ebenfalls in den Kernbrennstoffen entstehen. Dominierend wegen seiner Strahlenoxizität, seiner langen Halbwertszeit und der anfallenden Mengen ist das Plutonium-239.

Die Verfahren zur Behandlung radioaktiver Abfälle sind alle darauf ausgerichtet, das Material in eine Form zu bringen und an einen solchen Ort zu verschieben, dass es bis zum

Halbwertszeiten

Tabelle III

<i>Spaltprodukte</i>		<i>Transurane</i>	
Tritium	12,3 Jahre	Plutonium-238	88 Jahre
Krypton-85	10,8 Jahre	Plutonium-239	24 413 Jahre
Strontium-89	51 Tage	Americium-241	432 Jahre
Strontium-90	28 Jahre	Curium-244	18 Jahre
Ruthenium-106	1 Jahr		
Jod-131	8 Tage		
Caesium-137	30 Jahre		
Promethium-147	2,6 Jahre		

Abklingen seiner Radioaktivität der unmittelbaren Umwelt des Menschen ferngehalten bleibt. Wie lange das dauern soll, hängt von der Halbwertszeit des langlebigsten Stoffes in einem Gemisch ab. Für reine Spaltstoffprodukte ergeben sich, wegen der Halbwertszeiten von Strontium-90 und Cäsium-137 von 30 Jahren, mehrere hundert Jahre. Sind wesentliche Mengen von Transuranen im Gemisch, insbesondere Plutonium-239, dann muss die abgesonderte Lagerung endgültig sein, d. h., es sind geologische Zeiträume in Betracht zu ziehen: man spricht dann von Endlagerung. Obwohl man im Prinzip das Plutonium als wertvolles Spaltmaterial sorgfältig abtrennt zur weiteren Verwendung als Kernbrennstoff, bleiben doch oft Mengen im Abfall zurück, die einerseits zu gering sind, um eine weitere Aufarbeitung zu rechtfertigen, jedoch genügend hoch, um den Charakter des Abfalls zu verändern. Deshalb ist die Abfallbewirtschaftung praktisch in allen Varianten auf Endlagerung ausgerichtet.

Ein typisches solches Bewirtschaftungsschema ist in Fig. 2 dargestellt. Es berücksichtigt mit Ausnahme der Uranerzrückstände alle Abfälle des gesamten Brennstoffkreislaufs. Endpunkt sind zwei Lagerstätten, für niedrig- und hochaktive feste Produkte. Alle radioaktiven Abfälle sollen hier zusammenlaufen und in kontrollierten Endlagern bleiben. Nur niedrigaktive Destillate und Filtrate, die im Vorfluter unterhalb der «maximal erlaubten Konzentration» liegende Aktivitäten ergeben, werden in die natürlichen Gewässer abgelassen. Radioaktive Abgase, wie sie in geringeren Mengen beim Betrieb von Kernkraftwerken und in etwas grösseren Mengen beim Wiederaufarbeiten der Kernbrennstoffe auftreten, sind nicht im Schema erwähnt. Bei den Reaktorabgasen handelt es sich um Aktivierungsprodukte von Bestandteilen der Luft, von denen das Edelgas Argon-41 die längste Halbwertszeit (nicht ganz zwei Stunden) besitzt, und um flüchtige Spaltprodukte, die in ganz geringer Menge aus dem Brennstoff heraus diffundieren. Es ist ohne technische Schwierigkeiten möglich, die an die Umgebung abgegebene Menge dieser Stoffe weit unterhalb der Toleranzgrenzen zu halten, weshalb sie nicht im Abfallbewirtschaftungsschema für Reaktorstationen aufscheinen. Anders ist die Situation für das bei der Wiederaufarbeitung auftretende Abgas Krypton-85 und das Tritium, die beide heute noch in die Atmosphäre entweichen gelassen werden. Berechnungen für Westeuropa ergeben, dass Krypton-85 Ende der achziger Jahre und Tritium in den neunziger Jahren kondensiert, abgetrennt und zurückgehalten werden müssen. Verfahren dazu sind bekannt und technisch ausgearbeitet.

