KFA

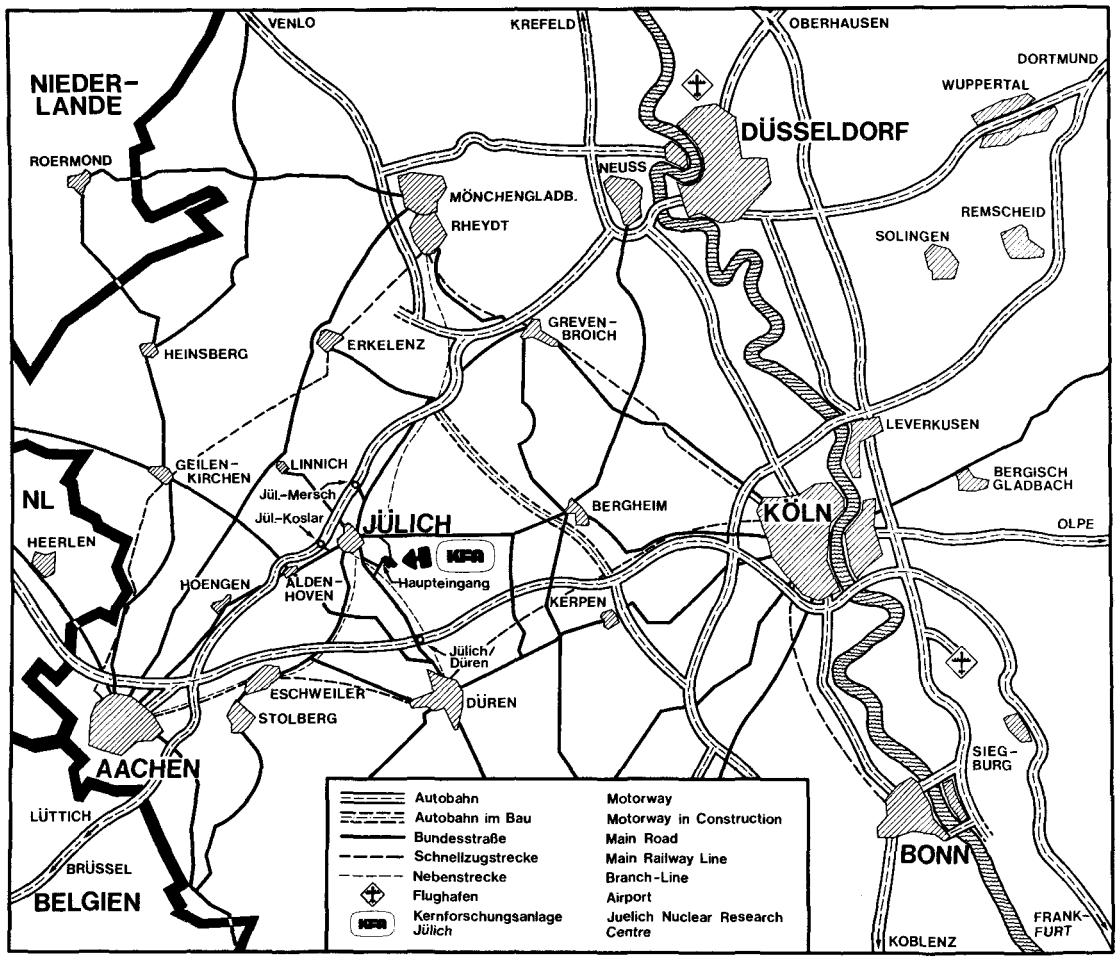
KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH

Aktuelle Themen der Kernenergie

Vorträge eines Seminars
veranstaltet von der
Programmgruppe Kernenergie und Umwelt
der Kernforschungsanlage Jülich GmbH

Redaktion: P. Borsch und E. Münch

Jül-Conf-24
2. überarbeitete Auflage
März 1981
ISSN 0344-5798



Als Manuskript gedruckt

Berichte der Kernforschungsanlage Jülich Jül-Conf-24

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH,
Postfach 19 13 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)
Telefon: 02461/610 · Telex: 833 556 kfa d

Aktuelle Themen der Kernenergie

Vorträge eines Seminars
veranstaltet von der
Programmgruppe Kernenergie und Umwelt
der Kernforschungsanlage Jülich GmbH

E. Albrecht, M. Laser, E. Münch,
W. Schneider, G. Stein, W. Stoll

Redaktion: P. Borsch und E. Münch

Abbildungen: E. Heuter, Archiv

Inhalt

P. Borsch und E. Munch: **Vorwort**

M. Laser:

Die Wiederaufarbeitung und Behandlung radioaktiver Abfälle ... 7

1. Einleitung ... 7
2. Verfahrensbeschreibung ... 8
3. Das Risiko der Wiederaufarbeitung ... 12
4. Gegenwärtige Situation in der Bundesrepublik ... 14
5. Zusammenfassung ... 15

E. Albrecht:

Die Tieflagerung radioaktiver Abfälle in Salzformationen der Bundesrepublik Deutschland ... 17

1. Einleitung ... 17
2. Versuchsanlage Asse ... 18
3. Zur Sicherheit eines Salzbergwerkes ... 24
4. Zusammenfassung ... 26

W. Schneider:

Die Beeinflussung von Wetter und Klima durch Wärmekraftwerke ... 27

1. Einleitung ... 27
2. Kühltürme ... 27
3. Wetter und Klima. Stadtklima ... 28
4. Die atmosphärischen Ausbreitungsverhältnisse ... 30
5. Die Ausbreitungsrechnungen und ihre Aussagen ... 30
6. Indirekte Auswirkungen des Kühlturmbetriebs ... 34
7. Zusammenfassung ... 37

E. Munch:

Die Sicherung kerntechnischer Anlagen und spaltbarer Materialien ... 39

1. Einleitung ... 39
2. Schutzbedürftige Stationen des Brennstoffkreislaufs ... 39
3. Schutz von Kernkraftwerken gegen Sabotage ... 41
4. Schutz gegen Sprengstoffe und Geschosse ... 42
5. Katastrophenschutzpläne ... 42
6. Mißbrauch von spaltbarem Material ... 43
7. Zusammenfassung ... 45

W. Stoll:

***Plutonium* – Eigenschaften und Möglichkeiten** ... 47

1. Einleitung ... 47
2. Die Rolle des Plutoniums im Kernbrennstoffkreislauf ... 47
3. Der offene Brennstoffkreislauf ... 48
4. Die gegenwärtigen und zukünftigen Plutoniummengen ... 48
5. Der geschlossene Brennstoffkreislauf ... 49
6. Sicherung von Plutonium ... 50
7. Zusammenfassung ... 55

Vorwort

Die Diskussion um die Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland hat zu Beginn dieses Jahres durch die Auseinandersetzungen um das Kernkraftwerk Brockdorf und die Meinungsverschiedenheiten über die in Hessen geplante Wiederaufarbeitungsanlage neuen Auftrieb erhalten. In den letzten Jahren verlagerte sich das Schwergewicht der Auseinandersetzung mehr und mehr von der Erörterung technischer Sachverhalte in den Bereich politischer Argumentation. Dabei sind Fragen der nuklearen Entsorgung – sowohl in der öffentlichen Diskussion wie auch bei Entscheidungen von Politikern und Gerichten – zum Angelpunkt der nuklearen Kontroverse geworden.

Nachdem die große Nachfrage nach dem Seminarbericht „Nutzen und Risiko der Kernenergie" (Jül-Conf-17) ein breites Interesse der Öffentlichkeit an Information dieser Art dokumentierte, hatte sich die Kernforschungsanlage Jülich ermutigt gefühlt, in einem zweiten Bericht aktuelle Themen der Kernenergie in ähnlicher Art und Weise darzustellen. Auch dieser zweite Bericht entstand im Zusammenhang mit Seminaren, die die KFA als Beitrag zur Information der Öffentlichkeit über Probleme der Kernenergie veranstaltet hat. Soweit die hier behandelten Sachgebiete nicht durch das Fachwissen eigener Mitarbeiter abgedeckt werden konnten, wurden Experten außerhalb der Kernforschungsanlage um Mitwirkung gebeten. Die erste Auflage ist inzwischen vergriffen; für diese Neuauflage wurden alle Beiträge überarbeitet und aktualisiert. Besonderer Dank gebührt Frau Waltraud Freier; sie gab wertvolle Anregungen und übernahm die organisatorische Betreuung der Arbeiten.

Der vorliegende Bericht befaßt sich mit den Themen

- *Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente,*
- *Endlagerung radioaktiver Abfälle,*
- *Klimabeeinflussung durch Wärmekraftwerke,*
- *Sicherung kerntechnischer Anlagen und spaltbarer Materialien,*
- *Eigenschaften und Möglichkeiten des Plutoniums.*

Die Autoren waren bemüht, ihr fachliches Wissen allgemeinverständlich darzustellen. Der Hinweis auf weiterführende Literatur macht die Angaben nachprüfbar und eröffnet den Zugang zu einer vertieften Beschäftigung.

Der Seminarbericht soll allen am Thema „Kernenergie" Interessierten die Möglichkeit geben, sich sachlich-fachlich zu informieren und auf diese Weise einen Wissensstand zu erreichen, auf dem eine eigene Einstellung basieren und eine persönliche Entscheidung aufbauen kann.

Jülich, im März 1981

Peter Borsch und Erwin Münch

Die Wiederaufarbeitung und die Behandlung radioaktiver Abfälle

M. Laser

Betriebsabteilung Dekontamination der Kernforschungsanlage Jülich GmbH

1. Einleitung

Die Wiederaufarbeitung ausgedienter Brennelemente aus Kernkraftwerken und die Behandlung der dabei entstehenden Abfälle, kurz die Entsorgung genannt, hat sich in den letzten Jahren als kritischer Punkt der friedlichen Nutzung der Kernenergie herauskristallisiert. Die Gründe hierfür sind zweifellos äußerst vielschichtig und komplex. Charakteristisch hierfür ist das Resümee, das der niedersächsische Ministerpräsident Albrecht aus dem sogenannten Gorleben-Hearing für die geplante Wiederaufarbeitungsanlage zog: „Sicherheitstechnisch realisierbar, aber politisch zur Zeit nicht durchsetzbar." In dieser 5tägigen Diskussionsrunde waren kompetente Befürworter und Kritiker der Kernenergie zu Wort gekommen, so daß das zitierte Ergebnis über Zweifel erhaben ist.

Aus technischer Sicht wäre ein negatives Urteil über die Technik auch unverständlich. Denn Wiederaufarbeitung gibt es in den USA bereits seit mehr als 35 Jahren, anfangs zur Gewinnung von Plutonium für militärische Zwecke, später aber auch auf kommerzieller Basis zur Entsorgung der inzwischen gebauten zivilen Kernkraftwerke. Nach dem Kriege entstanden dann in Großbritannien, Frankreich, Belgien, der Bundesrepublik Deutschland, Italien und anderen Ländern Wiederaufarbeitungsanlagen unterschiedlicher Kapazität. Die Technologie erreichte im Laufe der Jahre eine beachtliche Reife. Trotzdem liefen und laufen noch ebenso wie in anderen Staaten auch in der Bundesrepublik bei den Großforschungsanlagen und der Nuklearindustrie umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, um die Technologie weiter zu verbessern und radioaktive Emissionen auf ein Minimum zu reduzieren. Die Kritiker der Kernenergie setzen in der Regel an technischen Einzelheiten, wie Radioaktivitätsabgaben und möglichen Störfällen an. Die Beweggründe aber reichen von der oft unbewußten Angst vor der ungewohnten „faustischen" Energiequelle, über Mißtrauen gegenüber Wissenschaftlern und Technikern, Kampf gegen eine scheinbar oder anscheinend übermächtig werdende Technik im allgemeinen bis hin zu machtpolitischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten und schließlich der Systemveränderung. All diesen Beweggründen ist oft die politische Zweckmäßigkeit überlagert.

Es wäre sicher zu einfach gesehen, wollte man alle diese Kritiker mit dem Hinweis auf eine problemlose technische Realisierbarkeit beiseite schieben. So darf z.B. nicht verschwiegen werden, daß es im Verlauf der letzten Jahre einige Rückschläge gegeben hat. Es begann mit einem Mißerfolg bei der Inbetriebnahme einer neuen Wiederaufarbeitungsanlage in den USA. In der Nähe von Morris, Ill., hatte die Firma GENERAL ELECTRIC eine Anlage nach einem neuartigen Verfahren, dem sog. Aquafluor-Prozeß errichtet. Bei der Kalterprobung stellte sich heraus, daß ein Verfahrensschritt derart störanfällig ist, daß die Anlage in dieser Form nicht betrieben werden kann. Ein Umbau war aus räumlichen Gründen nicht mehr möglich. Die Anlage wird daher voraussichtlich abgerissen. Obwohl dieser Vorfall nicht symptomatisch für die Kerntechnik im allgemeinen und die Wiederaufarbeitung im besonderen ist, hat er doch eine erhebliche psychologische Wirkung auf die Öffentlichkeit gehabt. Bei der zweiten großen amerikanischen Wiederaufarbeitungsanlage in BARNWELL, S.C., die technisch weitestgehend fertiggestellt ist, kann dies nach Auffassung zahlreicher Fachleute nicht noch einmal geschehen, denn diese Anlage ist von vornherein so flexibel geplant, daß Verfahrensumstellungen notfalls ohne wesentliche Baumaßnahmen durchgeführt werden können.

Ein zweiter Rückschlag trat ein, als die erste auf rein kommerzieller Basis arbeitende amerikanische Anlage der Firma NUCLEAR FUEL SERVICES in West Valley, N.Y., die Kapazität erweitern wollte. Die Genehmigungsbehörde machte damals eine Neugenehmigung der Anlage von der Erfüllung sehr weitgehender Auflagen abhängig, die nachträglich nur unter erheblichem Kostenaufwand zu erfüllen gewesen wären. Heute suchen die Eigentümer einen Käufer für ihre Anlage.

Die noch andauernde weitere Verschärfung der Anforderungen und Auflagen seitens der Genehmigungsbehörden hat nun dazu geführt, daß die Kosten der Wiederaufarbeitung einschließlich der Folgekosten wie Abfallbeseitigung die erzielbaren Gutschriften für Uran und Plutonium überschreiten. Daraus ergeben sich verständlicherweise Finanzierungsprobleme.

Solche technischen, genehmigungsrechtlichen und finanziellen Schwierigkeiten haben zu einer gewissen Verunsicherung bei der Industrie geführt. Das bedeutet aber nicht, daß sie wesentliche oder gar prinzipielle Hindernisse darstellen. Anders die Reaktion der Öffentlichkeit, die verständlicherweise leicht die Probleme einer Technologie überschätzt, die trotz der rund 35jährigen Erfahrung noch immer als neuartig und in den Konsequenzen für den Laien kaum kalkulierbar erscheint. Zusätzlich belastet wird diese Einstellung noch durch die Ereignisse, die die Kernenergie ins Bewußtsein der Menschen gerückt haben: die Atombomben von Hiroshima und Nagasaki und die Atombombenversuche verschiedener Länder bis in die jüngste Gegenwart hinein.

So ist auch die im April 1977 verkündete amerikanische Nuklearpolitik aus der Angst vor dem Mißbrauch von Kernbrennstoff für kriegerische Zwecke zu erklären. Präsident Carter glaubte diese Gefahr eindämmen zu können, wenn alle die Länder, die nicht bereits Kernwaffen besitzen, auf eine Wiederaufarbeitung und damit auf eine Isolierung von Plutonium, einen potentiellen Bombenrohstoff, verzichten. Um mit gutem Beispiel voranzugehen, sollten die USA ebenfalls für die nähere Zukunft auf Wiederaufarbeitung verzichten. Zwischenzeitlich sollten Experten aus aller Welt nach neuen Wegen der Wiederaufarbeitung suchen, um die Isolierung von waffenfähigem Kernbrennstoff auszuschließen.

Das Ziel dieser amerikanischen Politik, die Verhinderung des Mißbrauchs der Kernenergie, ist zweifellos voll zu bejahen. Doch de facto führte sie zu erheblichen politischen Verwicklungen und wirtschaftlichen Belastungen. Denn gerade die Staaten, von denen am wenigsten ein Mißbrauch zu erwarten

ist, die Bundesrepublik Deutschland und Japan, trifft diese Politik am härtesten. Die mit großen Anstrengungen aufgebaute Kerntechnik dieser Länder wird dadurch entscheidend behindert.

Um des Weltfriedens willen müßte man sicher solche Behinderungen akzeptieren, wenn das Traumziel dadurch erreicht werden könnte. Tatsächlich aber besteht hierfür kaum Hoffnung. Denn ein Staat, der die Atombombe will, wird trotz dieser Politik Mittel und Wege finden, waffenfähiges Material zu erzeugen. Von Einzelpersonen oder Gruppen aber droht in dieser Hinsicht keine Gefahr.

Inzwischen ist die große internationale Studie INFCE (International Fuel Cycle Evaluation), an der 60 Staaten und 6 internationale Organisationen gearbeitet haben, nach über zweijähriger Laufzeit im Februar 1980 abgeschlossen worden. Sie hat bestätigt und verdeutlicht, daß die Verbreitung von Kernwaffen in erster Linie ein politisches und kein technisches Problem ist. Keine der zahlreichen Alternativen bei der Entsorgung ist absolut sicher gegen einen Mißbrauch von Kernbrennstoff. Eine wirksame Kontrolle ist aber nach Meinung der Fachleute durch ein verstärktes Netz von Sicherungsmaßnahmen technischer wie institutioneller Art durchaus erreichbar. Neben der Sicherung des Kernbrennstoffs aber sind bei einer Bewertung andere Kriterien wie Versorgungssicherheit, Umweltschutz und Wirtschaftlichkeit sehr wichtig. Dies ist, gemessen am Ausgangspunkt der Studie, ein außerordentlich wichtiges Ergebnis. Es macht deutlich, daß es gefährlich ist, gebannt nur auf ein Problem zu starren und darüber die Gesamtsituation zu vergessen. Insgesamt stellt die Studie fest, daß die Kernenergie weltweit verfügbar gemacht werden kann bei gleichzeitiger Minimierung der Risiken der Weiterverbreitung von Kernwaffen. Speziell für die Entsorgung in der Bundesrepublik ist von Bedeutung, daß das integrierte Entsorgungskonzept der Bundesregierung, nach dem alle sensitiven Anlagen des Brennstoffkreislaufs an einem Ort zusammengefaßt werden sollten, eindeutig positiv beurteilt wird.

Die Vielschichtigkeit der Probleme und das Engagement von Befürwortern und Kriktikern der Kernenergie machen eine verständliche, neutrale und offene Information über die Technologie und die damit verbundenen Risiken notwendig, ja, sie wird zu einer Conditio sine qua non für die friedliche Nutzung der Kernenergie.

Sie stößt allerdings an Grenzen, wo komplizierte Vorgänge verständlich gemacht werden müssen. Notgedrungen muß man hier oft um der Durchsichtigkeit willen auf wichtige Details verzichten, kann sich aber dadurch möglicherweise dem Vorwurf der Simplifizierung, Bagatellisierung oder gar der Verheimlichung und Verfälschung von Tatsachen aussetzen.

Der Versuch einer verständlichen Darstellung der Wiederaufarbeitung verbrauchter Brennelemente einschließlich der dazu gehörigen Abfallbehandlung sowie ihrer Probleme und Risiken wird daher stets einer Fahrt zwischen Skylla und Charybdis gleichen.

2. Verfahrensbeschreibung

2.1 Die Wiederaufarbeitung von Brennelementen nach dem PUREX-Prozeß

Die weitaus größte Zahl der Kernkraftwerke in der Welt arbeitet mit Leichtwasserreaktoren (LWR). Deren Brennstoff ist schwach angereichertes Uran, d.h. er enthält ca. 3 – 4 % des spaltbaren Uranisotops U-235. Der Rest besteht hauptsächlich aus U-238. Beim natürlichen Uran beträgt der Gehalt an U-235 nur 0,72 %.

Nach etwa 3 Jahren Betriebszeit werden die Brennelemente ausgewechselt. Sie enthalten noch knapp 1 % U-235 und etwa 1 % Plutonium, das während des Reaktorbetriebs aus U-238 neu gebildet wurde.

Aufgabe der Wiederaufarbeitung ist es nun, die ausgedienten Brennelemente zu zerlegen und aus dem Brennstoff

- die störenden Spaltprodukte abzutrennen und zu beseitigen,
- das nicht verbrauchte Uran zurückzugewinnen und für eine Wiederverwendung vorzubereiten und
- das neu gebildete Plutonium, einen wertvollen Kernbrennstoff, zu gewinnen.

Weltweit wird zur Lösung dieser Aufgabe der PUREX-Prozeß eingesetzt. Er hat sich ausgezeichnet bewährt und ist mit geringfügigen Modifikationen später auch zur Wiederaufarbeitung von Brennelementen aus schnellen Brutreaktoren einsetzbar.

Die von den Kernkraftwerken in schweren Abschirmbehältern angelieferten Brennelemente werden zunächst in großen Wasserbecken gelagert. Während dieser Zeit zerfallen die kurzlebigen Isotope, so z.B. das für den Umweltschutz besonders bedeutsame Jod-131. Frühestens 220 Tage nach der Entladung der Brennelemente aus dem Reaktor – in der Regel aber noch später – werden sie dann der eigentlichen Wiederaufarbeitung zugeführt.

Die Brennelemente bestehen aus zahlreichen Brennstäben, die durch Kopf- und Fußstücke zusammengehalten werden. In den Brennstäben befindet sich der eigentliche Brennstoff – Uran- und Plutoniumoxid in Tablettenform – dicht eingeschlossen in Hüllrohren aus einer Zirkoniumlegierung, dem sog. Zircaloy.

Die Wiederaufarbeitung dieser Brennelemente (Abbildung 1) beginnt mit der mechanischen Zerlegung. Abgeschirmt durch dicke Betonmauern werden zunächst die Kopf- und Fußstücke abgesägt. Die Brennstäbe werden dann in einige Zentimeter lange Stücke zerschnitten. Dieser Vorgang kann durch dicke Bleifenster verfolgt werden. Alle anderen Verfahrensschritte werden dann zweckmäßigerweise nicht mehr direkt beobachtet, sondern besser über zahlreiche Anzeige- und Registriergeräte verfolgt.

Die Brennstababschnitte fallen direkt aus der Zerlegemaschine in einen Korb, der sich in einem Kessel mit heißer Salpetersäure befindet. Hier lösen sich der Brennstoff und die Spaltprodukte aus den Hüllrohrabschnitten heraus. Dabei werden die gasförmigen und leicht flüchtigen Spaltprodukte frei und gelangen ins Abgas. Hierzu gehören insbesondere das Jod mit dem langlebigen Isotop J-129 und die Edelgase Krypton und Xenon, mit dem Isotop Kr-85 als wichtigstem radioaktiven Isotop. Außerdem enthält das Abgas vor allem nicht radioaktive, aber giftige Stickoxide, Säuredämpfe und Wasserdampf. Aus letzteren wird Salpetersäure zurückgewonnen, die dann wieder zur Auflösung von verbrauchtem Brennstoff eingesetzt wird. Außerdem fällt als Kondensat stark tritiumhaltiges Wasser an, das dem Kreislauf entzogen und zunächst gelagert wird. Die im Abgas verbleibenden Verunreinigungen wie Jod und Edelgase sowie Reste von Stickoxiden werden in der Abgasreinigungsanlage abgetrennt, bevor das saubere Abgas über den Schornstein abgegeben wird.

Die ausgelaugten Hüllrohrabschnitte werden mit dem Korb aus der Säure herausgehoben, abgespült und zunächst in einem Wasserbecken gelagert. Sie sind Abfall. Mit einer Aktivität von etwa 40 Ci/kg liegen sie an der Grenze zwischen hoch- und mittelaktiven Abfällen.

Die Brennstofflösung, die Uran, Plutonium und die Spaltprodukte in gelöster Form enthält, wird nun durch Filtration geklärt

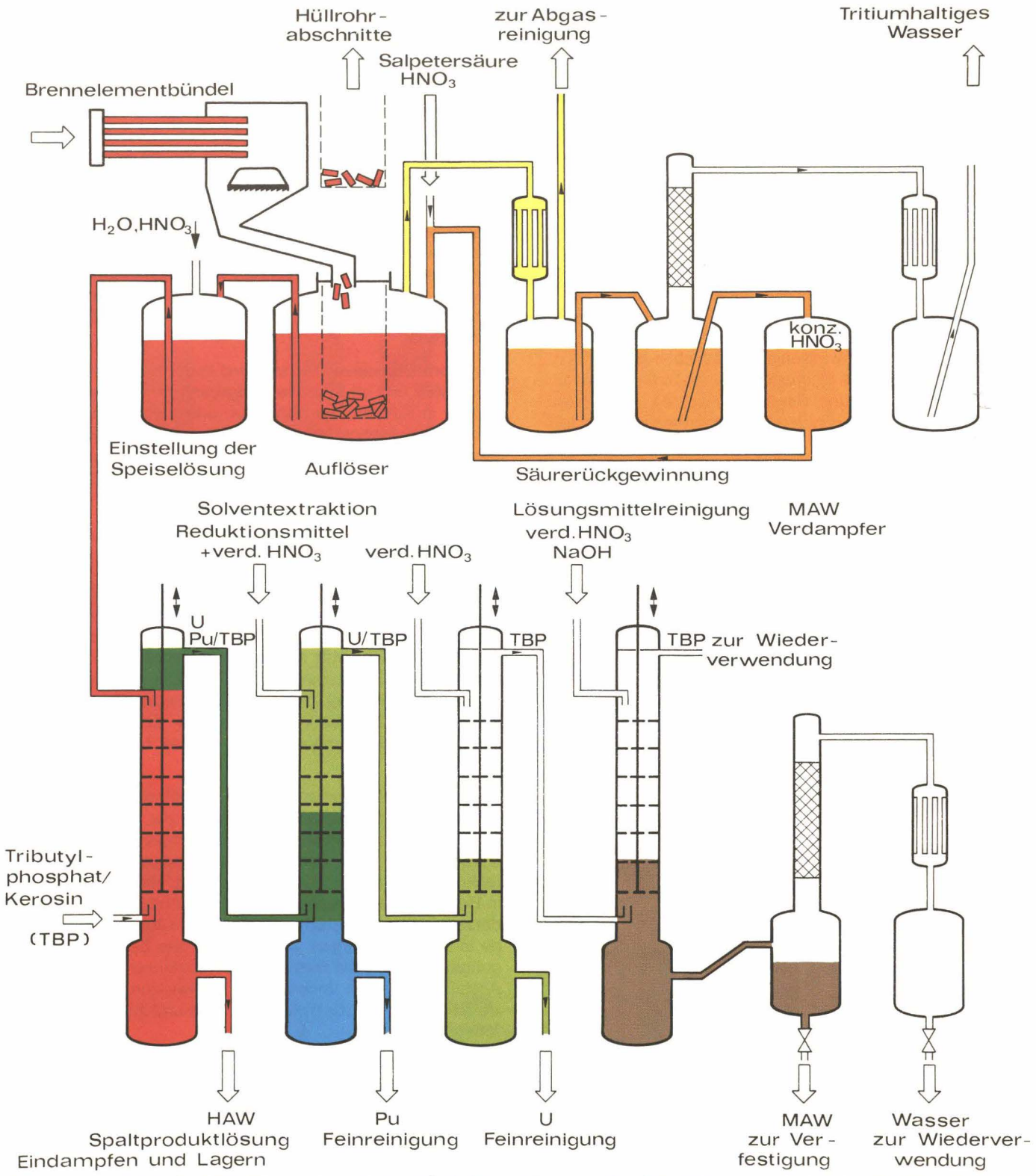


Abb. 1: Schematische Darstellung der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente mit dem PUREX-Prozeß

und durch Zusatz von Salpetersäure oder Wasser, durch Verdampfen von Wasser oder Abtreiben von Säure auf eine für den nachfolgenden Verfahrensschritt optimale Urankonzentration eingestellt. Wenn man jetzt noch das Volumen der Lösung genau bestimmt, kann man die Menge an Uran und Plutonium in dieser Charge ermitteln und sie mit den Erwartungswerten vergleichen, die sich unter Berücksichtigung des Abbrandes aus den Einsatzwerten errechnen lassen. Damit wird diese Stelle ein wichtiger Punkt für die Spaltstoffflußkontrolle, die verhindern soll, daß Brennstoff unerlaubterweise abgezweigt wird.

Jetzt beginnt die eigentliche Trennung durch Solventextraktion, an deren Ende drei Hauptfraktionen anfallen: die Uranlösung, die Plutoniumlösung und die hochradioaktive Spaltproduktlösung.

Die Solventextraktion beruht auf der unterschiedlichen Verteilung der verschiedenen Bestandteile der Ausgangslösung zwischen der wässerigen Phase und einer mit dieser nicht mischbaren organischen Phase. Beim PUREX-Prozeß wird als organische Phase eine Lösung von Tributylphosphat in Kerosin benutzt. Diese Lösung ist leichter als die wässerige Lösung und schwimmt deshalb oben. Mischt man nun beide Phasen durch intensives Schütteln, treten die das organische Milieu bevorzugenden Komponenten in die organische Phase über. Nach der Beruhigung trennen sich beide Phasen wieder, und man hat eine erste Trennung erreicht. In der Regel aber ist die

Trennung nicht vollständig, man muß sie daher mehrere Male wiederholen. Durch geeignete chemische Zusätze kann man das Verhalten der Komponenten in gewissen Grenzen beeinflussen.

Technisch kann man eine solche Solventextraktion in Mischabsetzern (Mixer-Settler) durchführen. Sie bestehen aus einer Vielzahl von Kammern, die von beiden Phasen in entgegengesetzter Richtung durchströmt werden. In einer Kammer werden sie intensiv gemischt , in der nächsten beruhigen und trennen sie sich, in der darauffolgenden werden sie wieder gemischt, dann getrennt u.s.w.

Anstelle der mechanisch komplizierten Geräte setzt man heute oft pulsierende Kolonnen ein. Dabei handelt es sich um senkrecht stehende Rohre mit eingebauten Lochblechen. Die leichtere organische Phase tritt unten ein und steigt nach oben, während die schwerere wässerige Phase oben eingespeist wird und nach unten sinkt. Überlagert man die Strömungen mit einer schnellen pulsartigen Bewegung, werden die beiden Phasen im Bereich der Lochbleche in intensiven Kontakt gebracht.

Beim PUREX-Prozeß werden Uran und Plutonium in der ersten Kolonne durch Übergang in die organische Phase von den Spaltprodukten getrennt und anschließend in die wässerige Phase zurückextrahiert. Nach Zusatz eines Reduktionsmittels werden Uran und Plutonium getrennt, wobei Plutonium in der wässerigen Phase bleibt und nur Uran extrahiert wird. In der letzten Kolonne schließlich wird Uran wieder in die wässerige Phase rückextrahiert.

Nach einer Feinreinigung werden Uran und Plutonium als Wertstoffe wieder zu Brennelementen verarbeitet.

Das organische Lösungsmittel wird gereinigt und wieder in den Prozeß zurückgeführt. Die Waschwässer werden aufkonzentriert und einer Abfallbehandlung zugeführt.

2.3 Abfallbehandlung

Im Laufe des Prozesses fallen verschiedene Abfallarten an. Die wichtigsten sind

- die Brennelement-Hülsen,
- das Abgas mit den radioaktiven Komponenten Jod und Krypton,
- das tritiumhaltige Wasser,
- die hochradioaktive Spaltproduktlösung und
- die mittelaktiven Konzentrate aus verschiedenen Reinigungsschritten.

Für alle diese Abfallströme gibt es geeignete Verfahren zur Behandlung und Beseitigung. In einigen Fällen konkurrieren sogar mehrere. In anderen Fällen ist zwar der Weg klar vorgezeichnet, bis zur großtechnischen Reife des Verfahrens ist aber noch eine weitere Entwicklung notwendig. Aus diesen Gründen wird eine neue große Wiederaufarbeitungsanlage genügend Lagerkapazität für alle Abfälle vorsehen. Die Dringlichkeit der Wiederaufarbeitung wird so von der Optimierung der Abfallbehandlung entkoppelt. Der Stand der Technik zur Abfallbehandlung und Beseitigung sei hier in einer Auswahl beispielhaft dargestellt.

Charakteristisch für notwendige Weiterentwicklungen ist die Abgasreinigung mit der Rückhaltung von Jod-129 und Krypton-85. Beide Isotope konnten in der Vergangenheit unbegrenzt in die Atmosphäre abgeleitet werden. Beim Betrieb einer Großanlage aber könnte bei diesem Vorgehen die Strahlenexposition in der Nähe der Anlage das Limit erreichen, das uns in der Bundesrepublik die Strahlenschutzverordnung setzt. Im Hinblick auf diese erwarteten Begrenzungen sind seit mehreren Jahren geeignete Rückhalteeinrichtungen in der Entwicklung, deren Komponenten teils bereits technisch getestet werden, teils kurz vor der Erprobung stehen. Den Ablauf einer solchen Abgasreinigung zeigt schematisch Abbildung 2.

Der nächste Schritt, die Entfernung des Sauerstoffs durch Reaktion mit Wasserstoff, als Vorstufe für die Edelgasabtrennung, ist eine technisch erprobte und auch schon in der Kerntechnik eingesetzte Methode.

Neu ist dagegen wieder die Abtrennung der Edelgase bei tiefen Temperaturen, wobei allerdings alle Komponenten bereits lange aus der Luftverflüssigung und Lufttrennung bekannt sind. Es handelt sich hierbei also um die Anpassung von bekannten Verfahrensschritten an die speziellen Probleme der Kerntechnik.

Zur Erprobung dieser Technik sind in der Kernforschungsanlage Jülich und im Kernforschungszentrum Karlsruhe je eine Anlage in Betrieb. Die bisherigen erfolgversprechenden Ergebnisse berechtigen zu dem Schluß, daß eine technische Anlage rechtzeitig mit der großen Wiederaufarbeitungsanlage ihren Betrieb aufnehmen kann. Dies ist allerdings auch notwendig, weil das Abgas die einzige Abfallsorte ist, die man nicht in größeren Mengen zwischenlagern kann.

Anders ist die Situation bei den hochradioaktiven Spaltproduktlösungen. Hier ist eine sichere Tanklagerung über viele Jahre hin technisch möglich. Ein Versickern im Erdboden, wie es mehrfach in den USA vorgekommen ist, ist bei der in Deutschland angewandten Technik mit mehrfacher Sicherung extrem unwahrscheinlich. Trotz des hohen Sicherheitsstandards sollen aber diese Spaltprodukte in eine feste, kompakte Form mit hoher Auslaugbeständigkeit überführt werden. Besonders geeignet ist hier die Überführung in ein glas- oder keramikartiges Produkt. Die Spaltprodukte werden dabei fester Bestandteil der Matrix.

In den USA, in Großbritannien und in Frankreich sind bereits in der Vergangenheit technische Anlagen zur Verfestigung der Spaltprodukte mit zufriedenstellenden Ergebnissen betrieben worden. Eine nach neuesten Gesichtspunkten konzipierte technische Anlage ist 1978 in Marcoule in Frankreich mit Erfolg in Betrieb gegangen. Eine gleichartige Anlage wird auch die derzeit größte europäische Wiederaufarbeitungsanlage in Cap de la Hague entsorgen, und auch für das Deutsche Entsorgungszentrum ist sie vorgesehen. Trotzdem laufen im In- und Ausland weiterhin umfangreiche Entwicklungsarbeiten zur Verbesserung und Optimierung dieses und ähnlicher Verfahren.

Als Beispiel für eine alternative deutsche Entwicklung eines solchen Verfestigungsprozesses sei das FIPS-Verfahren (= **F**ission **P**roduct **S**olidification) angeführt (Abbildung 3). Bei der Konzeptwahl standen die Betriebssicherheit des Verfahrens und die Sicherheit der Umwelt durch Minimierung der radioaktiven Ableitungen im Vordergrund. Eine hohe Betriebssicherheit wurde durch Verwendung bekannter, in der chemischen Technik bewährter Apparate erreicht. Die Minimierung der Ableitungen folgt aus den geringen, leicht zu reinigenden Abgasvolumina sowie geringen Mengen an flüssigem Sekundärabfall.

Das Verfahren besteht aus den Verfahrensschritten

- Vorkonzentrierung der Spaltproduktlösung,
- Zersetzung der freien Salpetersäure (Denitrierung),
- Zusatz von Glasbildnern oder Glasfritte,
- Verfestigung der Aufschlämmung mit einem Walzentrockner und
- Erschmelzen eines Glases.

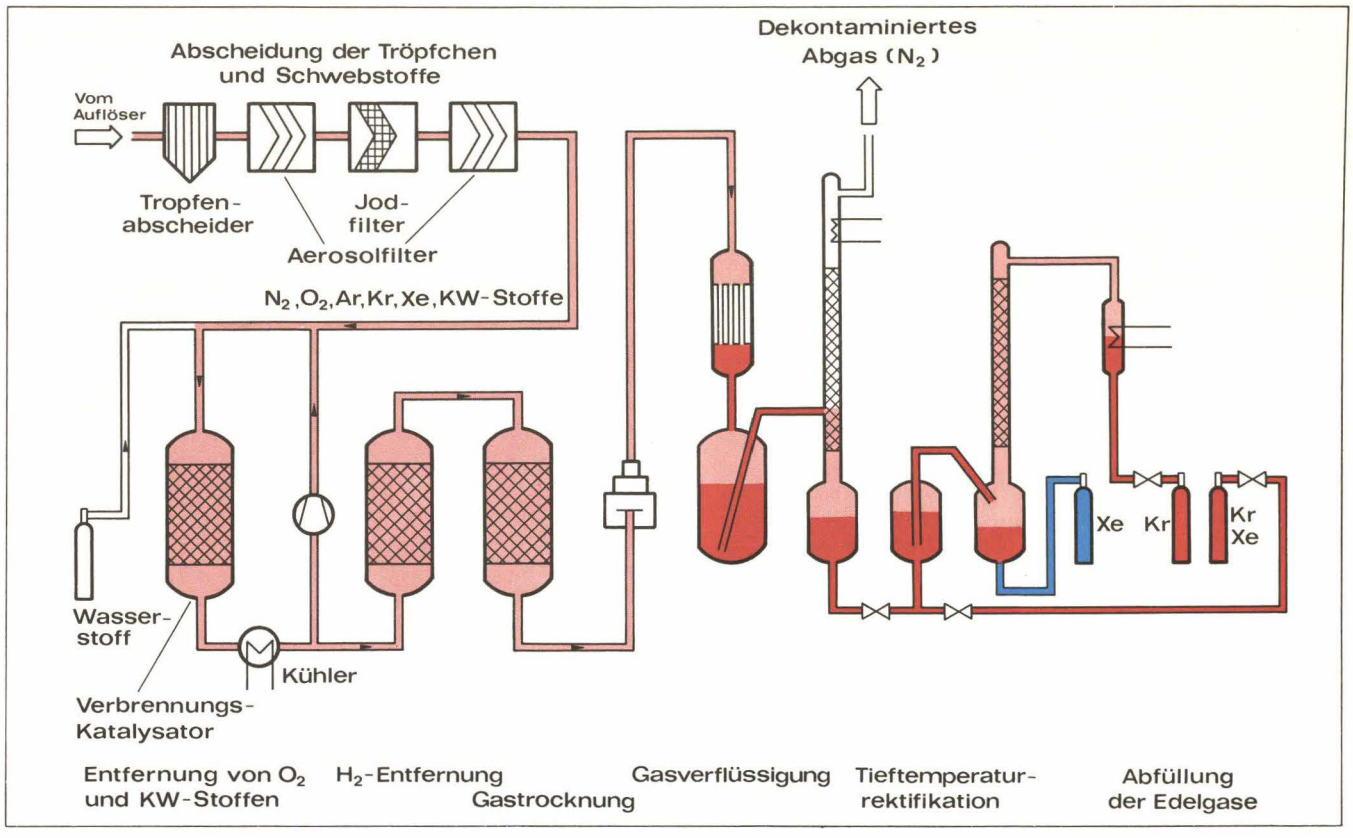


Abb. 2: Schematische Darstellung der Abgasreinigung

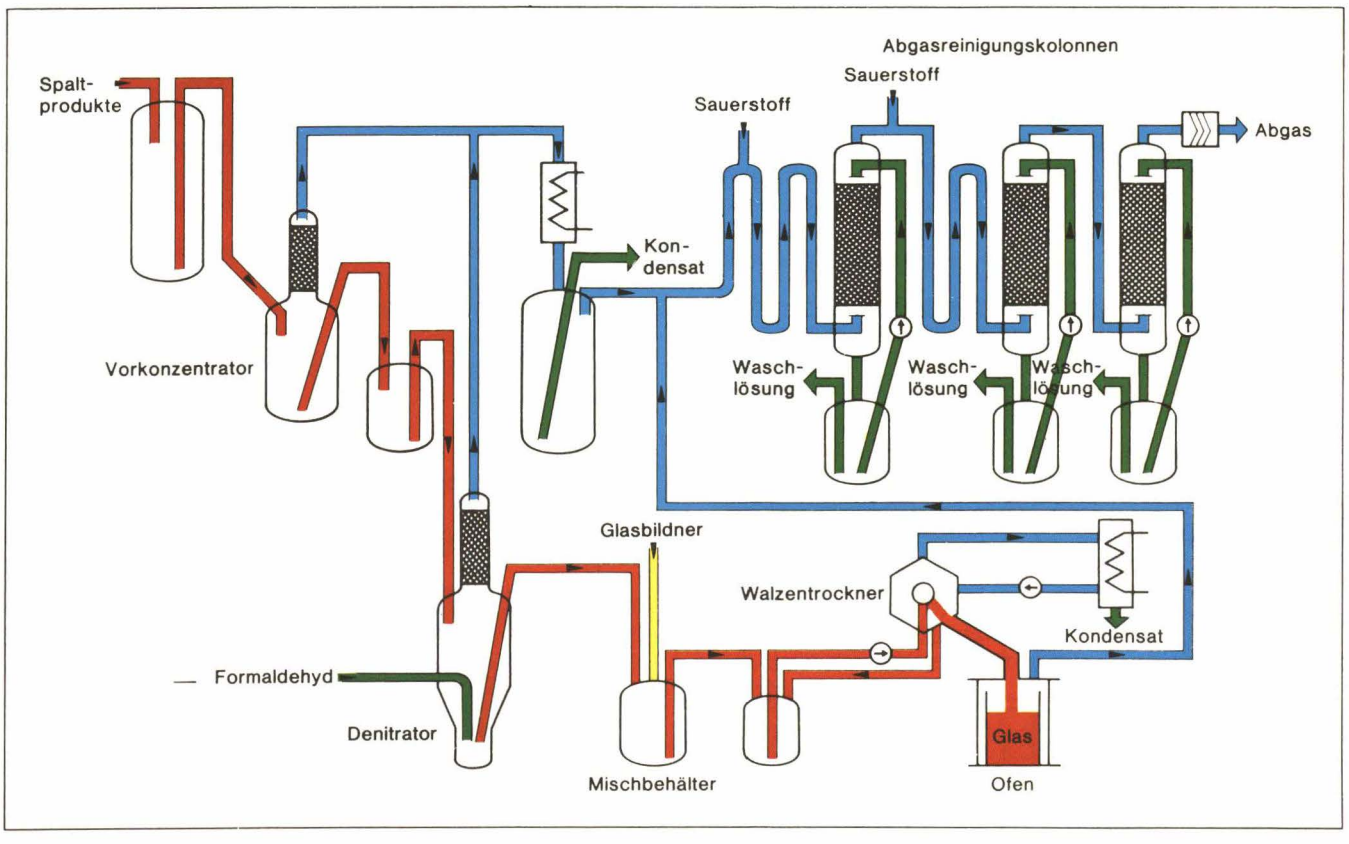


Abb. 3: Schematische Darstellung des Spaltproduktverfestigungsverfahrens FIPS

Die Anlage erwies sich im „Heißbetrieb" mit hochradioaktiven Spaltprodukten aus der Wiederaufarbeitungsanlage in Mol/Belgien als außerordentlich flexibel und leicht steuerbar. Der Durchsatz lag bei etwa 1 kg Glas pro Stunde. Das entspräche, wenn die Anlage ständig betrieben würde, der Entsorgung eines 1000 MW_e-Reaktors. Eine modifizierte und um den Faktor 2 größere Heißzellenanlage ist zur Zeit im Bau.

Für alle anderen Abfallsorten von Bedeutung gibt es erprobte Verfahren, so z.B. die Einbettung der mittelaktiven flüssigen und festen Abfälle in Beton oder Bitumen. Auch hier wird indessen noch Entwicklungsarbeit zur Optimierung der Verfahren geleistet.

3. Das Risiko der Wiederaufarbeitung

Das Risiko, das der Betrieb einer Wiederaufarbeitungsanlage für die Bevölkerung mit sich bringt, ist verständlicherweise einer der wichtigsten Punkte in der öffentlichen Diskussion. Dabei reichen die Aussagen von „harmlos" bis „30 Millionen Tote beim größten denkbaren Unfall". Beide Aussagen sind mit Sicherheit nicht richtig. Einerseits gibt es wohl kaum einen größeren Industriebetrieb, der nicht ein gewisses Risiko für die Bevölkerung darstellt. Andererseits dürfte es wohl keinen Wissenschaftler oder Ingenieur geben, der eine Technik gutheißt und vertritt, bei der er auch nur die geringste Möglichkeit einer Katastrophe des oben geschilderten Ausmaßes erkennen kann. Durch ein eng vermaschtes Netz von Sicherheitsvorkehrungen werden vielmehr eventuelle Störfallfolgen für die Bevölkerung sehr stark begrenzt; in keinem anderen Industriezweig ist das in diesem Umfang üblich.