Die grundlegende Idee des Schemas Fig. 2 – nur niedrigste Aktivitäten in die Natur, die mittel- und hochaktiven in fester Form ins Endlager – wird heute allgemein anerkannt und in die Planung einbezogen, wenn auch die praktische Durchführung in grosstechnischem Maßstab noch nicht alle Stufen umfasst. Ich möchte deshalb dieses Schema verwenden, um den Stand der Verfahrenstechnik an den Schlüsselpunkten kurz zu beschreiben.

Die Überführung niedrig- und mittelaktiver Abfälle in für die Endlagerung geeignete feste Formen geschieht nach einfachen und erprobten Verfahren: Abfüllen in Blechfässer, Vergießen mit Asphalt oder Zement je nach Aktivitätsniveau, Eindampfen und Inkorporieren des Rückstandes in Bitumen im Knetmischer usw.

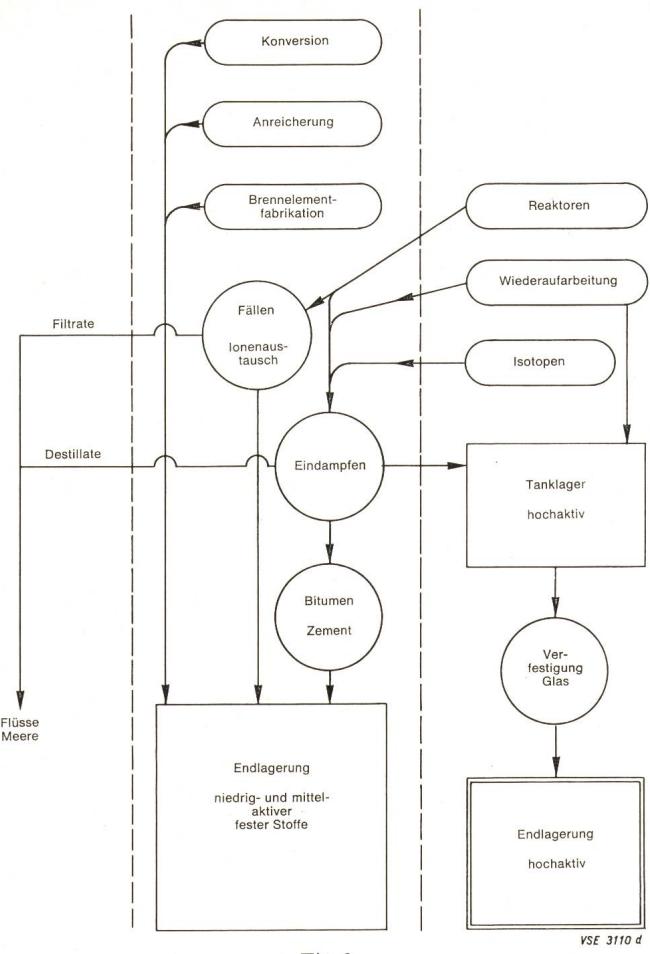


Fig. 2

Auf der hochaktiven Seite, wo über 99 % aller als Folge der Kernenergieproduktion erzeugten radioaktiven Abfälle zusammenlaufen, wird heute vielerorts noch die Endlagerung von Lösungen in Tanks praktiziert. Diese Tanks sind mit mehreren unabhängigen Kühlschlängen zum Abführen der Zerfallswärme, Doppelwandung aus rostfreiem Stahl und dazwischen unter Druck zirkulierendem Kühlwasser und mit Warninstrumentierung ausgerüstet. Sie sind in oder in der Nähe von Wiederaufarbeitungsanlagen im Gebrauch. In allen Fällen ist jedoch, mindestens in der Planung, die Möglichkeit, die Abfalllösungen früher oder später zu verfestigen, in Betracht gezogen.