Welches Risiko geht nun aber wirklich von einer Wiederaufarbeitungsanlage aus? Eine auch nur annähernd vollständige Risikoanalyse füllt Bände. Sie kann daher nicht im Detail behandelt werden. Aber bereits eine kurze Betrachtung der Ableitungen im bestimmungsgemäßen Betrieb und der Freisetzungen bei Störfällen kann einen Überblick über die Auswirkungen geben. Dabei sollen hier nur Strahlenexpositionen in der Maßeinheit „rem" bzw. „mrem", dem tausendsten Teil eines rems, angegeben werden. Die tatsächlichen Folgen können bei hohen Expositionen relativ leicht abgeschätzt werden. So weiß man, daß z.B. eine einmalige Bestrahlung des ganzen Körpers mit ca. 400 rem bei 50 % der bestrahlten Personen zum Tode führen würde. Die Wirkung kleiner Dosen, mit denen man es normalerweise zu tun hat, ist aber statistisch nicht mehr nachweisbar und daher seit vielen Jahren heiß umstritten.

3.1 Strahlenexposition beim bestimmungsgemäßen Betrieb einer Wiederaufarbeitungsanlage

Die durch Ableitungen aus einer Wiederaufarbeitungsanlage über die Abluft auftretende Strahlenexposition außerhalb der Anlage ist durch die Strahlenschutzverordnung auf jährlich 30 mrem für den gesamten Körper und auf 90 mrem für die Schilddrüse begrenzt worden. Vergleichsweise beträgt die natürliche Strahlenbelastung des Menschen in Deutschland im Mittel etwa 110 mrem pro Jahr. Örtlich können sogar Spitzen bis 250 mrem auftreten. Die oben genannten Grenzwerte dürfen jedoch nicht ausgenutzt werden, wenn die Möglichkeit besteht, die Strahlenexposition weiter zu reduzieren. So hat die Deutsche Strahlenschutzkommission bereits empfohlen, die Krypton-85-Ableitung auf jährlich 1 Million Curie zu begrenzen. Weitere Empfehlungen zur Begrenzung der Emission von Tritium, Jod-129 und α-aktiven Stoffen werden in Kürze erwartet. Danach wird dann die Strahlenexposition an der ungünstigsten Stelle voraussichtlich um 5 mrem für den gesamten Körper und unter 20 mrem für die Schilddrüse liegen. Es muß aber betont werden, daß es sich hier um sogenannte Ortsdosiswerte handelt, die ein Mensch empfangen würde, wenn er sich ausschließlich an der ungünstigsten Stelle aufhalten würde und nur Nahrungsmittel zu sich nehmen würde, die dort gewachsen sind. Die tatsächliche Strahlenexposition der Bevölkerung liegt erheblich darunter.

Diese Werte der Wiederaufarbeitungsanlage werden etwa zehnmal so hoch sein wie die Ortsdosiswerte in der Nähe von Kernkraftwerken. Gemessen aber an der natürlichen Strahlenbelastung müssen diese Werte als akzeptabel gelten.

3.2 Sicherheitsphilosophie zur Vermeidung größerer Freisetzungen bei Störfällen

Wichtiger noch als die durch zahlreiche Auflagen niedrig gehaltene Strahlenexposition im Normalbetrieb ist die Frage nach den Konsequenzen eines schweren Unfalls für die Bevölkerung.

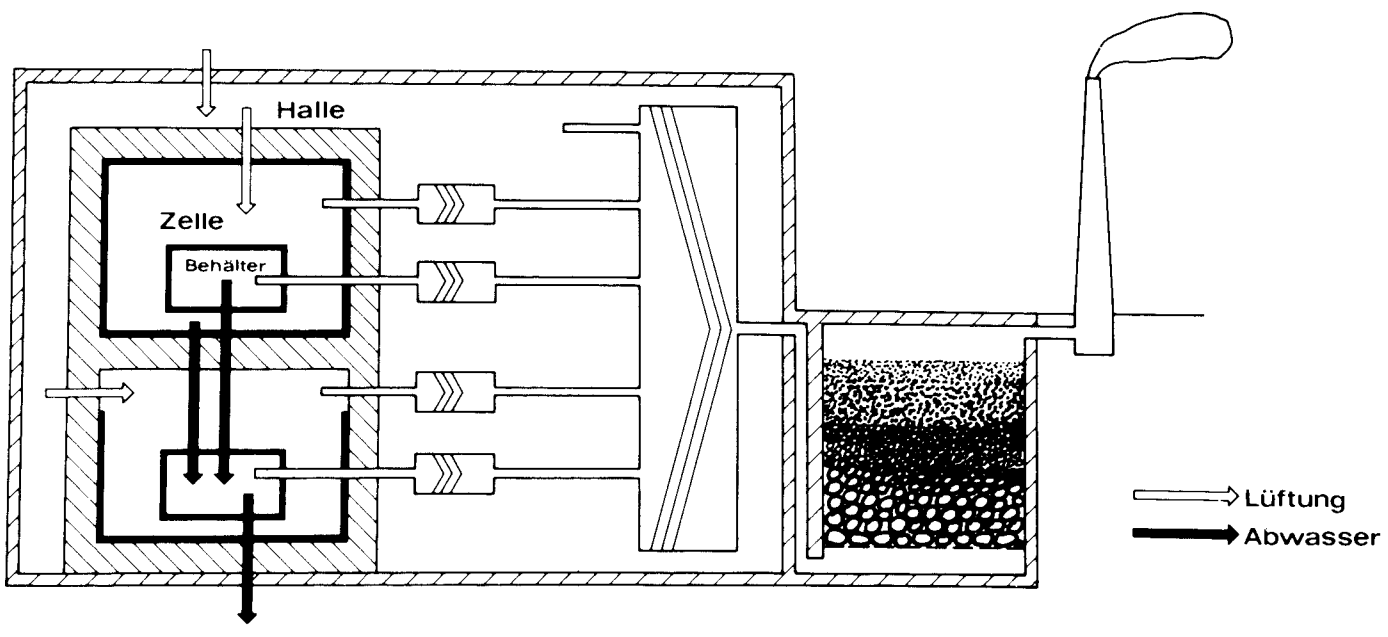


Abb. 4: Schematische Darstellung der Lüftung und der Abwasserführung einer kerntechnischen Anlage

Es ist unbestritten, daß eine Wiederaufarbeitungsanlage erhebliche Mengen an radioaktivem Material enthält.

Dies hört sich aber schon nicht mehr so problematisch an, wenn man weiß, daß die Aktivitäten auf zahlreiche von einander getrennte Räume verteilt sind und daß die Aktivität, die sich jeweils im Verarbeitungsprozeß befindet, im Verhältnis zur Gesamtaktivität relativ klein ist.

Die Freisetzung dieses Materials wird durch zahlreiche passiv wirkende Einrichtungen und aktive Gegenmaßnahmen verhindert. Studien, die ungehinderte Freisetzung betrachten, gehen daher völlig an der Realität vorbei.

Die Beherrschung hochgiftiger Substanzen durch ein aktiv und passiv wirkendes Sicherheitssystem ist übrigens nicht auf die Kerntechnik begrenzt. Der amerikanische Wissenschafler Bernhard Cohen vergleicht z.B. Plutonium mit anderen gefährlichen Substanzen und kommt zu dem Schluß: Wenn in den USA die gesamte Elektrizität mit Schnellen Brütern erzeugt würde, entstünden pro Jahr etwa 1 Billion tödlicher Inhalationsdosen Plutonium. Jedes Jahr aber werden in den USA 400 Billionen tödlicher Inhalationsdosen Chlor produziert. Auch in diesem Fall ist also eine entsprechende Sicherheitsphilosophie vonnöten.

Die Sicherheitsphilosophie der Kerntechnik beruht auf der Wirksamkeit mehrfacher Barrieren. Dies ist schematisch in Abbildung 4 dargestellt.

Die radioaktiven Stoffe sind in der Regel in Behältern oder Rohrleitungen eingeschlossen. Diese befinden sich in einer mit einer Edelstahlhaut ausgekleideten Betonzelle, die ihrerseits wieder vom Gebäude umgeben ist. Wir haben also in der Regel drei Barrieren, die die radioaktiven Stoffe zurückhalten. Diese Barrieren haben Öffnungen für die Zufuhr und Ableitung der Stoffe und für die Zu- und Abluft, die aber mehrfach durch Schleusen, parallele und hintereinander geschaltete, voneinander unabhängige Filtersysteme und durch Schnellschlußklappen gesichert sind.

Um einen unkontrollierten Austritt von Radioaktivität zu vermeiden, hält man in den Räumen einen gestaffelten Unterdruck aufrecht, so daß die Luft stets von außen in die Halle, von da in die Zelle und von da über ein mehrfaches Filtersystem zum Schornstein strömt.

Abwässer gelangen über Reinigungsanlagen und Sammelbehälter erst nach sorgfältiger Überprüfung nach draußen.

Dieses System erlaubt, alle auch nur einigermaßen realistisch erscheinenden Unfälle so zu beherrschen, daß die Bevölkerung keinen Schaden erleidet. Tatsächlich sind bisher auch noch keine Personenschäden unter der Bevölkerung durch Unfälle in Wiederaufarbeitungsanlagen zu verzeichnen gewesen.

3.3 Störfälle in Wiederaufarbeitungsanlagen

Welcherart sind nun die Störfälle, mit denen man in Wiederaufarbeitungsanlagen zu rechnen hat?

Bereits einige Male sind Kritikalitätsstörfälle, also unbeabsichtigte Kettenreaktionen durch Ansammlung von Spaltstofflösungen, in bestehenden Anlagen aufgetreten. Der größte Störfall ereignete sich in IDAHO/USA. Er dauerte insgesamt mehrere Stunden. Durch die bei der Kettenreaktion freigesetzte Wärme kam die Spaltstofflösung zum Kochen, verspritzte in der Zelle und wurde dadurch unterkritisch. Allmählich sammelte sich die Lösung wieder und wurde erneut kritisch. Das wiederholte sich dann noch einige Male. Trotzdem trat außerhalb der Anlage nie eine gefährlich hohe Strahlenexposition auf. Das Bedienungspersonal nahm zwar erhöhte Strahlendosen auf, aber auch hier ist eine ernste Gefährdung nie eingetreten. Aus diesem Unfall hat man inzwischen viel gelernt. Man baut heute alle Behälter so, daß eine lang andauernde Kettenreaktion unmöglich ist. Trotzdem muß eine Anlage so ausgelegt sein, daß sie noch größere Störfälle beherrschen kann. So führt die sorgfältige Analyse eines hypothetischen Kritikalitätsstörfalls in der Wiederaufarbeitungsanlage in BARNWELL/-USA zu einer Exposition von höchstens 2 mrem außerhalb der Anlage.

Ein anderer wichtiger Störfall, der sich auch tatsächlich bereits ereignet hat, ist eine Explosion beim Konzentrieren von Spaltproduktlösungen, die sog. „Red-Oil"-Explosion. Sie kann auftreten, wenn organisches Lösungsmittel zusammen mit mäßig konzentrierter Salpetersäure auf Temperaturen über 135°C erhitzt wird. Die Integrität der dicken Zellenwände ist bei solchen Explosionen zu keiner Zeit in Gefahr, wohl aber können die Filter in bzw. unmittelbar hinter der Zelle zerstört werden. In den weiterführenden Lüftungsschächten läuft sich dann, wie sich in Experimenten zeigte, die Explosionswelle tot, so daß das räumlich weiter entfernte Endfilter nicht in Mitleidenschaft gezogen wird. Will man ganz sicher gehen, kann man hinter die üblichen Aerosolfilter noch ein Sandbettfilter schalten, das als vollständig explosionssicher gilt. Die Anlage in MORRIS hatte ein solches Filter vorgesehen, BARNWELL hielt es nicht für erforderlich. Denn auch ohne Sandbettfilter wird bei diesem Störfall die Strahlenexposition außerhalb der Anlage nicht über 1 mrem liegen.

Besondere Aufmerksamkeit muß man in einer Anlage, die mit Kerosin umgeht, der Feuersicherheit widmen. Im Falle eines Brandes muß man ebenso wie bei der oben beschriebenen Explosion mit der Zerstörung der Zellenfilter rechnen, ein Übergreifen des Brandes auf das Endfilter ist allerdings nicht zu befürchten. Die Strahlenexposition wird daher ähnlich wie beim vorhergehenden Fall 1 mrem nicht überschreiten.

Als denkbar schwerster Unfall gilt nach dem Arbeitsbericht Nr. 290 des Instituts für Reaktorsicherheit (jetzt: Gesellschaft für Reaktorsicherheit, GRS) der Ausfall der Kühlung im Tanklager für hochradioaktive Spaltproduktlösungen. Durch den Zerfall der radioaktiven Isotope wird auf Jahre hinaus noch eine beachtliche Energie frei, die ständig durch Wasserkühlung abgeführt wird. Bei Ausfall der Kühlung würde die Lösung nach etwa 2,5 Stunden zu sieden beginnen, nach etwa 35 Stunden wäre dann nach dieser Studie alles Wasser verdampt. Der zurückbleibende Salzkuchen würde sich dann weiter erhitzen und schließlich zu schmelzen beginnen. Dabei verdampft ein großer Teil der Salzschmelze, wobei angenommen wurde, daß keinerlei Rückhaltung wirksam sei.

Tatsächlich wird solch einem Störfall aber durch mehrfache Redundanz der Kühlung, also durch Mehrfachauslegung, begegnet. Im Normalbetrieb wird ein Tank durch eingehängte Kühlschlangen gekühlt. Werden diese Kühlschlangen defekt, können sie ausgewechselt werden. Fällt die Kühlmittelzufuhr zu den Kühlschlangen aus, so daß der Tankinhalt zu sieden beginnt, tritt ein Rückflußkühler in Aktion, der ebenfalls die gesamte Wärme abführen kann. Fällt die gesamte Kühlwasserzufuhr aus, kann auf ein völlig anderes Kühlsystem umgeschaltet werden, z.B. von der Durchlaufkühlung mit Flußwasser auf Kreislaufkühlung über einen Kühlteich.

Unabhängig davon sorgt ein umfangreiches Filtersystem dafür, daß keine nennenswerten Aktivitäten in die Umwelt freigesetzt werden.

Bei der geschilderten Auslegung ist ein Störfallverlauf, wie ihn die Autoren des IRS-Berichts annehmen, völlig unrealistisch. Zu dieser Überzeugung sind übrigens die Autoren selbst gekommen. Vielmehr erlaubt der zeitliche Verlauf des Kühlmittelverlust-Störfalls rechtzeitige Gegenmaßnahmen.

Erhöht man die Lagerzeit der Brennelemente zwischen der Entladung aus dem Reaktor und der Wiederaufarbeitung auf 5

Jahre oder gar noch länger, wie es z.B. nach neueren Vorstellungen für eine zukünftige deutsche Wiederaufarbeitungsanlage vorgesehen ist, ist die Wärmeproduktion der Spaltproduktlösungen so stark abgeklungen, daß man im Notfall vollkommen ohne aktive Kühlung auskommen kann: das Tanklager ist dann in bezug auf die Kühlung inhärent sicher.

Die beschriebenen Störfälle sind selbstverständlich nur eine Auswahl aus einer langen Reihe von Möglichkeiten, die bei der Auslegung einer Anlage berücksichtigt werden müssen. Sie zeigen aber beispielhaft, wie durch eingebaute Schutzeinrichtungen und eventuelle Gegenmaßnahmen der Schutz der Bevölkerung sichergestellt wird. Die in Sicherheitsberichten angegebenen Daten für die erwartete Strahlenexposition durch Störfälle bestätigen darüber hinaus die bisherige Erfahrung, daß Störfälle in Wiederaufarbeitungsanlagen die Umwelt nur wenig zusätzlich belasten.

4. Gegenwärtige Situation in der Bundesrepublik

In der Bundesrepublik Deutschland ist seit 1971 im Kernforschungszentrum Karlsruhe eine kleine Wiederaufarbeitungsanlage (WAK) mit einer Kapazität von ca. 35 t Brennstoff pro Jahr mit guten Ergebnissen in Betrieb. Dies reicht jedoch nicht für die in Deutschland installierten Kernkraftwerke.

Von den Energieversorgungsunternehmen, die Kernkraftwerke betreiben, wurde die „Deutsche Gesellschaft für Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen" (DWK) gegründet mit dem Ziel, eine große deutsche Wiederaufarbeitungsanlage zu planen, zu bauen und zu betreiben. Für eine Übergangszeit hat die DWK zunächst Wiederaufarbeitungsverträge mit der französichen Gesellschaft COGEMA abgeschlossen.

Brennelemente, die nicht im Ausland aufgearbeitet werden können, sollen in Zwischenlagern aufbewahrt werden. Diese Zwischenlagerung kann in Wasserbecken erfolgen, so wie sie sich seit vielen Jahren am Reaktor und auch als Eingangsstufe in der Wiederaufarbeitungsanlage bewährt hat. Eine andere vorteilhafte Alternative ist die trockene Lagerung der ausgedienten Brennelemente in schweren Abschirmbehältern. Diese Behälter werden durch natürliche Luftkühlung (Konvektion) ohne jedes aktive Kühlsystem gekühlt. Das bedeutet ein hohes Maß an inhärenter Sicherheit. Die dickwandigen Stahlbehälter schützen nicht nur gegen Strahlung, sondern auch gegen Einwirkungen von außen, wie mechanische Einwirkungen, Erdbeben, Flugzeugabsturz, Brand, Überflutung usw. Sie können in einfachen Hallen gelagert werden, die später problemlos wieder abgerissen oder anderweitig verwendet werden können.

Zur Zeit werden Brennelementlager in Ahaus und in Gorleben geplant.

Bis zur Fertigstellung der Brennelement-Zwischenlager werden die ausgedienten Brennelemente im Wasserbecken der Reaktoren gelagert. Um die Kapazität dieser Becken zu erweitern, sind mehrere Betreiber bereits dazu übergegangen, sogenannte Kompaktlagergestelle einzubauen, die eine wesentlich dichtere Packung der Brennelemente zulassen.

Auch für die Zukunft muß die Entsorgung gewährleistet sein. Die Regierungschefs von Bund und Ländern stimmen darin überein, daß die Wiederaufarbeitung der bestrahlten Brennelemente mit Rückführung der unverbrauchten Kernbrennstoffe und Endlagerung der Abfälle nach dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik sicherheitstechnisch realisierbar ist. Die Arbeiten zur Verwirklichung des integrierten Entsorgungskonzepts sollen daher fortgesetzt werden. Um die notwendige Zwischenlagerung der ausgedienten Brennelemente auf einen möglichst kurzen Zeitraum zu begrenzen, soll eine Wiederaufarbeitungsanlage so zügig errichtet werden, wie unter Beachtung aller in Betracht kommenden Gesichtspunkte möglich ist. Gleichzeitig werden auch andere Entsorgungstechniken – wie z.B. die direkte Endlagerung von Brennelementen – auf ihre Realisierbarkeit und sicherheitstechnische Bewertung untersucht. Mitte der 80er Jahre soll dann eine Entscheidung gefällt werden. Die Erkundung und bergmännische Erschließung des Salzstockes Gorleben wird zügig vorangeführt, so daß die für die notwendigen Entscheidungen erforderlichen Kenntnisse über den Salzstock in der zweiten Hälfte der 80er Jahre vorliegen. Die oberirdischen Fabrikationsanlagen für die eine oder andere Entsorgungstechnik sowie die Anlagen zur Sicherstellung und Endlagerung der radioaktiven Abfälle sollen spätestens zum Ende der 90er Jahre betriebsbereit sein. Soweit in stark gekürzter Form der Beschluß der Regierungschefs vom 28. September 1979.

Aufgrund dieses Beschlusses wurden 1980 die früheren Grundsätze zur Entsorgungsvorsorge modifiziert. Danach ist die sachgerechte sichere Verbringung der anfallenden bestrahlten Brennelemente in ein geeignetes Lager mit dem Ziel ihrer Verwertung durch Wiederaufarbeitung oder ihre Behandlung zur Endlagerung und die Behandlung und Beseitigung der radioaktiven Abfälle nachzuweisen.

Der Nachweis der Entsorgungsvorsorge ist zu konkretisieren durch Anpassung der Vorsorge an die Fortschritte bei der Verwirklichung des integrierten Entsorgungskonzeptes, durch Vorlage von Verträgen über die endgültige Übernahme der Brennelemente bzw. über die Wiederaufarbeitung im Ausland oder durch eine vergleichbare andere Lösung.

Diese Beschlüsse und Grundsätze zeigen den Weg für die notwendige Entsorgung der Kernkraftwerke, ohne daß voreilige Entscheidungen getroffen werden müssen.

Es sei jedoch nicht verschwiegen, daß sich die deutsche Nuklearindustrie baldige politische Entscheidungen über den einzuschlagenden Weg der Entsorgung wünscht. Sie sind notwendig, um die Energieversorgung längerfristig garantieren zu können. Sie sind auch vertretbar nach dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik.

Die Bereitschaft der hessischen Landesregierung, den Antrag für den Bau einer kleinen Wiederaufarbeitungsanlage in Hessen nach Benennung eines Standortes zügig zu bearbeiten, ist unter diesem Gesichtspunkt besonders zu begrüßen.

5. Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß sich die Technik der Wiederaufarbeitung ausgedienter Brennelemente bewährt hat. Die Anpassung an gestiegene Anforderungen und den erhöhten Durchsatz bringt keine prinzipiell neuen Probleme mit sich.

Für die Behandlung der in der Anlage anfallenden Abfälle gibt es entweder bewährte Verfahren, oder aber Neuentwicklungen befinden sich in einem fortgeschrittenen Stadium. Mit Ausnahme der Krypton-Abtrennung aus dem Auflöserabgas läßt sich unabhängig vom Stand der Technik die Wiederaufarbeitung von der Abfallbehandlung durch eine Zwischenlagerung entkoppeln.

Den Auswirkungen von Störfällen in der Anlage wird durch ein enges Netz von Sicherheitsvorkehrungen und Gegenmaßnahmen begegnet.

Alternative Brennstoffzyklen versprechen kaum Vorteile im Hinblick auf die Proliferationssicherheit gegenüber dem Konzept des Deutschen Entsorgungszentrums, das Anlagen der Wiederaufarbeitung, der Refabrikation neuer Brennelemente und der Abfallbeseitigung an einem Standort vereint.

Literatur

Systemstudie Radioaktive Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland. Im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technologie, Band 1-5, 1976/77

Grundsätzliche sicherheitstechnische Realisierbarkeit des Entsorgungszentrums. Beurteilung und Empfehlungen der Reaktorsicherheitskommission und der Strahlenschutzkommission vom 20.10.1977. Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS), Köln 1977

Bericht über das in der Bundesrepublik Deutschland geplante Entsorgungszentrum für ausgediente Brennelemente aus Kernkraftwerken, 2. Auflage. Deutsche Gesellschaft für Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen mbH, Hannover 1977

Brennelement-Zwischenlager Ahaus, Kurzbeschreibung, Stand Januar 1978; Deutsche Gesellschaft für Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen mbH, Hannover; STEAG Kernenergie GmbH, Essen 1978

Bekanntmachung der Grundsätze zur Entsorgungsvorsorge für Kernkraftwerke. Bundesanzeiger Nr. 58 vom 22. März 1980 (s. auch: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 30. Jahrgang (1980) Heft 4, S. 303)

Brennelementzwischenlagerung in Transportbehältern. Preußische Elektrizitäts-Aktiengesellschaft (Preußenelektra), Hannover, 2. Auflage, März 1980

Bachner, D. u.a.: Untersuchungen zum Vergleich größtmöglicher Störfallfolgen in einer Wiederaufarbeitungsanlage und in einem Kraftwerk. Institut für Reaktorsicherheit (IRS), Arbeitsbericht 290, Köln 1976

Bachner, D. u.a.: Untersuchungen zum Vergleich größtmöglicher Stöfallfolgen in einer Wiederaufarbeitungsanlage und in einem Kraftwerk. (Kritische Anmerkungen zum Arbeitsbericht AB-290). Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS), GRS-A-59, Köln, November 1977

Böhmer, V.: Störfallerfahrungen mit Wiederaufarbeitungsanlagen. Fortbildungsseminar „Sicherheit von Wiederaufarbeitungsanlagen", Köln, 22.-23.2.1978. Kerntechnische Gesellschaft, Bonn 1978

Bünemann, D.: Faktensammlung zur Kerntechnik. Herausgeber: Kerntechnische Gesellschaft, Bonn 1979

Bundesminister für Forschung und Technologie (Hrsg.): Zur friedlichen Nutzung der Kernenergie. Eine Dokumentation der Bundesregierung. Bonn 1977

Keller, C. und Möllinger, H.: Kernbrennstoffkreislauf, Band I und II. Dr. Alfred Huttig Verlag, Heidelberg 1978

Laser, M.: Verglasung hochradioaktiver Abfälle. Jahresbericht der Kernforschungsanlage Jülich GmbH 1975

Laser, M.: Abtrennung von radioaktiver Edelgasen in Wiederaufarbeitungsanlagen. Jahresbericht der Kernforschungsanlage Jülich GmbH 1976/77

Laser, M. und Merz, E.: Sorgen mit den radioaktiven Abfällen? Zeitung der IG Metall für die Bundesrepublik Deutschland METALL, Nr. 25/26 vom 12.12.1977

Pfaffelhuber, J.K.: Das Sicherheitskonzept der Bundesregierung zur Entsorgung. Entsorgung der Kerntechnik, Symposium am 19. und 20. Januar 1976 in Mainz, Berichte. Deutsches Atomforum e.V., Bonn 1976

Popp, M., Patermann, C. und Wagner, H.F.: Die wesentlichen Ergebnisse von INFCE (International Nuclear Fuel Cycle Evaluation). Atomwirtschaft-Atomtechnik), Bd. 25 (1980), Heft 4, S. 183-189

Repke, W. und Buschmann, W.: Sicherheitstechnische Maßnahmen zur Verhinderung bzw. Beherrschung von Störfällen im Entsorgungszentrum. Fortbildungsseminar „Sicherheit von Wiederaufarbeitungsanlagen", Köln, 22.-23.2.1978. Kerntechnische Gesellschaft, Bonn 1978

Schmidt-Küster, W.J.: Entsorgung der Kerntechnik – das deutsche Konzept. Schweizerische Vereinigung für Atomenergie, Beilage zum Bulletin Nr. 15/16, Sept. 1976

Die Tieflagerung radioaktiver Abfälle in Salzformationen der Bundesrepublik Deutschland

E. Albrecht

Institut für Tieflagerung der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München

1. Einleitung

Bei der friedlichen Nutzung der Kernenergie fallen radioaktive Abfälle aller Kategorien an, die säkular sicher gelagert werden müssen. Unter Berücksichtigung des Sicherheitsaspektes sowie auch der Wirtschaftlichkeit ist von den verschiedenen Möglichkeiten der Endlagerung diejenige in Salzformationen des tiefen geologischen Untergrundes als die sicherste anzusehen. Dieses gilt besonders für die Länder Westeuropas mit ihrer hohen Bevölkerungsdichte und ihrem regenreichen Klima.

Die Gründe sind:

- Die Salzformationen des Zechsteins sind vor rund 220 Mio. Jahren durch Meeresaustrocknung entstanden, vor ca. 100 Mio. Jahren im norddeutschen Raum zu Salzstöcken aufgefaltet worden und haben im Regelfall seitdem ihre Beschaffenheit kaum geändert.
- Salzformationen in Form von Diapiren, von denen wir in Norddeutschland mehr als 200 haben (Abbildung 1), garantieren im Regelfall einen sicheren hydrologischen Abschluß, so daß möglicherweise freiwerdende Aktivitäten nicht in den Biozyklus gelangen können.
- Nordeuropa ist ein weitgehend erdbebenfreies Gebiet.
- Große Hohlräume von mehreren 10000 m^3 Inhalt lassen sich bei wirtschaftlich vertretbaren Kosten herstellen und stehen gleichzeitig ohne Verwendung jeglichen Ausbaues über lange Zeit völlig offen.
- Die relativ gute Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz ist von besonderer Bedeutung bei der vorgesehenen Endlagerung hochradioaktiver wärmeentwickelnder Abfälle.

Unter Berücksichtigung all dieser Gegebenheiten erwarb der Bund im Jahre 1965 das stillgelegte Salzbergwerk Asse, das etwa 20 km südöstlich von Braunschweig im Land Niedersachsen liegt, und übertrug die Nutzung desselben der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung, deren einziger Gesellschafter der Bund ist, um im Rahmen umfangreicher Forschungs- und technischer Entwicklungsprogramme die Einlagerung radioaktiver Abfallstoffe aller Kategorien zu erproben und durchzuführen.

Einer der Hauptschwerpunkte liegt hierbei auf der Entwicklung geeigneter und sicherer Einlagerungstechnologien. Die Schachtanlage Asse ist also eine Pilotanlage. Die hier gemachten Erfahrungen sind wichtig und notwendig für die Planung und den Bau eines großen Bundesendlagers auf einem norddeutschen Salzstock, in dem radioaktive Abfälle aller Kategorien sicher gelagert werden können.

Als Standort für dieses Bundesendlager wurde vom Niedersächsischen Kabinett der Salzstock Gorleben im Kreis Lü-

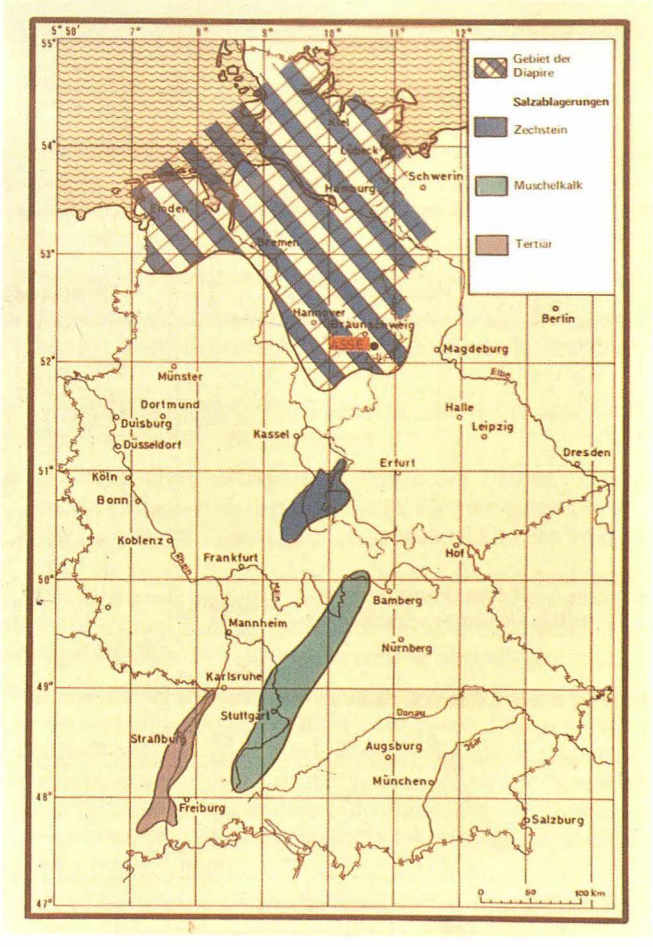


Abb. 1:
Salzvorkommen in der Bundesrepublik Deutschland

chow-Dannenberg nahe der Elbe vorgeschlagen. Aufgrund seismischer Untersuchungen sind zur Zeit nur die Größe des Salzstockes mit rund 38 bis 42 km^2 sowie die Mächtigkeit der Deckgebirgsschichten mit rund 300 m bekannt. Im Vergleich zu Gorleben ist dagegen der Salzstock Asse mit etwa 4,2 km^2 Größe relativ klein.

Weitgehend unbekannt ist dagegen zur Zeit noch die geologische Feinstruktur des Salzstockes Gorleben, da mit der Herstellung von Explorationsbohrungen erst im September 1979 begonnen werden konnte. Unter federführender Leitung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig sind bis zum Frühjahr 1981 zwei geologische Tiefboh-

rungen bis ca. 2000 m Tiefe am Rand des Salzstockes niedergebracht worden, deren Auswertungen sich noch in Bearbeitung befinden. Weitere Bohrungen können folgen, weil zur Beurteilung der Eignung – die Eignungsanalyse – eine umfangreiche geohydrologische Erkundung Voraussetzung ist, um einmal ein möglichst genaues Bild über die innere Struktur des Salzstockes sowie zum anderen über die Beschaffenheit des wasserführenden Deckgebirges, insbesondere im Grenzbereich Salinar/tiefere Deckgebirgsschichten, zu erhalten. Die wichtigsten Fragen sind hierbei die nach der Beschaffenheit des Salzhutes, nach der Mächtigkeit der Steinsalzpartien, die ausschließlich für die Einlagerung in Frage kommen, sowie die Frage nach Vorhandensein, Lage und Mächtigkeit von Kaliflözen, insbesondere vom Carnallit (solche Flöze sind für die Einlagerung nicht geeignet).

Bei der Größe des Salzstockes Gorleben kann jedoch mit einem relativ hohen Wahrscheinlichkeitsgrad davon ausgegangen werden, daß er die in ihn gesetzten Erwartungen erfüllt.

und Muschelkalk bestehen, liegt der eigentliche Salzstock, der sich aus Schichten der deutschen Zechsteinserie der Permformation zusammensetzt (Abbildung 2). (Perm ist der letzte Abschnitt des Erdaltertums; er dauerte – vor 200 Mio. Jahren – etwa 25 Mio. Jahre. Zu dieser Zeit entwickelten sich die ersten Nadelhölzer, Säugetiere gab es noch nicht. Die Auffaltung der Alpen begann ca. 100 Mio. Jahre später.)

Im Salzbergwerk Asse II wurde von 1908-1925 Kalisalz (Carnallit) und von 1916-1963 Steinsalz gefördert. Während die Kaliabbaue verfüllt wurden, entstanden durch den Steinsalzabbau über 100 Abbaukammern im Älteren und Jüngeren Steinsalz im Bereich von 15 Sohlen zwischen 490 und 800 m Tiefe (Abbildung 3). All diese Abbaukammern repräsentieren ein Hohlraumvolumen von rund 3,5 Mio. m^3. Jede Kammer ist 60 m lang, 40 m breit und 15 m hoch und hat somit ein Volumen von 36000 m^3.

Es soll hier nicht unerwähnt bleiben, daß bereits 1906 das 1,4 km westlich gelegene Kalibergwerk Asse I durch das unsach-

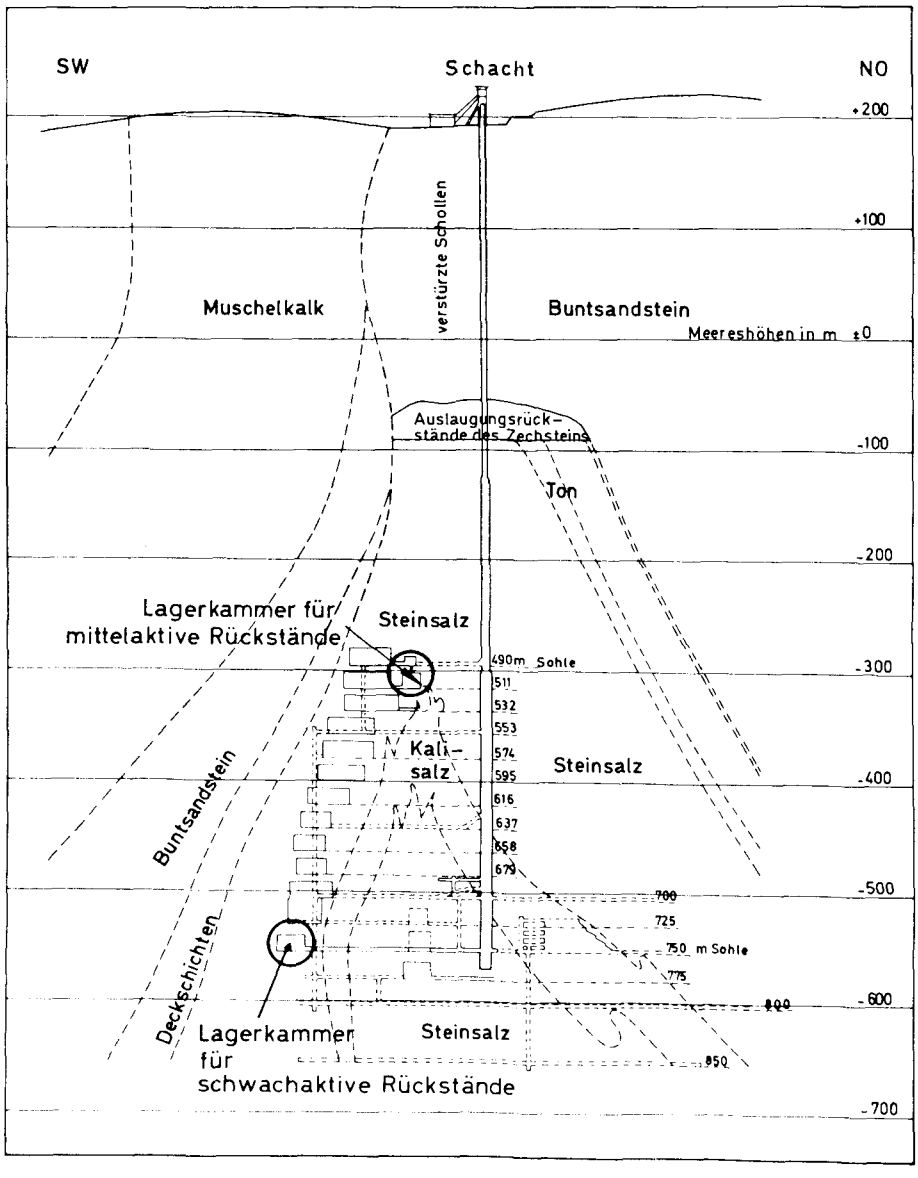


Abb. 2:
Schnitt durch den Asse-Sattel im Bereich des Schachtes II

2. Versuchsanlage Asse

2.1 Geologische und Grubensituation

Die Asse ist ein Höhenzug von ca. 8 km Länge, der im nördlichen Harzvorland gelegen ist. Er besteht aus einem asymmetrischen Sattel der Triasformation. Unter mehrere hundert Meter mächtigen Deckgebirgsschichten, die aus Buntsandstein

gemäße Anbohren von wasserführenden Deckgebirgsschichten aus einer Abbaukammer heraus ersoff. Ebenfalls lief der rund 3 km ostwärts gelegene Schacht Asse III – ein Grubengebäude war hier nicht vorhanden – nach seiner Stillegung 1923 allmählich von oben her voll Wasser. Die Sicherheitspfeiler zwischen Asse II einerseits und den beiden benachbarten Anlagen Asse I und Asse III andererseits sind jedoch so mächtig, daß nach eindeutiger Aussage von national und internatio-

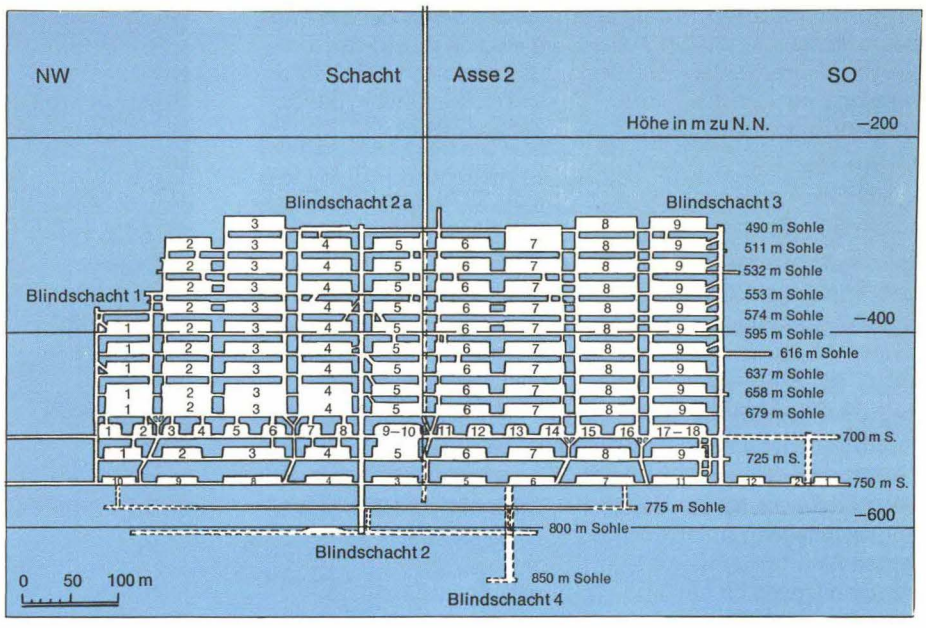


Abb. 3:
Längsschnitt durch das Grubengebäude Asse II

nal anerkannten Fachgutachtern ein Ersaufen der Schachtanlage Asse II von dieser Seite her nach menschlichem Ermessen ausgeschlossen werden kann.

Unter Berücksichtigung dieser Gegebenheit sowie der Tatsachen, daß

- der Salzstock Asse relativ klein ist,
- der Zuschnitt des Grubengebäudes seinerzeit für den Zweck der Salzgewinnung konzipiert wurde,
- Carnallit abgebaut und auch durchörtert wurde (d.h. es wurden darin Strecken aufgefahren),

steht eindeutig fest, daß die Schachtanlage Asse II nur eine nationale Versuchslagerstätte sein kann und auch ist.

2.2 Bisher gesammelte Erfahrungen

2.2.1 Niedrigaktive Abfälle

Parallel mit umfangreichen Instandsetzungsarbeiten unter- und übertage wurden von April 1967 bis März 1974 in vier Einlagerungskammern auf der 750-m-Sohle mehr als 10000 m^3 niedrigradioaktiver Abfälle versuchsweise eingelagert.



Abb. 4:
Einlagerung von schwachradioaktiven Abfallstoffen

Die Abfälle müssen in fester Form in 200-l-Fässern verpackt angeliefert werden. Flüssige Abfälle, wie z.B. Verdampferkonzentrate oder auch Fällschlämme, sind an Beton oder Bitumen zu fixieren.

Die während dieser Zeit erprobten drei Einlagerungstechniken,

- senkrechtes Übereinanderstellen der Fässer in Viererreihen mit entsprechenden Zwischengängen zu Kontrollzwekken,
- horizontales Stapeln der Fässer in sechs bis acht Lagen übereinander mit Gabelstaplern
- und schließlich horizontales Stapeln der Fässer in bis zu dreizehn Lagen übereinander unter Einsatz eines Spezialfahrzeuges mit Teleskoparm und schwenkbarem Faßgreifer,

hatten sich zwar bewährt, jedoch waren diese Verfahren im Hinblick auf den Zeitaufwand sowie die Strahlenbelastung des Einlagerungspersonals nicht als optimal anzusehen.

Deshalb wurde seit 1974 die Einlagerung der Fässer nach einer neuen Methode erfolgreich erprobt. Dabei erfolgt die Befüllung der Kammern nicht durch Stapeln von unten nach oben, sondern von oben nach unten durch Abkippen der Fässer aus einem Schaufelfahrlader über eine Salzböschung, wobei die Fässer in kurzen Zeitabständen mit losem Salz zugeschüttet werden (Abbildung 4).

Dieses „Einpökeln" der Abfallfässer bietet folgende Vorteile:

- Die Fässer werden nicht mehr einzeln gehandhabt, was zu einem höheren Durchsatz bei gleichzeitig kürzerem Aufenthalt des Personals in der Nähe der Fässer führt,
- die eingelagerten Fässer werden nach kurzer Zeit mit abschirmendem Salz abgedeckt,
- durch das Befüllen der Kammern von oben wird eine wesentlich bessere Raumausnutzung erreicht und außerdem ermöglicht, künftig auch die viel höheren Kammern der darüberliegenden Sohlen voll zu nutzen,
- auch im Hinblick auf die langfristige Sicherheit bedeutet diese Methode einen wesentlichen Vorteil, da im Falle eines Wassereinbruchs (GaU) zunächst das in großer Menge vorhandene lose Salz schnell gelöst und damit ein Abtragen von Salz aus den Pfeilern und Schweben des Grubengebäudes sowie infolge der schnellen Sättigung der Salzlösung ein Angriff der eingelagerten radioaktiven Abfälle sehr erschwert würden.

Bis Ende 1976 waren insgesamt rund 73000 Behälter mit schwachaktiven Abfällen in der Asse eingelagert. In den mehr als vier Jahren „Langzeiteinlagerung" wurden wiederum so viele Erfahrungen gesammelt, daß eine Überarbeitung der bisherigen Annahmebedingungen angebracht war.

Mit der Verlängerung der Betriebsgenehmigung nach § 3 der Strahlenschutzverordnung ab 1. Januar 1976 traten die überarbeiteten „Bedingungen für die Lagerung von schwachradioaktiven Abfällen im Salzbergwerk Asse" in Kraft.

Im Hinblick auf die rationellere und gleichzeitig bezüglich des Strahlenschutzes des Betriebspersonals und der langfristigen Sicherheit des Endlagers vorteilhafteren Methode des „Einpökelns" der Abfallfässer wurden insbesondere die Anforderungen an das Abfallprodukt und den Faßdeckelverschluß verschärft.