Gegen zwanzig Varianten von Verfestigungsverfahren wurden in einer ganzen Reihe von Ländern in Versuchsanlagen ausprobiert, einige auch in grösserem Maßstab durchgeführt. Die drei Grundtypen sind:

1. Eindampfung und Hitzeumwandlung der Rückstände in Oxyde in Stahlbehältern, die direkt zur Endlagerung gehen.
2. Wirbelschichteindampfung von Lösungen, die eine Trägersubstanz, z. B. Aluminiumoxyd, enthalten und Lagerung in luftgekühlten Stahlkübeln.
3. Eindampfen und Einschmelzen der Rückstände in Glaskörpern verschiedenster Zusammensetzungen.

Die letztere Gruppe von Verfahren ist bisher wohl am eingehendsten studiert und ausprobiert worden. Man hat hauptsächlich darauf geachtet, die Glaszusammensetzung so zu gestalten, dass eine möglichst geringe Auslaugbarkeit der radioaktiven Stoffe resultiert. Deshalb ist man von den anfänglich bevorzugten, weil leicht herstellbaren Phosphatgläsern abgekommen und zieht heute Borsilikatgläser vor. Bei

den langen Lagerzeiten bei erhöhter Temperatur muss man jedoch in jedem Fall mit Entglasung, Kristallisation und Zunahme der Auslaugbarkeit rechnen. In jedem Fall kommen die Glaskörper in dem Gefäß, in dem sie erstarrt sind, in das Endlager.

Was nun die eigentliche Endlagerung anbetrifft, so sind dafür auch unzählige Alternativen diskutiert worden. Etliche davon zeugen von viel menschlicher Phantasie und Vorstellungskraft. Ich beschränke mich darauf, die zwei Gruppen von Möglichkeiten kurz zu diskutieren, die in der einen oder anderen Form bereits realisiert worden sind oder zur konkreten Planung geführt haben.

Die naheliegendste und auch vielfach praktizierte Lösung ist die Errichtung von entsprechenden Gebäuden. Die Tanks zur Lagerung von hochaktiven Spaltproduktlösungen z. B. sind aus Abschirmungsgründen in Gewölben mit 1½ m dicken Betonwänden untergebracht, die damit auch eine gewisse Dauerstandfestigkeit garantieren. Aber auch die Lagerung von Glaskörpern in Betonstrukturen gleich neben der Fabrikationsanlage wurde eingehend projektiert.

Sehr eingehend untersucht wurde auch der Aushub von Kavernen, möglichst tief unter der Erde, in ausgesuchten geologischen Formationen. Noch im Planungsstadium befindet sich eine Methode zur Schaffung von Lagerraum, 2000 m unter der Erdoberfläche, z. B. mit Hilfe eines Kernsprengsatzes oder anderer Sprengmittel. In Silikatgestein würde dadurch ein Hohlraum von 100 bis 200 m Durchmesser geschaffen. Durch ein Bohrloch soll direkt die hochaktive Spaltproduktlösung eingefüllt werden. Die Zerfallswärme lässt die Lösung eindampfen, der Dampf wird über einem zweiten Bohrloch kondensiert. Wenn sich genügend Rückstand angesammelt hat, schmilzt dieser mit dem umliegenden Gestein zusammen und wird beim Wiedererstarren als Fels fixiert.

Tatsächlich verwirklicht ist die Tieflagerung von radioaktiven Abfällen in einer Salzkaverne in der deutschen Bundesrepublik. Lagerkavernen in Salzstöcken wurden deshalb vorgeschlagen, weil allein die Existenz der Salzlagerstätten beweist, dass diese mit unterirdischen Wässern fast keinen Kontakt haben, sonst wären sie in dem geologischen Zeitraum seit ihrer Entstehung (über 100 Millionen Jahre) mit Sicherheit aufgelöst worden. Außerdem erlauben die mechanischen Eigenschaften des Salzgestein, grosse Hohlräume ohne Absstützung anzulegen. Die Plastizität des Salzes verhindert dabei die Bildung von Spalten und Klüften, und die gute Wärmeleitfähigkeit ermöglicht das Abführen der Zerfallswärme.