Die Strahlenbelastung des Asse-Personals konnte durch die Weiterentwicklung der Einlagerungstechnik trotz der schnell angewachsenen Abfallmengen und der gleichzeitig angestiegenen Aktivitätsgehalte je Behälter stets weit unterhalb der zulässigen Dosen für beruflich strahlenexponierte Personen gehalten werden (Abbildung 5). Sie liegt heute im Durchschnitt knapp oberhalb der Filmdosimeternachweisgrenze von 40 mrem pro Monat.

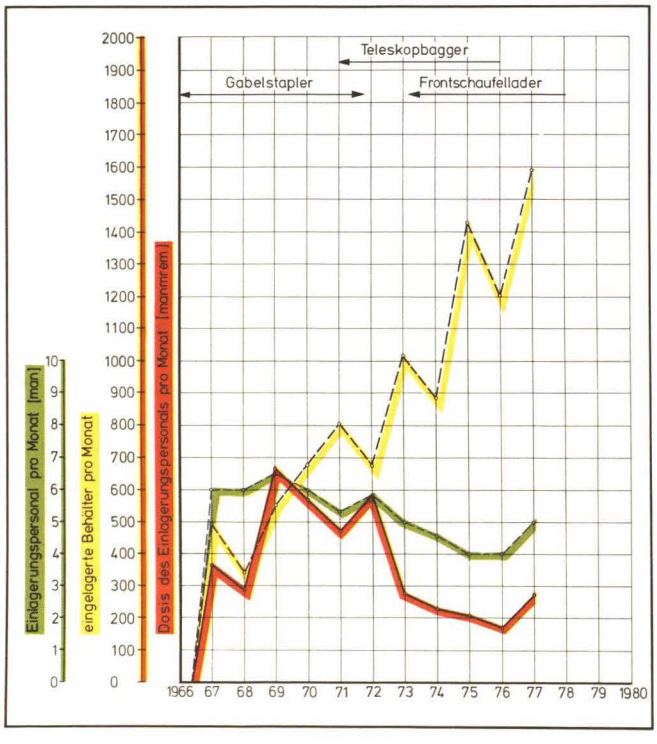


Abb. 5:
Eingelagerte Behälter und Strahlenbelastung des Personals von 1966 bis 1976

Mit der Inbetriebnahme der Wiederaufarbeitungsanlage in Karlsruhe (WAK) fielen in zunehmendem Umfang schwachaktive Abfälle an, die doch schon zu so hohen Dosisleistungen an der Faßoberfläche führten, daß diese Fässer in einen Betonbehälter eingesetzt werden mußten. Seit 1973 werden auch derartige „verlorene Betonabschirmungen" mit Einsatzbehältern eingelagert (Abbildung 6).

Trotz der erschwerten Handhabung erwiesen sich diese Betonbehälter als vorteilhaft bezüglich der Strahlenexposition des Einlagerungspersonals.

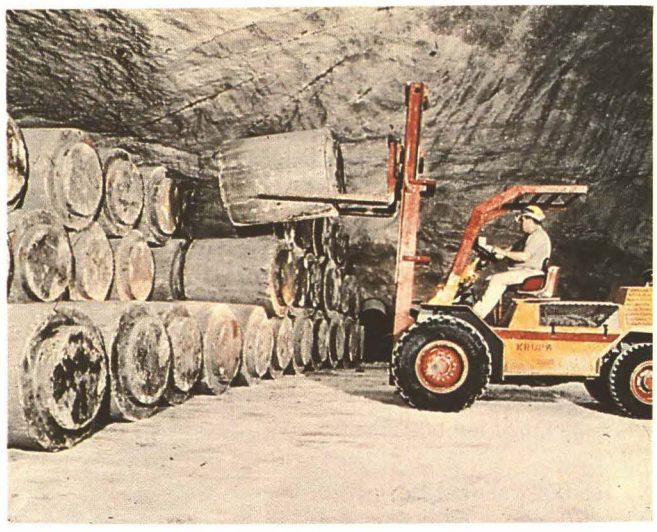


Abb. 6:
Einlagerung schwachaktiver Abfälle mit verlorener Betonabschirmung

2.2.2 Mittelaktive Abfälle

In Beton oder Bitumen fixierte Konzentrate, kontaminierte und/oder aktivierte Metallteile (z.B. Brennstabhüllrohrstücke) und sonstige feste radioaktive Abfälle erreichen Aktivitäten bis zu 10^4 Ci pro 200-l-Faß bzw. Dosisleistungen bis zu 10^5 R/h an der Faßoberfläche. Um derartige Abfallfässer handhaben zu können, ist eine zusätzliche Abschirmung notwendig; eine Einlagerung in begehbaren Kammern, wie im Falle der schwachaktiven Abfälle, ist nicht möglich.

Es wurde deshalb eine spezielle Methode zur Einlagerung mittelaktiver Abfälle entwickelt:

- Die Fässer werden in Abschirmbehältern bis nach untertage transportiert; je nach erforderlicher Abschirmung kommen dabei zwei verschiedene Einzelbehältertypen oder auch ein Sammelbehälter für sieben Fässer (Abbildung 7) zum Einsatz. Da der Sammelbehälter bis zu 35 t wiegt, werden die Fässer für den Transport nach untertage in Einzelabschirmbehälter umgeladen.

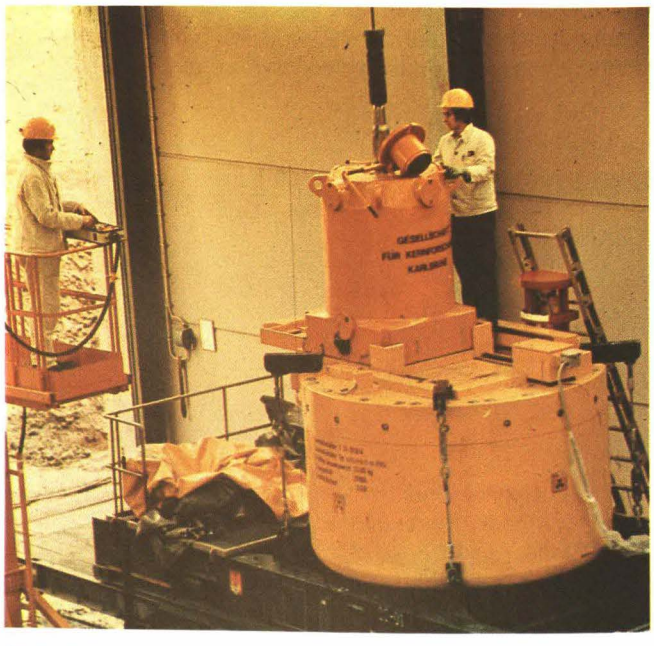


Abb. 7:
Sammelbehälter für Fässer mit mittelradioaktiven Abfällen

- Im Füllort der 490-m-Sohle hebt eine Entlade- und Beschickkran den Abschirmbehälter vom Korb der Förderanlage ab und setzt ihn auf ein Spezialtransportfahrzeug. Letzteres befördert den Einzelabschirmbehälter zur Beschickkammer. In dieser Beschickkammer wird mittels eines 10-t-Krans der Abschirmbehälter vom Fahrzeug auf den Strahlenschutzschieber des Transportbohrloches abgesetzt. Nach dem Öffnen der Strahlenschutzschieber des Bohrloches sowie des Abschirmbehälters erfolgt mittels eines 1-t-Krans das Ablassen des 200-l-Abfallfasses aus dem Abschirmbehälter heraus durch das Transportbohrloch in die darunterliegende, hermetisch abgeschlossene Einlagerungskammer (Abbildung 8).

Die schweren Abschirmbehälter während der Manipulation und die 6 m dicke Salzschwebe sowie die allseitig mächtige Wandung der Einlagerungskammer bieten so ausreichenden Strahlenschutz, daß die Strahlenbelastung des Einlagerungspersonals stets unter der Dosimeternachweisgrenze von 40 mrem/Monat blieb.

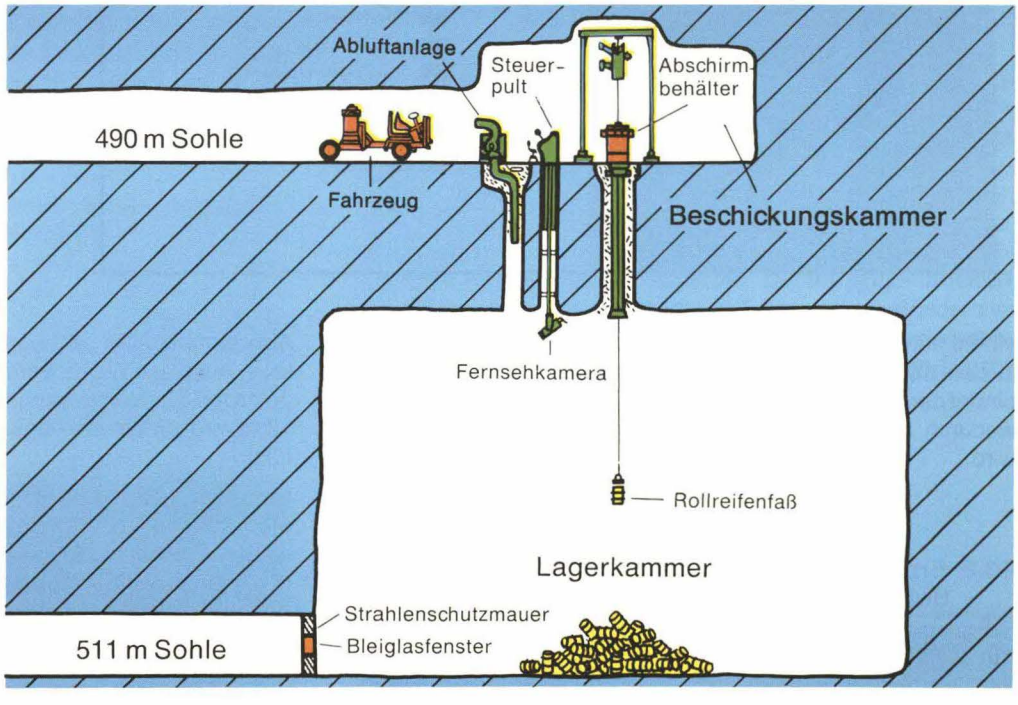


Abb. 8:
Einlagerung mittelaktiver Abfälle

Die Einlagerung mittelaktiver Abfälle im Einlagerungsverfahren in Kammern erfolgte von September 1972 bis März 1977. Es wurden während dieser Versuchsphase rund 1 300 Fässer mit mittelaktivem Abfall eingelagert. Obwohl die Einlagerungsgenehmigung nicht verlängert wurde, reichen die bisher gesammelten Erfahrungen für die bereits erfolgte erste standortunabhängige Planung eines Endlagerbergwerkes aus.

2.3 Absehbare Weiterentwicklung

Die Einlagerung schwachaktiver Abfälle erfolgte bis zum Auslaufen der Einlagerungsgenehmigung Ende 1978 im Langzeitbetrieb. Somit stehen der Planung und auch späteren Erstellung eines großen Endlagerbergwerkes für die Einlagerung großer Volumina an schwach- und mittelradioaktiven Abfällen auf einem durch Eignungsanalyse erkundeten Salzstock aufgrund der erprobten Einlagerungstechnologien auf der Pilotanlage Asse keine Hindernisse mehr im Weg. Zwecks Optimierung der Einlagerungsverfahren für schwach- und mittelaktive Abfälle sind jedoch noch weitere Forschungsarbeiten erforderlich. Wann diese Arbeiten erfolgen können, hängt sehr wesentlich von der Genehmigungssituation ab, da nach Verabschiedung der 4. Novelle zum Atomgesetz auch in der Versuchsanlage Asse weitere Einlagerungsgenehmigungen nur nach positivem Ausgang eines Planfeststellungsverfahren nach § 9b Atomgesetz erteilt werden können.

2.3.1 Forschungskaverne

Er erscheint jedoch sinnvoll, daß im Hinblick auf eine technische und sicherheitliche Optimierung der Einlagerung mittelradioaktiver Abfälle neue Einlagerungmethoden entwickelt werden, die bei einem Höchstmaß an Sicherheit einen größeren Mengendurchsatz ermöglichen. Es ist deshalb geplant, daß etwa ab 1981 die sogenannte „Kavernentechnik" in einer inaktiven Phase auf technische und sicherheitliche Realisierbarkeit erprobt wird. Eine eventuell mögliche Einlagerung von radioaktiven Abfällen kann jedoch erst nach positivem Ausgang des Planfeststellungsverfahrens (und daraufhin erteilter Genehmigung) erfolgen.

Auf der Schachtanlage Asse wurde eine ca. 10000 m³ große Versuchskaverne in rund 1 000 m Tiefe bergmännisch hergestellt, die durch einen gesonderten, neu geschaffenen Schacht von der Erdoberfläche aus beschickt werden soll (Abbildung 9). Die Fässer werden aus dem Abschirmtransportbehälter am Schacht über eine Abschirmzelle entladen und anschließend ohne Abschirmung in die Kaverne befördert.

Für den Fall, daß sich diese neue Einlagerungstechnik voll bewährt, könnten die auf der Pilotanlage Asse gesammelten Erfahrungen etwa ab Anfang der neunziger Jahre in die Planung und den Bau einer Großkavernenanlage im Bereich des neu zu erstellenden Endlagerbergwerks auf dem Salzstock Gorleben eingebracht werden.

Die Planung sieht vor, zwei bis drei Kavernen in einer Größe von mindestens je 100000 m³ auszusolen, wie dieses heute bereits für die Speicherung von Erdöl in küstennahen Salzstöcken erfolgt. Das Herstellen solcher Großkavernen im Steinsalz ist bergmännische Routine. Wegen des großen Wasserbedarfs zum Solen einerseits sowie der sicheren Ableitung der Sole andererseits eignen sich nur entsprechend große Salzstöcke im Nahbereich vom Unterlauf großer Flüsse oder der Küste für die Anlage solcher Kavernen.*)

Bei positivem Ausgang der Erprobung dieser neuen Einlagerungstechnik, könnten die in flüssiger Form anfallenden schwach- und auch mittelradioaktiven Abfälle mit Zement zu

*) Das Salz, das beim Erstellen der Schächte, Strecken und Einlagerungskammern des Bundesendlagers in fester Form anfällt, soll voraussichtlich übertage zwischengelagert werden. Zum großen Teil wird es später wieder zum Verfüllen benötigt.

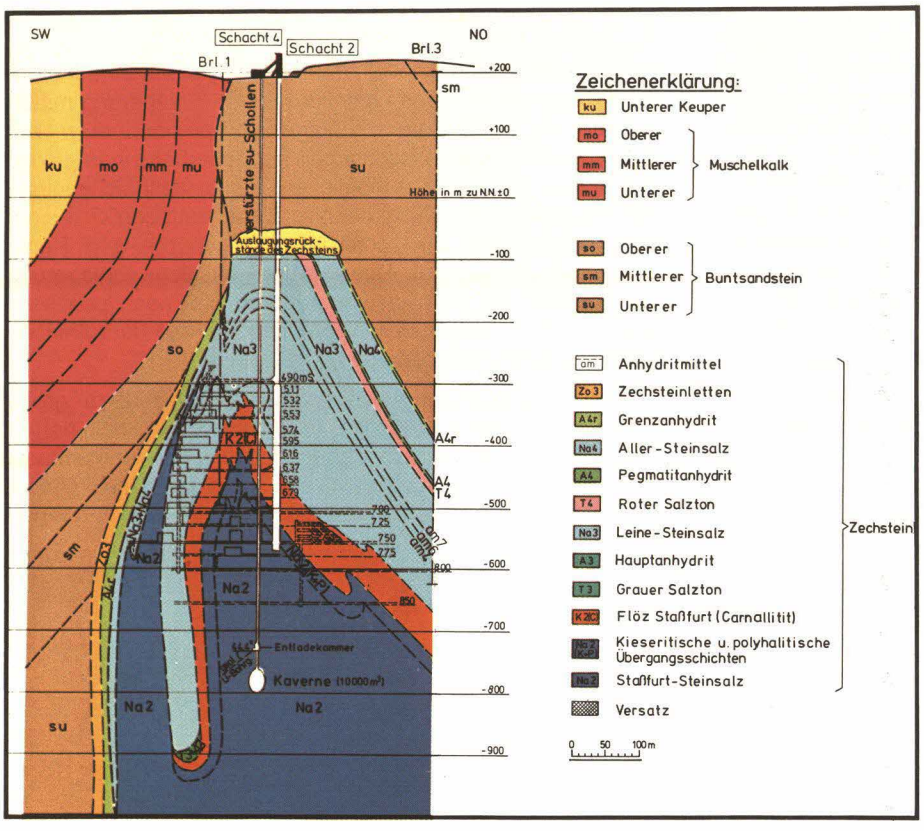


Abb. 9:
Lage der Forschungskaverne im Asse-Sattel

einem dünnflüssigen Brei vermischt und über eine Rohrleitung in den Kavernenhohlraum gepumpt werden. In der Kaverne bindet der Zement den Brei zu einem monolithischen Block ab, wodurch nahezu der alte Gebirgsverband wiederhergestellt wird.

2.3.2 Erprobung der Einlagerungstechnik in tiefen Bohrlöchern

Für mittelaktive Abfälle höherer Aktivität, jedoch noch ohne signifikante Wärmeentwicklung, ist die Einlagerungstechnik in tiefen Bohrlöchern zu erproben, weil hierdurch das Sicherheitsbarrierensystem erhöht wird. Für die Durchführung dieses für Gorleben relevanten Einlagerungsversuchs würden sich AVR-Brennelementkugeln gut eignen.

Während die oxidischen Graphitbrennelemente des AVR-Kernkraftwerkes in Jülich in der Versuchsanlage JUPITER der Kernforschungsanlage Jülich (KFA) aufgearbeitet werden sollen, ist geplant, die carbidischen Brennelemente dieses Reaktors, für die es keine Wiederaufarbeitungsanlage geben wird, in der Asse endgültig einzulagern. Es handelt sich hierbei um ein in der Menge begrenztes singuläres Forschungsprogramm.

Der Gesamtanfall an carbidischen Brennelementgraphitkugeln beträgt 100000 Stück. Die Anlieferung dieses Abfalls in Stahlbehältern mit je 1000 Brennelementkugeln Inhalt, gesichert durch entsprechende Abschirmbehälter, könnte gegebenenfalls nach positivem Ausgang des für die Versuchsanlage Asse erforderlich gewordenen Planfeststellungsverfahrens erfolgen.

Für die sichere Einlagerung wurden im Älteren Steinsalz auf der 750-m-Sohle vier Bohrungen von 37 m Tiefe und 65 cm Durchmesser erstellt. Der Transport der Einzelabschirmbehälter zum Einlagerungsort erfolgt auf die gleiche Weise wie derjenige der bereits eingelagerten mittelradioaktiven Abfälle. Nach dem Absetzen der Abschirmbehälter auf dem Strahlenschutzschieber wird der Stahlbehälter mittels einer Krananlage aus der Abschirmung in das Bohrloch abgesenkt. Der leere Abschirmbehälter geht zur neuen Befüllung wieder nach übertage. Auf diese Weise werden 25 Behälter in eine Bohrung abgelassen. Der verbleibende obere Rest des Bohrloches von ca. 12 m wird mit Wechsellagen von Salz, Beton und Silikagel verfüllt.

Das Aktivitätsinventar eines Stahlbehälters mit 1000 Brennelementkugeln beträgt rund 22000 Curie. Da keine nennenswerte Wärmeentwicklung auftritt – 70 Watt/Behälter –, sind sie in die Gruppe der mittelradioaktiven Abfälle einzuordnen. Dagegen enthalten diese unaufgearbeiteten Brennelemente noch in geringen Mengen die radioaktiven Gase Tritium und Krypton-85. Trotz dieser Gegebenheiten ist aus Gründen der Sicherheit eine Rückholung der Brennelementkugeln nicht erforderlich, weil für den GaU (Größter anzunehmender Unfall) folgende Sicherheitsbarrieren vorgeschaltet sind:

- Umhüllung der Kernbrennstoffteilchen mit Pyrokohlenstoffschichten,
- Einbettung des Kernbrennstoffes – 1 Gramm Uran, 5 Gramm Thorium je Brennelementkugel – in eine Graphitmatrix,
- der Kugelmantel besteht aus Graphit[1]),
- Die Behälterkanne besteht aus Stahl, die Befüllöffnung ist hermetisch verschweißt,
- gasdichter Verschluß des Resthohlraumes einer jeden Bohrung,
- nach Beendigung der Einlagerung der 100 Behälter in vier Bohrlöchern Verfüllen der Lagerkammer mit Salzhaufwerk.

Wissenschaftliche und technische Untersuchungen haben den eindeutigen Nachweis erbracht, daß es selbst bei einem GaU – das wäre das Ersaufen der Grube – ausgeschlossen werden kann, daß Aktivitäten freigesetzt werden. Erst aufgrund dieser Gegebenheiten wurden von den Genehmigungsbehörden die

[1]) Graphit dient z.B. als Behältermaterial für den Transport von konzentrierten Säuren und Laugen. Er ist also resistent gegen gesättigte Steinsalz- oder auch Kalilaugen.

entsprechenden Einlagerungsgenehmigungen erteilt, von denen jedoch bisher kein Gebrauch gemacht wurde.

Diesem singulären Forschungsvorhaben kommt deshalb große Bedeutung zu, weil mit diesen mittelaktiven Abfällen die Transport- und Einlagerungstechnologie für die später vorgesehene Einlagerung von hochaktiven Glasprodukten erprobt werden soll und muß.

2.4 Spätere Einlagerung hochaktiver Abfälle

Die ebenfalls vorgesehene Versuchseinlagerung hochaktiver, Zerfallswärme entwickelnder Abfälle in der Asse befindet sich noch in der Vorbereitungsphase. Bei der rückholbaren Einlagerung derartiger Abfälle müssen sowohl die Strahlungs- als auch die Wärmeprobleme beherrscht werden. Gerade dem letztgenannten Problem kommt besondere Bedeutung zu, da die Glasprodukte bei der Anlieferung zur Pilotanlage noch eine Zerfallswärme von rund 2,0 kW pro Glasblock (ca. 1 m hoch, 0,3 m Durchmesser) entwickeln. Das entspricht einer Temperatur von maximal 350°C im Inneren des Glases und an der Oberfläche des Glasblocks von ca. 200°C. Die Aktivität pro Glasblock beträgt dann noch etwa 150000-200000 Curie (Abbildung 10).

Im Rahmen dieses Forschungs- und Entwicklungsprogrammes wurden bereits drei Temperaturmeßfelder im Jüngeren Steinsalz gefahren, das heißt, Temperaturversuche mit elektrisch beheizten, echte Hochaktivabfälle simulierenden Probekörpern, die in bis zu 50 m tiefen Bohrlöchern installiert wurden (Temperatureinfluß, aber keine Aktivität). Ein viertes Temperaturmeßfeld im Älteren Steinsalz (Abbildung 11) wurde Anfang 1980 in Betrieb genommen. Weitere Temperaturversuchsfelder werden folgen.

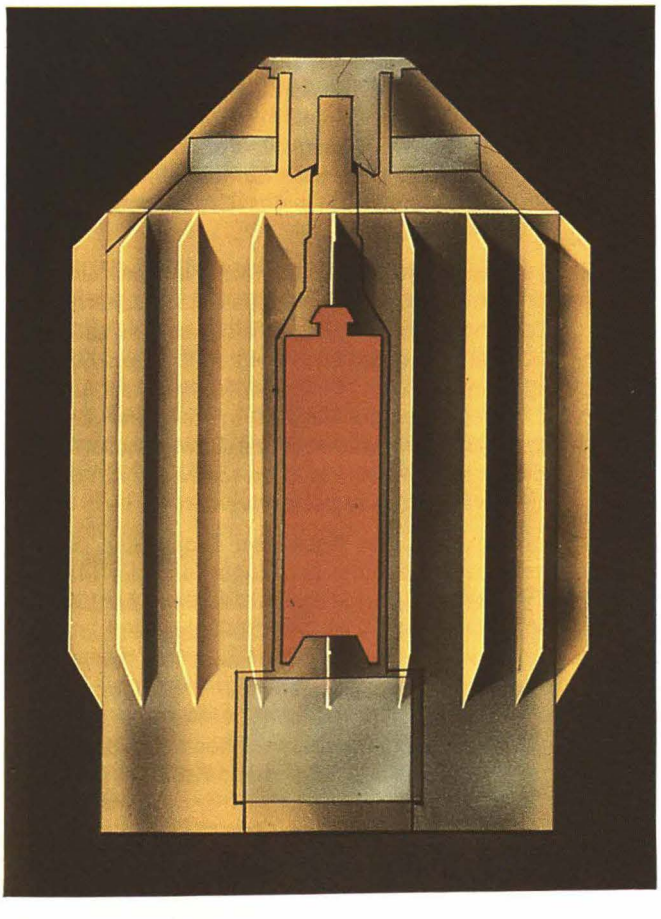


Abb. 10:
Transportbehälter für hochaktiven verglasten Abfall (Modell)



Abb. 11:
Temperatur-Versuchsfeld

Dieses Versuchsprogramm ist von besonderer Bedeutung, da sich aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen die zu wählende Lagergeometrie für die Einlagerung der Glasprodukte ergibt. Unter der Lagergeometrie sind die Anordnung der Bohrlöcher, deren Abstand voneinander sowie die Tiefe derselben zu verstehen (Abbildung 12). Auch ist es wichtig zu wissen, welche Bewegungen (Konvergenzen) im Bohrloch selbst sowie auch im Abbausystem auftreten. Die bisherigen Auswertungen von diesen drei gefahrenen Temperaturmeßfeldern im Jüngeren Steinsalz zeigen sowohl hinsichtlich der Gebirgsbewegungen wie auch der Wärmeabfuhr befriedigende Ergebnisse.

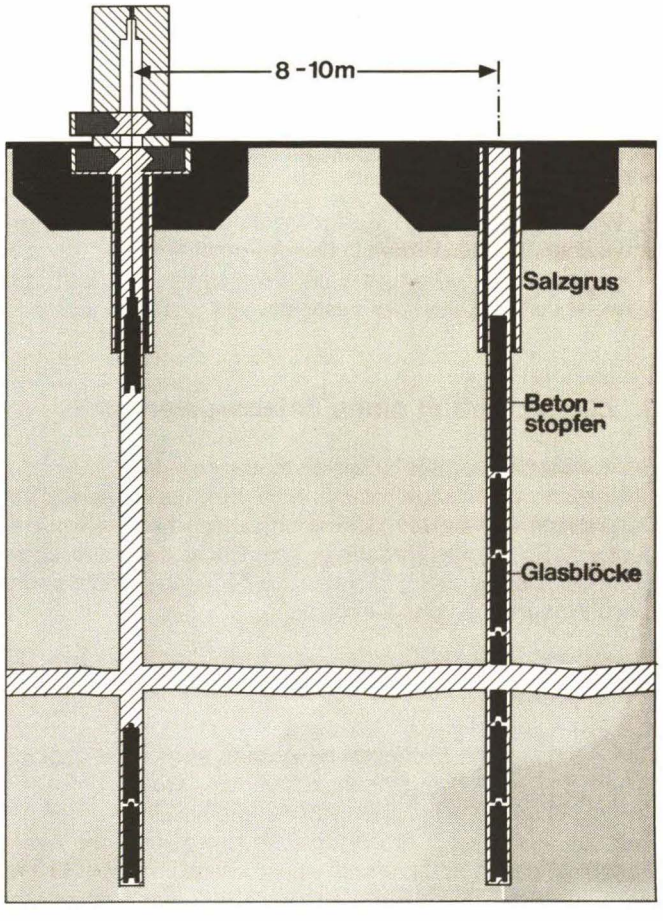


Abb. 12:
Geplante Einlagerung von hochaktivem Abfall

In den USA ist im Rahmen des „Project Salt Vault" nachgewiesen worden, daß mit der verfügbaren Technik Aktivitäten von Millionen Curie und mehr in einem untertägigen Lager gehandhabt werden können.

Es muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß noch weitere Versuche zwecks Optimierung der einzelnen Parameter erforderlich sind, ehe eine versuchsweise Einlagerung von rückholbaren Glasblöcken erfolgen kann. Dafür steht genügend Zeit zur Verfügung, denn bisher gibt es repräsentative Abfälle noch gar nicht in ausreichender Menge für die Durchführung eines solchen Einlagerungsversuches.

Die bergtechnischen Arbeiten für die rückholbare Einlagerung hochradioaktiver, wärmeentwickelnder Abfälle in Form von keramischen Gläsern befinden sich noch in der Planungsphase, da solche Gläser frühestens Mitte der achtziger Jahre zur Erprobung zur Verfügung stehen.

Die gelegentlich geäußerten Behauptungen, die sichere Endlagerung dieser Abfälle müsse über Hunderttausende von Jahren gewährleistet sein, ist allenfalls beschränkt richtig. In etwa 500 Jahren ist die Radioaktivität auf den zehntausendsten Teil abgeklungen; etwa von dieser Zeit an dominieren die langlebigen Aktiniden. Nach 1 000 Jahren ist die Radiotoxizität des Abfallagers im Salz vergleichbar mit der Radiotoxizität der ursprünglichen Uranerzmenge, aus der der Brennstoff hergestellt wurde, der schließlich zu diesem Abfall geführt hat.

2.5 Grenzen der Versuchsanlage Asse

Im Rahmen von Forschung und Entwicklung können in der Pilotanlage Asse nur begrenzte Mengen radioaktiver Abfälle eingelagert werden.

Die Gründe sind:

1. Der Salzstock der Asse ist mit rund 7 km Länge und 600 m Breite im Vergleich z.B. zu den Salzstöcken Gorleben oder Wahn mit rund 40 km² Grundfläche relativ klein.
2. Es handelt sich um ein stillgelegtes Salzbergwerk, das im Hinblick auf die Sicherheitsanforderungen, die man an ein großes, kommerzielles Endlager stellen muß, die Erwartungen nicht voll erfüllt.
3. Während der Zeit der Salzgewinnung wurde Carnallit gewonnen, und es wurden in dieser Formation Strecken aufgefahren. Carnallitgestein ist jedoch hygroskopisch und weist nur ein Drittel der Festigkeit von Steinsalz auf.

3. Zur Sicherheit eines Salzbergwerkes

Bei der Betrachtung der Gesamtsicherheit eines Endlagers im Salzgestein sind zunächst die Sicherheit des eigentlichen Bergwerkes und dessen Gefährdungsmöglichkeiten von Bedeutung. Solche Gefährdungen könnten in der Form eines Erdbebens, eines gebirgsmechanisch bedingten Störfalls oder eines Wassereinbruchs auftreten.

3.1 Erdbeben

Das Auftreten von Erdbeben hängt aufs engste mit geologischen Bewegungsvorgängen zusammen, wobei Erdbeben fast immer und hauptsächlich von den großen Bruchzonen der Erdrinde ausgehen. Der geologische Untergrund des Asse-Sattels ist dagegen tektonisch außerordentlich stabil. Er besteht aus Schichten des Erdaltertums, die durch ältere Gebirgsbildungen stark verfestigt und konsolidiert sind. Die Auffaltung der Asse-Struktur hat sich vor rund 110 Mio. Jahren ereignet. In der jüngsten geologischen Formation, dem Quartär, dessen Dauer von ca. 600 000 Jahren durch radioaktive Altersbestimmungen ziemlich genau bekannt ist, dürfte sich kein nennenswertes Erdbeben in der Norddeutschen Tiefebene, also auch nicht im Bereich der Asse sowie des Salzstockes Gorleben, ereignet haben.

Deshalb sind diese Gebiete auch in der „Karte der deutschen Erdbebengebiete" in DIN 4149 nicht als solche ausgewiesen. Die Erdbebengebiete in dieser Karte sind ermittelt worden, indem alle geschichtlich bekanntgewordenen Erdbeben im Hinblick auf ihre Auswirkungen ausgewertet worden sind. Dabei ist ebenfalls berücksichtigt worden, welche Erdbeben aufgrund der geologischen Strukturen theoretisch möglich sind, auch wenn sie bisher nicht beobachtet werden konnten.

Aus dem geologischen Bau dieser Salzstöcke, ihrer Umgebung und ihres Untergrundes kann mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit geschlossen werden, daß für eine Zeit von einigen Hunderttausend Jahren nicht mit einem Erdbeben zu rechnen ist, welches die Sicherheit eines Endlagers gefährden könnte.

3.2 Gebirgsmechanisch bedingter Störfall

Ein gebirgsmechanisch bedingter Störfall könnte dann auftreten, wenn ein tragendes Element im Bergwerk, eine sogenannte Bergfeste, dem auf ihm lastenden Gebirgsdruck nicht mehr standhielte. Dies könnte dann ein teilweises oder völliges Zusammenbrechen von Abbaukammern oder im Extremfall des gesamten Grubengebäudes zur Folge haben. Im Salzbergbau könnte ein solcher gebirgsmechanisch bedingter Störfall eventuell eine hydrologische Gefährdung der Grubenbaue durch Wasserzuflüsse aus wasserführenden Deckgebirgsschichten zur Folge haben, und dies könnte im ungünstigsten Fall zum Ersaufen des Bergwerks führen.

Das Salzbergwerk Asse besteht hauptsächlich aus den neben- und übereinander angeordneten Abbaukammern im Jüngeren Steinsalz Na 3. Zwischen diesen Kammern befinden sich in horizontaler Richtung die Pfeiler und in vertikaler Richtung die Schweben als Bergfesten. Festigkeit, Verformungsverhalten und Tragfähigkeit dieser tragenden Elemente bestimmen im wesentlichen die Standsicherheit des Grubengebäudes als Ganzem.

In einem umfangreichen gebirgsmechanischen Untersuchungsprogramm ist und wird daher diese Standsicherheit bestimmt und laufend überwacht. Dazu werden sowohl Labor- als auch in-situ-Untersuchungen durchgeführt. In einem Grubengebäude treten, wenn auch nur in sehr kleinen Absolutbeträgen, immer Bewegungen auf. An allen interessierenden Stellen des Grubengebäudes Asse sind deshalb Meßstellen eingerichtet, an denen mit unterschiedlichen Meßverfahren die dort auftretenden Bewegungen registriert werden.

Als Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse der gebirgsmechanischen Laboruntersuchungen und der Maßnahmen zur Überwachung der Grube sowie unter Berücksichtigung des Alters und Zustandes der Abbaukammern, der über das Salzbergwerk Asse vorliegenden Gutachen, der Auswertung von Erfahrungen aus anderen Kali- und Steinsalzbergwerken und der darüber vorliegenden Literatur kann die Wahrscheinlichkeit eines gebirgsmechanisch bedingten Störfalls für das Grubengebäude des Salzbergwerkes Asse wie folgt beurteilt werden.:

1. Eine unmittelbare Gefahr für das Grubengebäude durch einen gebirgsmechanisch bedingten Störfall besteht nicht.
2. In diesem Jahrhundert haben sich im deutschen Salzbergbau (einschließlich der DDR nach 1949) insgesamt neun gebirgsmechanisch bedingte Störfälle ereignet. Grundsätzlich war dabei das Auftreten von Gebirgsschlägen und Fir-

stenzusammenbrüchen mit dem Abbau von Kalisalzen in oder nahe den von den Katastrophen betroffenen Feldesteilen verbunden. Auf der Schachtanlage Asse II ruht jedoch seit 1964 jeglicher Abbau, der Abbau von Kalisalz sogar schon seit 1923. Mit einem Gebirgsschlag ist somit nicht zu rechnen.

3. Der Bruch eines Normalpfeilers kann mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden.
4. Das langzeitige Zusammendrücken einzelner Abbaukammern durch allseitige Konvergenz ist zwar nicht auszuschließen. Dieser Vorgang stellt aber wegen seiner örtlichen Begrenzung und der dabei auftretenden bruchlosen Verformung des Salzgesteins keine hydrologische Gefährdung dar. Das Zusammenbrechen eines größeren Feldesteiles, also mehrerer über- und nebeneinander liegender Abbaukammern, ist dagegen in hohem Maß unwahrscheinlich.

Da die Schächte Asse 2 und 4 keine Wasser- bzw. Laugenzuflüsse aufweisen und über einen sehr sicheren Stahlbeton-Verbundausbau verfügen, kann auch von dieser Seite her ein Wassereinbruch mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden.

3.3 Größter anzunehmender Unfall (GaU)

Trotzdem sollen hier rein theoretisch die Folgen betrachtet werden, die ein durch einen gebirgsmechanisch bedingten Störfall verursachter Wassereinbruch in das Grubengebäude haben würde.

Aus dem Betrieb von Aussolanlagen sowie aus Beispielen vollgelaufener Salzbergwerke ist bekannt, daß das zufließende Süßwasser so lange Salz auflöst, bis es daran gesättigt ist und danach jegliche weitere Lösefähigkeit verliert. Ähnlich wäre es auch bei einem Wassereinbruch in das Salzbergwerk Asse. Das Wasser würde zu den tiefsten Stellen des Grubengebäudes laufen und sich auf dem Weg dorthin aufkonzentrieren und an Salz sättigen. Unterstützt würde dieser Vorgang weiterhin durch den Dichteunterschied zwischen Süßwasser und Salzlösung, wobei die dichtere Salzlösung nach unten absinken würde.

Wichtig für die Betrachtung dieses theoretischen Falles ist die zufließende Wassermenge. Um diese abzuschätzen, kann man sämtliche einzelnen Wasserzuflüsse addieren, die bei den Abteufarbeiten im Schacht Asse II in den Jahren 1906 bis 1908 in allen Deckgebirgsschichten von der Tagesoberfläche bis zum Salzspiegel angetroffen und nacheinander abgedichtet wurden und die sich in ihren Schüttungsmengen gegenseitig beeinflußten. Man kommt so rein rechnerisch zu einem Gesamtzufluß von 4360 m^3 pro Tag, der mit Sicherheit zu hoch veranschlagt ist. Diese ehemaligen Zuflüsse sind jedoch durch den Schachtausbau vollkommen abgedichtet.

Berechnungen mit einem hypothetischen Zufluß vom 5000 m^3 pro Tag haben gezeigt, daß die Lösung in jedem Niveau des Grubengebäudes Sättigungskonzentration erreicht haben würde, lange bevor der von unten aufsteigende Flüssigkeitsspiegel zur nächsthöheren Sohle gelangt. Bei dem großen Volumen des Grubengebäudes würde es 3,3 Monate dauern, bis mit dem genannten Zufluß von 5000 m^3 pro Tag die 750-m-Sohle überflutet wäre. Das gesamte Grubengebäude wäre erst nach knapp 28 Monaten, also nach über zwei Jahren, vollgelaufen. In einer Normalkammer wäre der Sättigungsgrad jedoch bereits nach sechs Tagen auf einen Wert von über 90 % angestiegen, was der Salzlösung ihr Lösungsvermögen im wesentlichen nehmen würde. Die Beeinträchtigung der Standfestigkeit des Grubengebäudes durch diesen hypothetischen Wassereinbruch wäre somit minimal.

Selbst wenn ein Salzpfeiler zwischen zwei Kammern durch die Auflösungsvorgänge von beiden Seiten her so lange angegriffen werden würde, bis der Zufluß Sättigungskonzentration erreicht hätte, so würde die Pfeilertragfähigkeit nur um maximal 15 % herabgesetzt, was die Standsicherheit nur unwesentlich beeinflussen würde. Dieser Effekt würde durch den hydrostatischen Gegendruck der Salzlösung in der Kammer zu einem Teil sogar wieder ausgeglichen. Das Grubengebäude als Ganzes würde also selbst bei einem Wassereinbruch seine Standfestigkeit nicht verlieren.

Der Wassereinbruch ist für das Salzbergwerk Asse als Störfall maximal denkbaren Ausmaßes definiert worden. Wie in den obigen Ausführungen dargelegt wird, könnte eine großräumige Zirkulation der Salzlösung nicht auftreten. Durch das Verschließen der Lagerkammern wird der Kontakt der eingelagerten Abfälle mit der Salzlösung erschwert. Wenn es trotzdem zu einem solchen Kontakt käme, würden wegen der Verfestigung der Abfälle Radionuklide nur langsam ausgelaugt werden. Freigesetzte Radionuklide könnten sich nur durch eine langsame Diffusion in einer mit Steinsalz gesättigten Lösung bewegen. Dabei würden die Radionuklide durch diese Diffusionsvorgänge in einem Zeitraum von ca. 10000 Jahren eine Distanz von einigen hundert Metern zurücklegen. Eine Gefährdung des Grundwassers und damit des Biozyklus durch die eingelagerten Abfälle ist somit selbst beim Eintreten des größten anzunehmenden Störfalles ausgeschlossen.

3.4 Gorleben

Die geohydrologische Erkundung des Salzstockes Gorleben wird voraussichtlich bis Ende 1982 andauern. Sollten die geowissenschaftlichen Untersuchungen ergeben, daß er für die Erstellung eines kommerziellen Endlagers geeignet ist, so können bereits bei der Planung alle erforderlichen Sicherheiten, wie z.B. Mächtigkeit der Sicherheitspfeiler zum Deckgebirge, zu den Flanken des Salzstockes innerhalb des neu zu erstellenden Grubengebäudes selbst sowie auch zu einem möglicherweise vorhandenen Carnallitlager so stark gestaltet werden, daß das Ersaufen einer solchen Anlage auch langfristig gesehen als noch viel unwahrscheinlicher angesehen werden kann als dasjenige der Versuchsanlage Asse. Der Ausarbeitung und Einhaltung eines den Anforderungen entsprechenden Sicherheitskonzeptes sind bei der Größe des Salzstockes wesentlich größere Möglichkeiten gegeben.

3.5 Stillegungskonzept

An einem Stillegungskonzept, das allen Sicherheitsanforderungen gerecht wird, wird zu Zeit noch gearbeitet. Aufgrund der bisher gewonnenen Erkenntnisse ist folgendes vorgesehen:

- Verfüllung der Lagerbohrungen, Lagerkammern und Zufahrtsstrecken mit einem geeigneten Verfüllmaterial, wie z.B. Salz, Beton, Salzbeton oder Bitumen;
- Verfüllung der Schächte mit geeigneten Festmaterialien, wie Sande, Kiese oder Basaltgestein;
- Verschluß der Schächte im unteren und oberen Bereich mit starken Stahlbetonfundamenten.

Ob und in welchem Umfang dann noch eine Überwachung des stillgelegten Endlagers aus Sicherheitsgründen erforderlich ist, wird zur Zeit noch geprüft.

4. Zusammenfassung

Man darf von der Überzeugung ausgehen, daß bis zur Erstellung des Bundesendlagers für radioaktive Abfälle auch für die Einlagerung hochradioaktiver Abfälle zuverlässige und akzeptable Lösungen verfügbar sind. Für die Einlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle stehen heute schon sichere und zuverlässige Technologien zur Verfügung. Wie bei jeder jungen Technologie – so auch bei der Kerntechnik und insbesondere am letzten Glied des Kernbrennstoffkreislaufs – wird die Entwicklung mit Nachdruck weiter vorangetrieben, um die Lösungen noch zu verbessern und zu optimieren, insbesondere im Hinblick auf die Sicherheit.

Literatur

Albrecht, E.: Disposal of radioactive wastes by storage in a salt mine in the Federal Republic of Germany. IAEA/NEA-Symposium on "Management of low- and intermediate-level radioacitve wastes"; Aix-en-Provence 1970 – IAEA-STI Pub. 264, p. 753

Krause, H., Randl, R.: Treatment and final disposal of radioactive wastes from fuel reprocessing in the Federal Republic of Germany – a survey on policy and R&D work. IAEA/NEA-Symposium on "Management of radioactive wastes from fuel reprocessing"; Paris 1972 – NEA 1973, p. 199

Kühn, K.: Asse salt mine, Federal Republic of Germany – operating facility for underground disposal of radioactive wastes. 2nd International Symposium on "Underground waste management and artificial recharge"; New Orleans 1973 – reprint Vol. 2, p. 741

Breest, H.Ch.: Radiological safety aspects of nuclear waste management. IAEA-regional seminar on "Radiological safety aspects of nuclear industry"; Rome 1975 – published by IAEA

Hamstra, J.: Radiotoxic hazard measure for buried solid radioactive waste. Nuclear Safety, 16 (1975), S. 180-189

Haug, H.D.: Anfall, Beseitigung und relative Toxizität langlebiger Spaltprodukte und Aktiniden in den radioaktiven Abfälle der Kernbrennstoffzyklen. GfK Karlsruhe 1975, KFK 2022

Albrecht, E.: Erfahrungen und Probleme beim Abteufen eines Bohrschachtes auf die Salzlagerstätte der Schachtanlage Asse. Kali und Steinsalz, Heft 1/76. Verlag Glückauf, Essen

Kühn, K., Hamstra, J.: Geologic Isolation of Radioactive Wastes in the Federal Republic of Germany and the Respective Program of the Netherlands. Management of Waste from the LWR Fuel Cycle – Denver, Colorado – July 1976

Bradshaw, R.L.: Mc Clain, W.C.: Projekt Salt Vault: "A Demonstration of the Disposal of High-Activity Solidified Wastes in Underground Salt Mines". ORNL-4555

Kühn, K.: Zur Endlagerung radioaktiver Abfälle. Stand, Ziele und Alternativen. Atomwirtschaft, Jahrgang XXI, Nr. 7, 1976

Albrecht, E., Breest, H.Ch.: The Developement of Radioactive Wastes, Disposal-Techniques and the Radiation-Exposure of the Personnel at Asse Pilot Plant. Waste Management 1976; Tucson, Arizona 1976

Albrecht, E., The Disposal of Low Radioactive Wastes in Salt Formations of the Federal Republic of Germany. Waste Management 1980; Tucson, Arizona 1980

Die Beeinflussung von Wetter und Klima durch Wärmekraftwerke

W. Schneider

Deutscher Wetterdienst, Wetteramt München

1. Einleitung

Die Kernenergie ist, auf den ersten Blick hin betrachtet, im meteorologischen Sinne umweltfreundlich. Kraftwerke konventioneller Arbeitsweise produzieren, soweit sie fossile Brennstoffe – also Kohle oder Öl – verbrennen, große Mengen schwefel- und kohlendioxidhaltiger Abluft, und auch aufwendige Filtereinbauten sind nicht in der Lage, die Luftverunreinigung gänzlich zu unterbinden.