Als 1964 ein grösseres Salzbergwerk bei Wolfenbüttel stillgelegt wurde, hat die von der Bundesregierung finanzierte Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung darin zunächst mit versuchsweiser Tieflagerung von radioaktiven Abfällen begonnen. Bis heute sind über 20 000 zum Teil betonierte Fässer niedrigaktiver Abfälle eingelagert. Es ist auch eine Kaverne für die Lagerung mittelaktiver Abfälle eingerichtet worden, in die Fässer direkt aus den abgeschirmten Transportbehältern eingelassen werden können. Ferner wird zurzeit eine der tiefstliegenden Kavernen (800 m unter Tag) für die Aufnahme von hochaktiven Glaszylinern in Bohrlöchern hergerichtet. Der allein im ehemaligen Salzbergwerk Asse zur Verfügung stehende Kavernenraum reicht zur Einlagerung aller in der Bundesrepublik bis zum Jahr 2000 auf

Grund der voraussehbaren Kernenergieproduktion erzeugten Abfälle aus. Weitere ausgedehnte Salzformationen sind bekannt.

Zusammenfassende Schlussfolgerungen

Soweit ein Überblick über die Tatsachen. Es ist notgedrungen ein kurзорischer Überblick; denn das über die angesprochene Frage in der Fachliteratur veröffentlichte Material könnte eigentlich nur in einem mehrwöchigen Seminar gebührend behandelt werden.

Wie versprochen, möchte ich Ihnen abschliessend meine Beurteilung der Möglichkeiten zur Abfallbehandlung, meine Meinung zum «Problem Atomabfälle» mitteilen. Ich möchte betonen, dass es sich um meine *persönliche* Meinung handelt; meine einzige Entschuldigung, Sie damit zu belästigen, ist die Hoffnung, dass ich in den nun mehr als 25 Jahren beruflicher Auseinandersetzung mit dem ganzen Fragenkomplex einige Urteilstafeln erworben habe.

Die Grundfrage dürfte wohl lauten, ob bei den vorgesehenen Energiebeschaffungsprogrammen, die in steigendem Mass auf der Kernenergiegewinnung beruhen, die menschliche Gesellschaft nicht ihre Sicherheit oder gar ihre Bewegungsfreiheit einschränken muss wegen der entstehenden und bleibenden Atomabfälle. Auf Grund der anfallenden und sich ansammelnden relativ kleinen Mengen – ich erinnere an Tabelle I – halte ich diese Gefahr, soweit man in die Zukunft voraussehen kann, für nicht gegeben.

Natürlich ist diese Antwort verknüpft mit der zweiten Frage: Sind technisch saubere Lösungen zur Abfallbehandlung undendlagerung vorhanden? Dazu glaube ich die Antwort bereits gegeben zu haben durch die Aufzählung einer ganzen Reihe von Möglichkeiten, die sich zur Auswahl anbieten. Die Lagerung höchstaktiver Spaltproduktlösungen in entsprechend konstruierten Tanks hat in einem Fall während 15 Jahren Betrieb volle Zuverlässigkeit bewiesen, an einem anderen Ort konnte, nach Auftreten von Undichtigkeiten durch Korrosion, die technische Beherrschung der Situation demonstriert werden.