Dennoch hat im Zusammenhang mit der Erzeugung von Kernenergie der meteorologische Umweltaspekt ein unerwartet hohes Maß an Publizität erlangt. Dafür gibt es zwei Gründe:

a) Kernkraftwerke emittieren radioaktive Abluft, die in die Atmosphäre gelangt, sich mit ihr vermischt und mit dem Wind transportiert wird.

b) Die bei der Energieerzeugung stets anfallende Überschußenergie wurde früher vorwiegend in die Gewässer geleitet. Nun hat die Größenordnung moderner Kraftwerke – ob fossil oder nuklear – eine Dimension erreicht, welche den herkömmlichen Rahmen bei weitem sprengt und deren Abwärme zu einer oft nicht mehr tolerierbaren Wärmebelastung der Gewässer führen würde. Man entschied sich daher für den Bau von Kühltürmen, die den Zweck haben, diese Energie in die Atmosphäre zu leiten.

Damit stellte sich aber die Frage, ob und in welchem Umfang Wetter und Klima in der Umgebung solch großer Rückkühlanlagen beeinflußt werden.

2. Kühltürme

Bei den Kühltürmen gibt es im wesentlichen zwei technische Verfahren, die sogenannte Trockenkühlung und die Naßkühlung. Bevorzugt wird derzeit die letztere, weil Verdunstungskühlung eine sehr wirksame Wärmeabgabe garantiert. Dabei macht man sich den hohen latenten Wärmeinhalt des Wasserdampfes zunutze. Als latente Wärme wird jene Energie bezeichnet, welche für die Phasenumwandlung vom flüssigen in den gasförmigen Zustand des Wassers benötigt wird und bei umgekehrtem Vorgang wieder frei wird, nämlich die Kondensationswärme. Zur Verdampfung benötigt man rund 2500 Joule (das entspricht ca. 600 cal.) pro Gramm Wasser, das ist – um einen Größenvergleich zu nennen – etwa das 600fache jener Energie, die man zur Erwärmung derselben Wassermenge um 1 K (ein Grad) aufwenden muß. Die Effektivität der Verdunstungskühlung ist der Grund für die breite Anwendung dieser Methode in der Technik.

Bei den Wärmekraftwerken sind mehr als die Hälfte der eingesetzten Energie als Abwärme wegzuführen. Wenn dies überwiegend mittels Verdunstungskühlung geschehen soll, baut man die sogenannten Naßkühltürme. Diese arbeiten nach folgendem Schema (Abbildung 1):

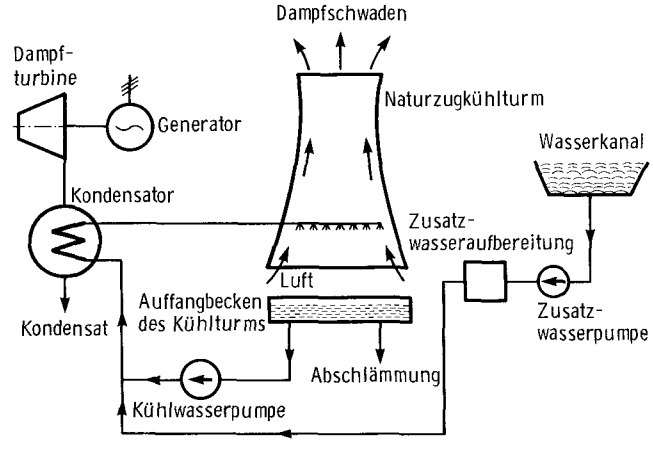


Abb. 1:
Kühlwasserkreislauf für ein Kraftwerk mit Kühlturm (Prinzipschaltbild)

Das Kühlwasser aus dem Kraftwerk wird im Kühlturm über eine Rieselanlage geleitet, wobei die im Gegenstrom durchstreichende Luft durch Verdunstung Wärme und Feuchtigkeit aufnimmt. Dem Kühlwasser wird dadurch sehr viel Wärme entzogen, es wird unten in einem Becken aufgefangen und dem Kühlkreislauf wieder zugeführt. Die feuchte Warmluft ist spezifisch leichter als die Umgebungsluft, sie steigt aus dem Kühlturm und bildet je nach den meteorologischen Bedingungen der Außenluft kürzere oder längere Dampfschwaden. Durch das Entweichen der feuchten Warmluft wird unten Außenluft angesaugt. Der Verdunstungsverlust wird durch Frischwasser ausgeglichen.

Es gibt zwei Arten von Naßkühltürmen, den Ventilator-Kühlturm, der mit drückenden oder saugenden Ventilatoren den Luftdurchsatz durch den Kühlturm verstärkt sowie den Naturzug-Naßkühlturm, der allein aufgrund des thermodynamischen Auftriebs der feucht-warmen Luft arbeitet. Die Bauhöhen betragen bei ventilierten Naßkühltürmen meist weniger als 100 m, bei Naturzugtürmen rund 150 m. Die geringste Höhe weisen die sogenannten Zellenkühler auf, die meist nur 20 m erreichen. Dabei handelt es sich um kleine ventilierte Kühltürme, die vielfach in Gruppen aufgestellt werden, so daß während des Betriebs je nach Bedarf Einzelzellen zu- oder abgeschaltet werden können.

Die Arbeitsweise der Trockenkühlung läßt sich mit dem Kühlsystem eines wassergekühlten Automotors vergleichen, denn hier handelt es sich um einen geschlossenen Kühlkreislauf, aus dem kein Wasser austritt und die Abkühlung lediglich aufgrund der Abgabe fühlbarer Wärme an die vorbeistreichende Außenluft erreicht wird. Auch bei diesem Kühlturm steigt die leichte Warmluft auf und saugt unten Außenluft an. Es ist verständlich, daß eine solche Kühlung ein sehr weit verzweigtes

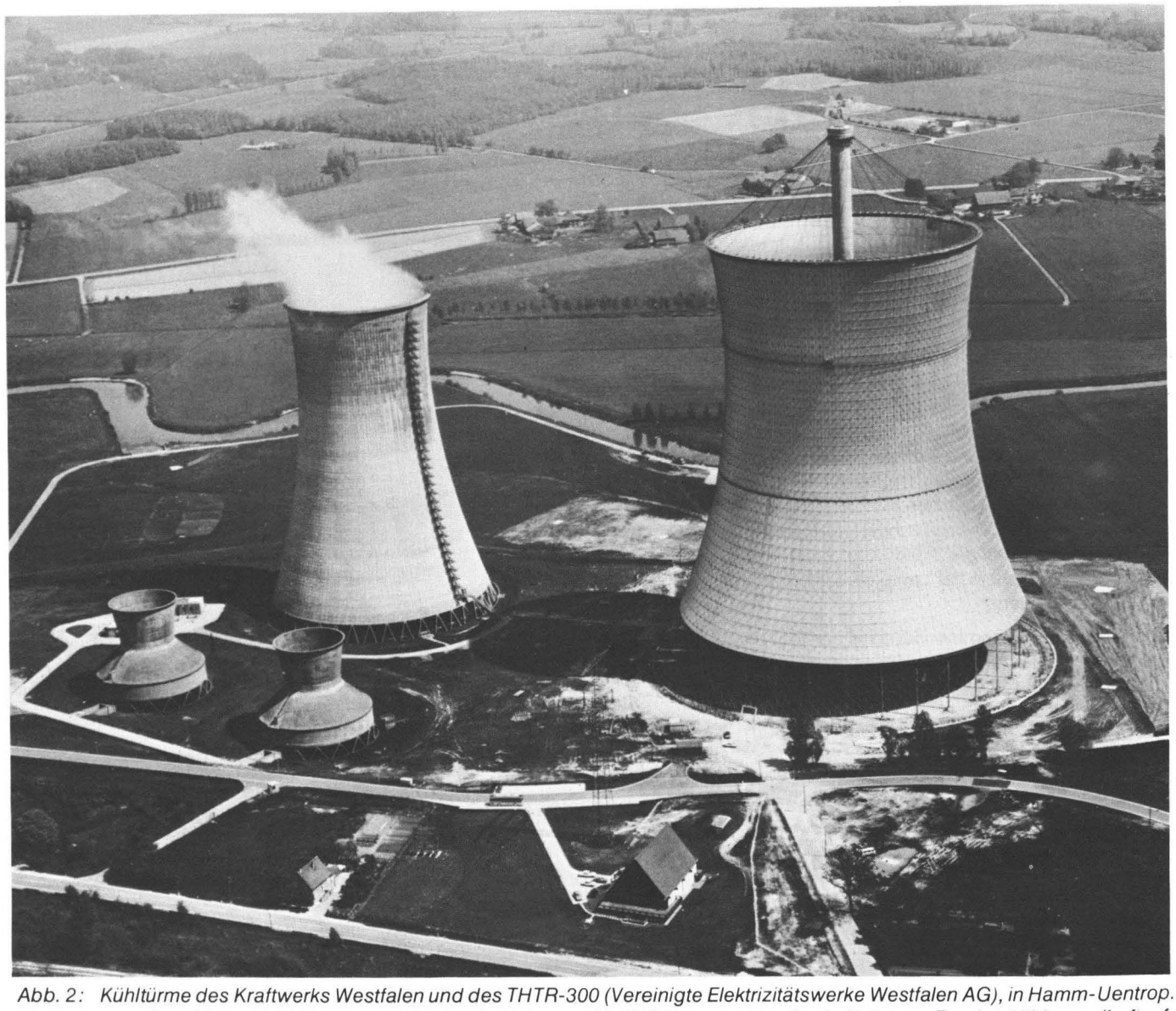


Abb. 2: Kühltürme des Kraftwerks Westfalen und des THTR-300 (Vereinigte Elektrizitätswerke Westfalen AG), in Hamm-Uentrop. Links vorn zwei Ventilator-Naßkühltürme, dahinter ein Naturzug-Naßkühlturm, rechts ein ein Naturzug-Trockenkühlturm. (Luftaufnahme Aero-Lux, Frankfurt/M., Frei Reg. Präs. Darmstadt Nr. 326/77)

Röhrensystem haben muß, damit sich das Kühlwasser ausreichend abkühlen kann.

Abbildung 2 zeigt zwei Ventilatorkühltürme, einen Trocken- und einen Naturzug-Naßkühlturm. Mit den technischen Auslegungsdaten dieser Kühltürme in Tabelle 1 erhält man einen Vergleich zwischen Kühlleistung und Aufwand. Die beiden Naturzug-Kühltürme haben etwa die gleiche Kühlleistung. Dafür benötigt die Trockenkühlung den dreifachen Luftdurchsatz des Naßkühlturmes, und das Volumen des umbauten Raumes ist beträchtlich größer: beim Trockenkühlturm ist es mehr als dreimal so groß wie beim Naßkühlturm.

Als Bauwerk unauffälliger sind natürlich die niedrigen Ventilatorkühltürme, hier aber ist Energie für die Erzielung eines ausreichenden Luftdurchsatzes aufzuwenden.

Der Trockenkühlturm hat den Vorteil des unsichtbaren weil trockenen Schwadens, sein Nachteil ist sowohl ästhetischer (wegen seiner Größe) wie auch technischer Natur: Er ist aufgrund seiner Arbeitsweise in seiner Effektivität außerordentlich stark von der Temperatur der Außenluft abhängig und hat daher eine stark schwankende Leistung. Dies ist beim Naßkühlturm weit weniger der Fall, weil hier überwiegend die Verdunstungskühlung wirkt.

Aus diesem Grunde werden zur Zeit vorwiegend Naßkühltürme projektiert und gebaut. Naturzug-Naßkühlkürme derzeit weitgehend üblicher Auslegung geben etwa 2000 bis 3000 m^3 Wasser pro Stunde ab, das gas- bzw. dampfförmig aus dem Kühlturm entweicht. Dies ist die erforderliche Kühlleistung für ein Kraftwerk, das ca. 1300 MW elektrischer Energie erzeugt[1].

Angesichts der gewaltigen, fast punktförmigen Wärmeemission stellt sich die Frage, welche Auswirkungen dieser zusätzliche Energiestrom auf die Balance der natürlichen Energieumsätze am Standort eines großen Kraftwerkes und in seiner Umgebung hat, mit anderen Worten: Ist in der Nachbarschaft dieser großen Kühltürme eine anthropogene Beeinflussung von Wetter und Klima zu befürchten?

3. Wetter und Klima, Stadtklima

Die Begriffe „Wetter" und „Klima" sind zwar jedem geläufig, sie bedürfen aber dennoch einer näheren Definition. „Wetter" ist der momentane meteorologische Zustand, beschrieben durch die Zustandgrößen wie Wind, Bewölkung, Temperatur, Feuchte und mehr. Als „momentan" hat man dabei etwa den Zeitraum zu betrachten, welcher für eine vollständige Wetterbeobachtung notwendig ist; das sind rund 10 Minuten. Klima ist nun die Gesamtheit der Wettererscheinungen und deren Variation über einen langen Zeitraum, lang deshalb, damit die

Gesamtheit nicht durch die natürlichen Schwankungen der meteorologischen Elemente einseitig aufgefüllt wird (zum Beispiel durch eine Folge sehr kühler Sommer). Andererseits sollte aber auch der Zeitraum nicht so lang gewährt werden, daß kurzzeitigere Klimaschwankungen in der Gesamtheit untergehen. Man hat deshalb den Zeitraum einer Generation, also 30 Jahre, als klimatologischen Zeitraum definiert. Der erste Zeitraum dieser Art galt für die Periode 1901 bis 1930.

Die quantitative Beschreibung des Klimas erfolgt mit Mittelwerten (z.B. Jahresmittel der Temperatur, mittleres Temperaturmaximum im Juli, mittlere Niederschlagsmenge pro Jahr) sowie in Häufigkeitswerten (z.B. Anzahl der Tage mit einem Temperaturmaximum über 25°C, Anzahl der Tage mit Niederschlag).

Durch Vergleich der Daten aus zwei klimatologischen Bezugszeiträumen ist eine Klimaänderung darstellbar. Daß großräumige Klimaschwankungen in diesem wie vorigen Jahrhundert stattgefunden haben, ist unbestritten und beispielsweise am Verhalten europäischer wie überseeischer Gebirgsgletscher deutlich sichtbar.

wird in den Stein- und Asphaltflächen der Städte als Wärme gespeichert.

- Die Anreicherung der Stadtluft mit staub- und gasförmigen Emissionen verändert die Strahlungsdurchlässigkeit der Atmosphäre. Dabei wird der sogenannte Treibhauseffekt verstärkt, d.h., die langwellige Ausstrahlung in den Weltraum wird stärker behindert als die kurzwellige solare Einstrahlung.

- Bei Fahrzeugen, Klimatisierung und Industrie fällt in erheblichem Umfang Wärme als Abfallprodukt an, die überwiegend an die Atmosphäre abgegeben wird.

Alle drei klimamodifizierenden Faktoren wirken temperaturerhöhend.

Es wird geschätzt, daß die Abwärme moderner Großkraftwerke in der Größenordnung der Wärmeproduktion einer mittleren Großstadt liegt. Demnach wäre es naheliegend, bei großen Wärmekraftwerken dem Stadtklima äquivalente meteorologische Effekte zu vermuten.

Tab. 1: Technische Daten der in Abbildung 2 dargestellten Kühltürme

Typ		Blöcke A+B Steinkohle Ventilator naß	Block C Steinkohle Naturzug naß	Block D Kernenergie THTR Naturzug trocken
Basisdurchmesser	m	38,5	92	140
Mündungsdurchmesser	m	22,2	53	92
Höhe	m	34	122,2	145 (Mantel)
	m			180 (Pylon)
Blockleistung	MW_e	2 x 176	320	308
Kühlleistung	MW_{th}	2 x 100	432,5	438,6
Luftdurchsatz	m^3/s	2 x 2650	6800	20000
Kaltwassertemperatur	°C	21	26	26,5
Warmwassertemperatur	°C	29,3	34,6	38,4

Trotz des spektakulären Rückgangs der Gletscher in den letzten 100 Jahren ist aber der quantitative Nachweis von Änderungen in unserem Klima problematisch. Dies beruht darauf, daß regionale und lokale Bedingungen in unterschiedlichem Maße den Blick für die großräumigen Änderungen verstellen. Davon ist vor allem die große Anzahl von Beobachtungsstationen betroffen, welche noch vor Jahrzehnten weit außerhalb der Städte lagen und durch Industrialisierung und Bevölkerungswachstum allmählich in die sich ausdehnenden Siedlungs- und Ballungsgebiete hineingewachsen sind. Das Klima hat sich an diesen Stationen offenbar aufgrund anthropogener Einflüsse, das heißt durch die Einwirkung des Menschen, auf den natürlichen Wärmeumsatz geändert.

Die Umgestaltung der Naturlandschaft in eine Kulturlandschaft ist global gesehen der bedeutendste Eingriff in den natürlichen Energiehaushalt des Systems Erde-Atmosphäre. Dies betrifft vor allem die extensive Rodung der Urwälder. In Mitteleuropa wird hingegen das Klima in zunehmendem Umfang von den sogenannten Stadtklimaten geprägt; in dicht besiedelten Industriegebieten gehen die Stadtklimate ineinander über, der Einflußbereich der Städte auf das Umgebungsklima ist kaum begrenzbar und somit sind auch natürliche und anthropogene Klimaänderungen schwer zu trennen. Der Mechanismus des urbanen Einflusses vor allem auf die Temperaturverhältnisse beruht im wesentlichen auf drei Faktoren:

- Der natürliche Strahlungs- und Wärmeumsatz wird dadurch gestört, daß nicht wie im grünen Umland ein großer Teil der solaren Strahlungsenergie zur Blattverdunstung (Evapotranspiration) aufgebraucht wird. Diese Strahlungsenergie

Der wesentliche Unterschied zwischen beiden besteht jedoch darin, daß die Städte und Ballungsgebiete aus einer flächenhaften Emissionsquelle vornehmlich fühlbare Wärme abgeben, während die Naßkühltürme aus einer vergleichsweise punktförmigen Emissionsquelle warme, wasserdampfreiche Luft in die Atmosphäre einspeisen; hier wird also die Energie überwiegend als latente Wärme abgeben.

Für einen ersten Überblick ist eine grobe Überschlagsrechnung nützlich:

Ein Wärmekraftwerk mit 2 Blöcken zu je 1300 MW_e und Naturzug-Naßkühlsystem hat einen Gesamt-Wasserverlust von rund 5000 m^3 pro Stunde. Es seien nun folgende meteorologischen Bedingungen vorausgesetzt:

- Lufttemperatur + 10°C,
- Windgeschwindigkeit 3 m/s,
- Relative Feuchte 75 %.

Diese meteorologischen Zustände entsprechen etwa mittleren Jahreswerten für Mitteleuropa. Es sei weiter vorausgesetzt, daß

- die Schwaden der Kühltürme nicht höher als 500 m über Grund steigen und
- der Öffnungswinkel der Ausbreitung 20° beträgt.

Mit diesen Angaben kann man nun berechnen, welche Wasserdampfmengen natürlicher und anthropogener Herkunft sich in dem von den Kühltürmen bespeisten 20°-Zylinderausschnitt befinden und sie in ein Verhältnis zueinander setzen. Das Ver-

hältnis der in der Luft natürlich vorhandener Wassermenge zu jener, welche von den Kühltürmen eingespeist wird, beträgt in den Zylinderausschnitten mit verschiedenem Abstand r bei

r = 2 km: 3:1
r = 6 km: 8:1
r = 9 km: 12:1
r = 18 km: 24:1

Die Wasserdampfeinspeisung wird also offenbar in größerer Entfernung vom Kühlturm verhältnismäßig rasch bedeutungslos. Nicht zu vernachlässigen ist aber die Wasserdampfzunahme in den ersten Kilometern.

Zur Ermittlung der meteorologischen Auswirkungen dieser Energieemission ist zunächst eine fundamentale Aufgabe zu lösen, und zwar benötigt man ein numerisches Modell zur Simulation der thermodynamischen Prozesse von Schwaden und Umgebungsluft. Es gibt bereits eine Reihe solcher Rechenmodelle, welche mit unterschiedlichen Vereinfachungen und dementsprechend unterschiedlichem Rechenaufwand in der Lage sind, diese Vorgänge darzustellen.

4. Die atmosphärischen Ausbreitungsverhältnisse

Als Eingabedaten für die numerische Simulation benötigt man repräsentative Daten der meteorologischen Zustände jener Atmosphärenschichten, in welchen die Ausbreitung stattfindet.

Damit stößt man auf das zweite fundamentale Problem. Die Atmosphäre ist ständig in Bewegung; Windrichtung und -geschwindigkeit, Turbulenz, vertikaler Temperaturverlauf und Luftfeuchte ändern sich nicht nur periodisch mit Jahres- und Tageszeit, sondern auch aperiodisch mit der Wetterlage. Diese unendliche Vielfalt ist nur durch eine Klassifikation in den Griff zu bekommen. Man spricht in diesem Zusammenhang dann von den „Ausbreitungsverhältnissen" oder von den „Austauschverhältnissen" eines Ortes.

Für eine Klassifikation gibt es im wesentlichen zwei Lösungsansätze:

Ein Ansatz ist das System der Ausbreitungsklassen. Hier geht man davon aus, daß je nach Bedeckung, Jahres- und Tageszeit die Absorption oder Emission solarer Strahlungsenergie am Erdboden die Temperaturschichtung der unteren Atmosphäre bedingt. Diese Schichtung ist deshalb von Interesse, weil bei starker Temperaturabnahme mit der Höhe die Luft vertikal besser durchmischt wird als bei geringer Temperaturabnahme oder gar -zunahme (Inversion). Der Wind sorgt für den horizontalen Transport und fördert infolge Reibung an der Erdoberfläche die Turbulenz in den unteren Hektometern[1]). Auf dieser Basis werden mit Hilfe von Bewölkungs- und Windbeobachtungen sowie unter Berücksichtigung von Sonnenauf- und -untergangszeiten Klassen des atmosphärischen Austauschzustandes abgeleitet, die von „sehr stabil, schlechter Luftaustausch" zu „sehr labil, guter Luftaustausch" reichen. Bei einer stabilen Schichtung befinden sich die verschiedenen Luftschichten im Gleichgewicht; bei labiler Schichtung ist das nicht der Fall, so daß eine starke Neigung zur Durchmischung besteht. Nach Definition dieser Klassen kann man die Ausbreitung der einzelnen Austauschzustände studieren und über die meteorologische Häufigkeit der Klassen mittlere Ausbreitungen ableiten.