Immerhin halte ich eine Mahnung zur Vorsicht bei der Auswahl der Behandlungs- und Lagerungsmethoden für angebracht. Einige der vorgeschlagenen Verfahren könnten dazu führen, dass man die Kontrolle über die radioaktiven Stoffe verliert. Dies kann und sollte man vermeiden durch Auswahl derjenigen Konzepte, die es erlauben, zu jedem Zeitpunkt, gegebenenfalls mit einem beträchtlichen Aufwand, die radioaktiven Stoffe einer neuen Behandlungs- oder Lagerungsart zuzuführen. Das ist z. B. in genügendem Mass der Fall bei der Lagerung in Salzbergwerken.

Bezüglich der Wirtschaftlichkeit der Verfahren ist festzuhalten, dass, verglichen mit den übrigen Energiegestehungskosten, keines eine untragbare Belastung ergibt. Es geht um 1 % oder weniger der Gesamtkosten für Kernenergiegewinnung.

Jedoch spielt die Wirtschaftlichkeit bei der Verfahrenswahl eine entscheidende Rolle. Die allgemeine Tendenz ist unverkennbar: die saubersten und sichersten Verfahren sind auch die teuersten. Es bleibt somit in unserem Wirtschaftssystem gesetzgeberischen Verordnungen vorbehalten, die Auswahl nach der sichereren Seite zu steuern. Auf diesem Gebiet bleibt meiner Ansicht nach noch sehr viel zu tun, obwohl wir in Zentraleuropa zu anderen Teilen der Welt relativ recht fortschrittlich dastehen.

Was die Schweiz anbetrifft, so hätte ich das «Abfallproblem» wesentlich rosiger darstellen können. In absehbarer Zeit werden nur Kernkraftwerke (und mit viel geringerem Anfall die Anwender der Isotopentechnik) als Produzenten radioaktiver Abfälle auftreten. Der ganze übrige Brennstoffzyklus, insbesondere die chemische Aufbereitung, bei der der Löwenanteil an höchstaktiven Abfällen entsteht, wird in anderen Ländern durchgeführt, d. h., wir exportieren das Problem, falls es eines gibt. Trotzdem bin ich der Meinung, dass wir das Energie/Abfall-Problem als Ganzes betrachten müssen, als eine Frage, die die gesamte menschliche Gesellschaft angeht. Die Verflechtung der menschlichen Tätigkeiten führt sowieso immer mehr dazu, dass nur noch solche Dinge wie Wahlen und Sportereignisse aus rein nationaler Sicht betrachtet werden können.

Neben der Vervollkommenung und Verschärfung der Gesetzgebung gilt es natürlich auch praktische Lösungen zu realisieren, insbesondere was die Bereitstellung von sicheren Lagerplätzen anbetrifft. Ich glaube zu wissen, dass in Zusammenarbeit mit dem Eidgenössischen Amt für Energiewirtschaft die zentrale Lagerung der radioaktiven Abfälle in der Schweiz auf genossenschaftlicher Basis nahe vor der Verwirklichung steht.

Schliesslich sollte man die Frage nach dem Wohin mit den radioaktiven Abfällen auch im grösseren Zusammenhang mit dem Problem der Grenzen des Wachstums, des zukünftigen Energiebedarfs der menschlichen Gesellschaft betrachten. Sie wird dann zur Teilfrage, die auf Grund der erarbeiteten und erprobten Verfahren und der Bedarfsextrapolation bis zum Jahr 2000 klar zu beantworten ist. Man braucht keine Zuflucht zu nehmen zu spekulativen Projekten, die natürlich viel grössere Lagerkapazität erahnen lassen, oder zu Vermutungen über andere Energiegewinnungsarten, die nach 2000 zum Zuge kommen werden und weniger radioaktive Abfälle versprechen. Dass die fernere Zukunft auch andere Lösungen bringen könnte, darf jedoch auch der verantwortungsbewusste Planer zugeben.

Adresse des Autors:

Dr. Rudolf Rometsch, Generalinspektor der Internationalen Atomenergieorganisation, Leiter des Departementes für Überwachungsmassnahmen und Inspektionen, Wien.