Vergleiche zwischen verschiedenen Orten sind selbstverständlich nur dann möglich, wenn nach derselben Vorschrift klassifiziert wurde. In der Bundesrepublik ist überwiegend das Schema nach Klug/Manier in Gebrauch[2]. Betrachtet man zum Beispiel die stabilen Klassen I und II bei Klug/Manier, also die Häufigkeiten des „schlechten Luftaustausches", so sieht man wesentliche, geographisch bedingte Unterschiede zwischen verschiedenen Orten. So ist die Häufigkeit unzureichenden Luftaustausches in Südbayern vielfach mehr als doppelt so groß wie in Norddeutschland.

Ein anderer Weg zur Beschreibung der Ausbreitungsverhältnisse führt über die Vertikalsondierungen, die gemessenen Vertikalprofile von Wind, Temperatur und Luftfeuchte. Diese Möglichkeit bietet sich auch deswegen an, weil die meteorologischen Dienste seit vielen Jahren sogenannte Radiosondenstationen für diese Messungen betreiben. Da die Anzahl dieser Stationen aber recht gering ist, liegen die zu beurteilenden Orte zuweilen recht weit entfernt von den Aufstiegplätzen, und es ist die Übertragbarkeit der Ausbreitungsverhältnisse der Radiosondenstation auf den betreffenden Ort im einzelnen zu prüfen. Dies geschieht durch eine Serie termingleicher Sondierungen am Ort und an der Radiosondenstation.

Zur Sortierung der außerordentlichen Datenfülle von Aufstiegen mehrerer Jahre werden Klassen von Temperatur, Temperaturverhalten mit der Höhe, relativer Feuchte und Windgeschwindigkeit definiert. Dies kann beispielsweise bei der Temperatur durch Aufteilung der Temperaturskala auf verschiedene Temperaturbereiche, bei der Feuchte auf Feuchtebereiche usw. geschehen; je nach gewählter Klassenbreite resultiert eine große oder kleinere Anzahl von Klassen. Nun gibt es eine ganze Reihe von Klassen, die aus einem 5- oder 10jährigen Kollektiv von Vertikalsondierungen nur einige wenige Aufstiege enthalten und andere, die außerordentlich stark besetzt sind. Dieses Spektrum der Klassenbesetzung ist nun ebenfalls eine Darstellung der Ausbreitungsverhältnisse. Dabei ist diese Darstellung gewiß realistischer und differenzierter als jene der oben geschilderten Ausbreitungsklassen, auf der anderen Seite lassen sich so differenziert erfaßte Austauschverhältnisse nur schwierig statistisch und physikalisch weiterverwenden. Daher wird etwa die radiologische Umgebungsbelastung üblicherweise nach dem Schema der zuerst beschriebenen Ausbreitungsklassen ermittelt[3].

5. Die Ausbreitungsrechnungen und ihre Ausagen

Die feucht-warme Luft vermischt sich nach Kühlturmaustritt mit der Umgebungsluft. Für die thermodynamischen Prozesse mit Kondensation und Verdunstung ist die Kenntnis der konkreten meteorologischen Bedingungen der Außenluft eine wichtige Voraussetzung für die gute numerische Simulation. Aus diesem Grunde werden zur Ermittlung des durchschnittlichen Verhaltens von Kühlturmschwaden die Ausbreitungsverhältnisse nach klassifizierten Radiosondenaufstiegen bevorzugt. Zu diesem Zweck wurden für die verschiedenen Klassen repräsentative Sondierungen nach statistischen Verfahren ausgewählt und mit diesen schließlich die Ausbreitungsrechnungen durchgeführt.

Die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnungen bestehen in der Darstellung der räumlichen Verteilung der Wasserdampfzunahme und der Temperaturerhöhung in bezug auf die Umgebungsluft. Daraus kann wiederum z.B. die Erhöhung der relativen Feuchte und der Temperatur in der bodennahen Luftschicht abgeleitet werden.

Mit der Wasserdampfzunahme ist jener Bereich gegeben, in welchem die relative Luftfeuchte 100 % erreicht. Man spricht dann vom berechneten „sichtbaren Schwaden".

[1]) 1 Hektometer = 100 m

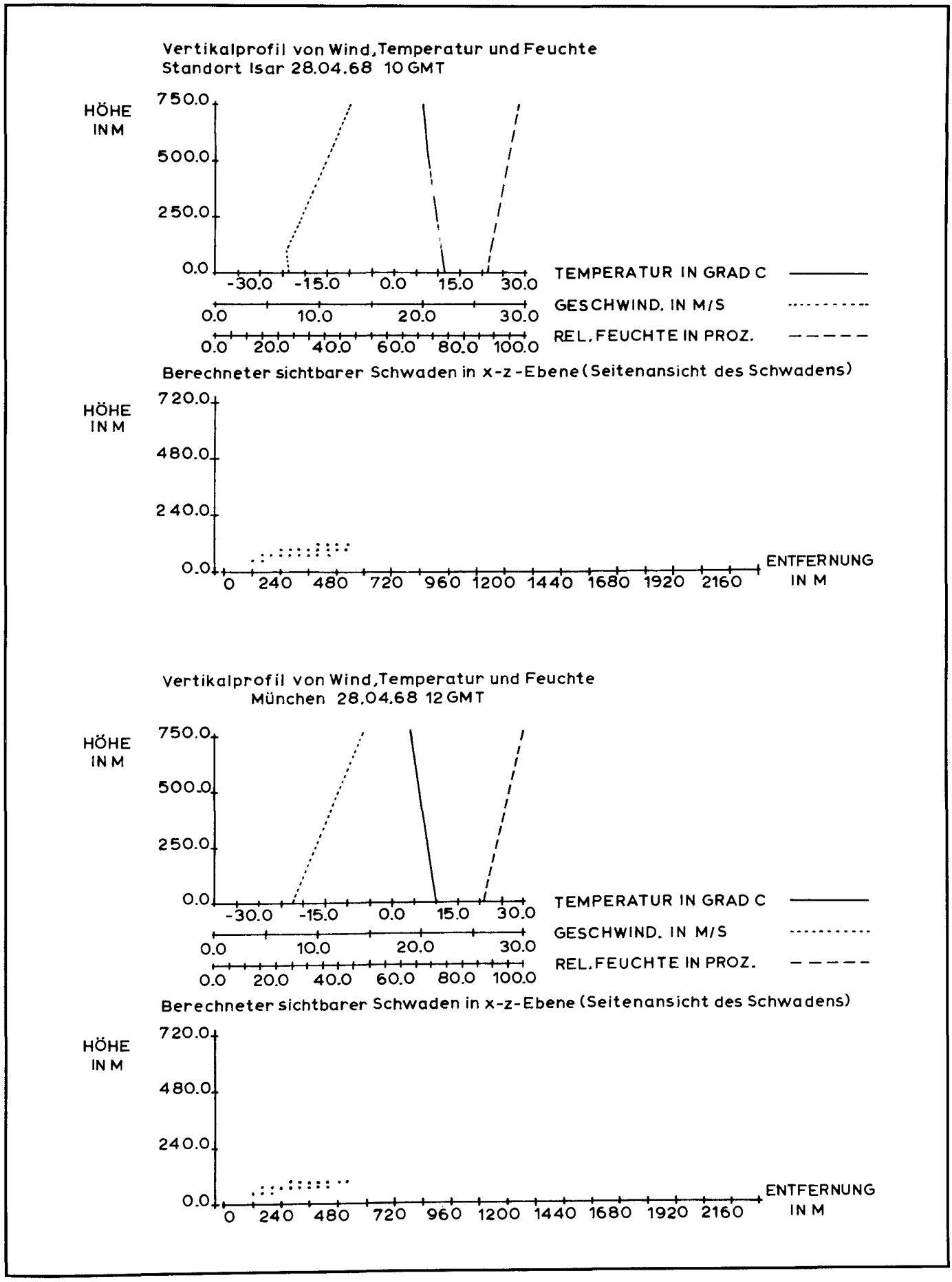


Abb. 3: Durch Sondierungen ermittelte Vertikalprofile meteorologischer Zustandsgrößen und damit berechnete Schwadenausbreitungen bei kleinen Schwaden

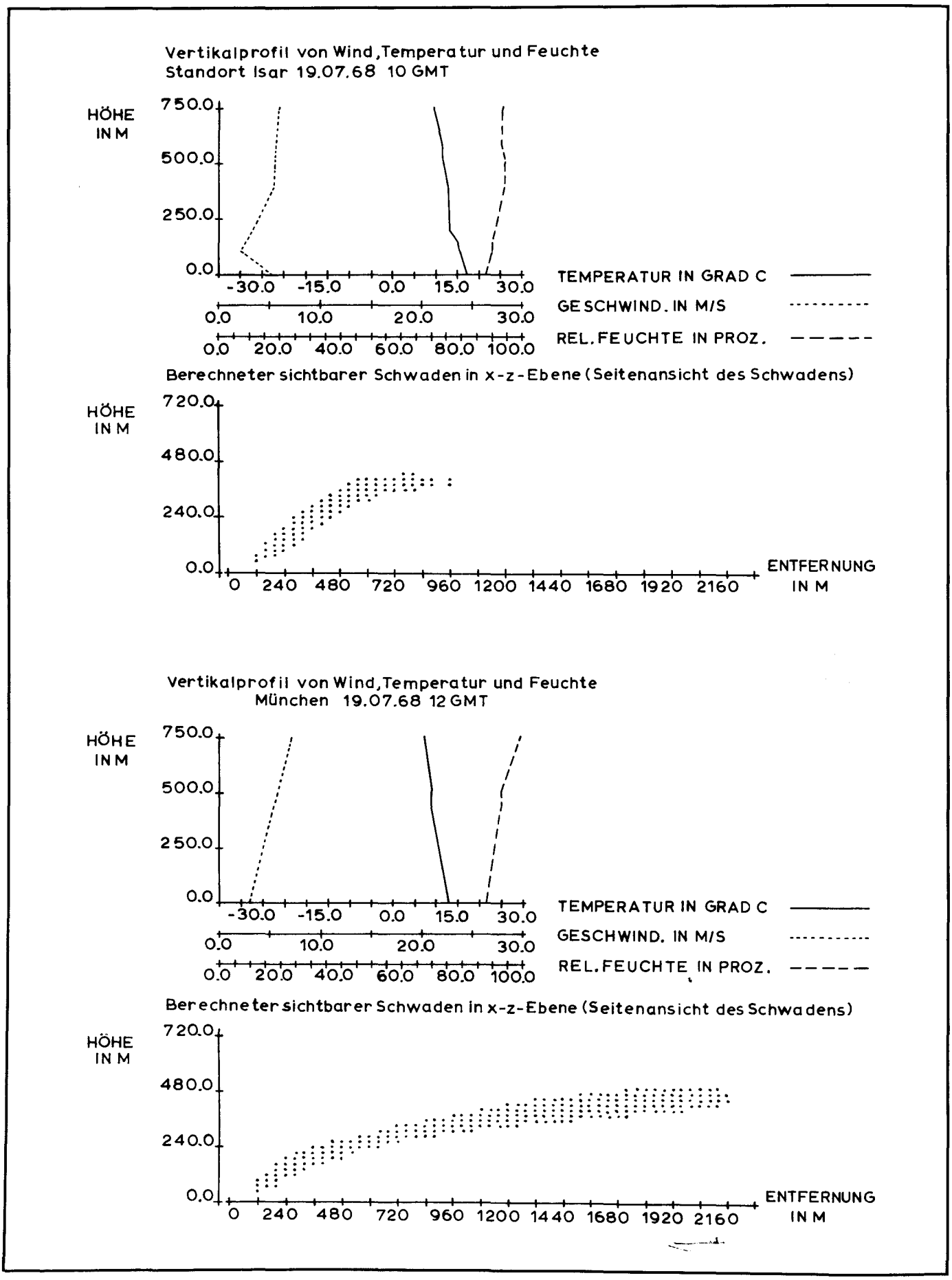


Abb. 4: Durch Sondierungen ermittelte Vertikalprofile meteorologischer Zustandsgrößen und damit berechnete Schwadenausbreitungen bei großen Schwaden

Die Geometrie – also Länge und Aufstiegshöhe dieses sichtbaren Schwadens – ist abhängig vom Wetterzustand; bei sehr trockener Luft gibt es ebenso wie bei gut durchmischter und labil geschichteter Atmosphäre kurze Schwaden. Hingegen wird bei feuchter, stabil geschichteter Luft die sichtbare Fahne lang werden. Im Hinblick auf die atmosphärischen Ausbreitungsbedingungen heißt dies, daß bei sehr günstigen Austauschverhältnissen oft nur wenige Dekameter[2]) lange Schwaden beobachtet werden, bei weniger guten Austauschverhältnissen können diese aber kilometerlang werden. In Abbildung 2 herrscht offenbar trockenes und warmes Wetter, die Austauschverhältnisse sind günstig, demzufolge trocknet der Schwaden nach Kühlturmaustritt sehr rasch ab. Die Abbildungen 3 und 4 zeigen bei verschiedenen atmosphärischen Bedingungen die Ausbreitung der Dampffahne, wie sie vom Rechner ermittelt und aufgezeichnet wurde.

In diesen Darstellungen sind die Schwaden mit Punkten gekennzeichnet, wobei ein Zeichen dann erscheint, sobald die Luftfeuchtigkeit 100 % beträgt. Dann kondensiert nämlich der Wasserdampf zu Nebeltröpfchen, d.h., es bildet sich eine Wolke. Der Dampfschwaden eines Kühlturms ist also nichts anderes als eine künstlich erzeugte Wolke. Die waagerechte Skala bezeichnet den Abstand von den Kühltürmen in Metern, die senkrechte die Aufstiegshöhe. Im Diagramm des oberen Teils der Abbildungen befindet sich die Darstellung des entsprechenden Radiosondenaufstiegs, also die vertikale Verteilung der Temperatur, der relativen Feuchte und der Windgeschwindigkeit.

Gute Durchmischung findet statt, wenn die Temperatur mit der Höhe abnimmt (Abbildung 3). Wenn sie dagegen in einem bestimmten Höhenbereich zunimmt, spricht man von einer Inversion; dabei ist eine kühle Luftschicht von einer wärmeren überlagert. Die Abbildung 4 zeigt im unteren Teil eine deutlich ausgeprägte Inversion in etwa 500 m Höhe, die den Aufstieg des Schwadens begrenzt. Der obere Teil in Abbildung 4 zeigt zwei schwach ausgeprägte Inversionen, eine um 250 m, die andere 500 m über Grund.

Unter Zugrundelegung der Häufigkeitsstatistik der atmosphärischen Ausbreitungsverhältnisse (Abschnitt 4) kann man statistische Aussagen zur Schwadenlänge ermitteln und darstellen (z.B. Abbildung 5). Dies geschieht in der Weise, daß das Ergebnis einer Ausbreitungsrechnung mit einem Faktor gewichtet wird, welcher sich aus der Häufigkeit der zugehörigen atmosphärischen Ausbreitungsbedingungen, also der entsprechenden Klassenbesetzung, ergibt.

Der so ermittelte Wert für die Geometrie des sichtbaren Schwadens ist aber noch korrekturbedürftig, denn der Schwaden wird ja unsichtbar, wenn er in einer niedrigen Wolkendecke verschwindet oder wenn die Sichtweite wegen Dunst oder Nebel eingeschränkt ist. Diese Korrektur ist wichtig, weil in den Fällen hoher Luftfeuchte viel Bewölkung vorhanden ist und gleichzeitig große Schwadenlängen auftreten. Auf eine einfache Formel gebracht heißt dies, daß bei schlechtem Wetter lange Schwaden, bei Schönwetter kurze Schwaden überwiegen. Die Bewölkungs- und Sichtweitenkorrektur der Schwadengeometrie bestimmt man anhand der zu den Ausbreitungsrechnungen gehörenden Bewölkungs- und Sichtbeobachtungen oder mittels einer Feuchte-Bewölkungs-Korrelationstabelle.

Die Ergebnisse der Berechnungen für einzelne Kühltürme der genannten Größenordnung ergaben folgendes Bild:

Die Aufstiegshöhen der Schwaden sind insbesondere abhängig vom Wind. Bei starkem Wind bleibt er trotz seines anfänglichen thermodynamischen Auftriebs in Höhe der Kühlturmkrone (Abbildung 3). Im Durchschnitt steigt aber nach Berechnungen für Mitteleuropa der Schwaden bei Naturzug-Naßkühltürmen auf 500 bis 800 m über Grund, bei niedrigen Zellenkühlern nur auf rund 150 bis 250 m über Grund.

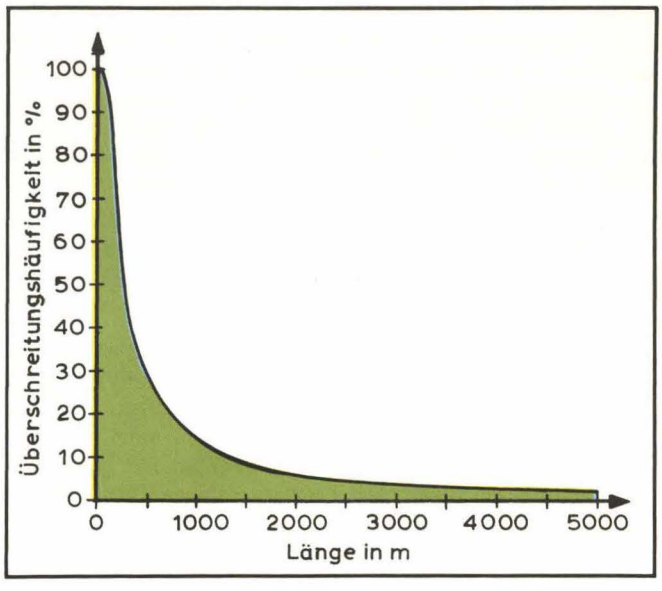


Abb. 5:
Häufigkeitsverteilung von Schwadenlängen (Die Darstellung ist folgendermaßen zu lesen: In 50 % der Zeit ist der Schwaden länger als 250 m, in 10 % länger als 1300 m usw.)

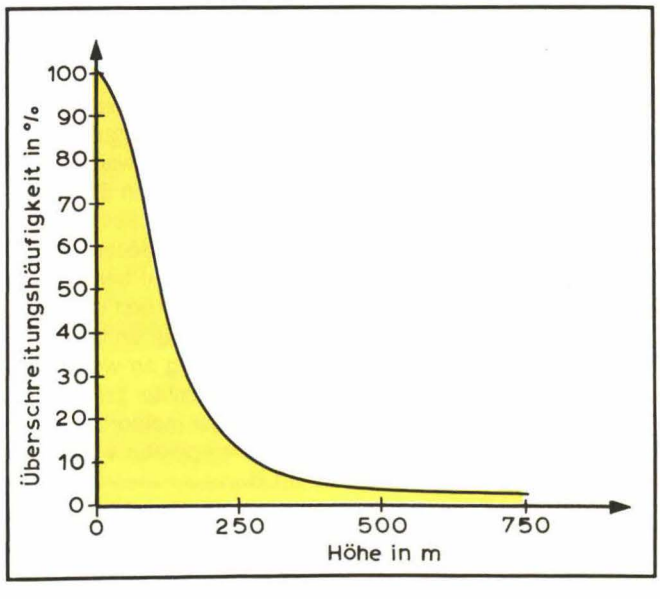


Abb. 6:
Häufigkeitsverteilung von Schwadenaufstiegshöhen

Recht differierende Resultate zeigen die Berechnungen zur mittleren Schwadenlänge. Ein genauerer Wert als etwa 1 000 bis 2000 m im Durchschnitt läßt sich für die großen Naßkühltürme in Mitteleuropa kaum angeben. Diese Unsicherheit ist in der begrenzten Leistungsfähigkeit der numerischen Simulation begründet. Es scheint, daß die Schwaden in Norddeutschland im Mittel kürzer als in Süddeutschland sind. Dies hängt zweifellos mit der größeren Häufigkeit stabiler Luftschichtung und schlechtem Austausch im Süden der Bundesrepublik zusammen.

Die Darstellung der Häufigkeitsverteilung bestimmter Schwadenlängen und -aufstiegshöhen kann nach Art und Weise der Abbildungen 5 und 6 erfolgen. Das bedeutet zum Beispiel in

[2]) 1 Dekameter = 10 m

der Abbildung 5, daß im Mittel in 50 % der Zeit des Jahres die Schwaden länger als 250 m werden.

Mit der Ausdehnung der sichtbaren Schwaden kann nun ein rechnerischer Ansatz zur Lösung des Problems der Beschattung gemacht werden. Dieser Ansatz birgt einige Schwierigkeiten, weil neben der Variation von Schwadengeometrie und Ausbreitungsrichtung außerdem noch der wechselnde Sonnenstand und die natürlichen Bewölkungsverhältnisse zu berücksichtigen sind. Nach neueren Berechnungen sind in 1 bis 2 km Abstand vom Kühlturm bis rund 10 Minuten Beschattung pro Tag und im Jahresmittel zu erwarten. Bei mehreren großen Kühltürmen wird die Beschattung schon merklich größer und erreicht in den am stärksten betroffenen Sektoren 30 bis 60 Minuten pro Tag und im Mittel des Jahres. Dies entspricht einer Minderung der natürlichen Sonnenscheindauer um rund 10 Prozent [8].

Das natürliche Angebot an kurzwelliger Strahlung ist nun besonders im Sommerhalbjahr für den Bedarf unserer Vegetation überreichlich. Dies wird zum Beispiel am Wachstum in sonnenscheinarmen Sommern sichtbar. Zudem setzt sich das kurzwellige Strahlungsangebot aus direkter und gestreuter Sonnenstrahlung zusammen. Letztere überwiegt sogar an bewölkten Tagen. An wolkenlosen Tagen ist damit zu rechnen, daß der Schattenwurf zwar die Besonnung teilweise vermindert, an anderer Stelle aber durch Reflexion am weißen Schwadenrand die diffuse Strahlung zunimmt. Auf diese Weise ist eine teilweise Kompensation des Minderangebotes an solarer Strahlung zu erwarten.

Die Wasserdampfemission der Kühltürme wird sichtbar durch die mehr oder weniger ausgeprägten beobachtbaren Schwaden. Nun ist der Bereich der gesamten kühlturmbedingten Wasserdampfzunahme in der Atmosphäre gewiß sehr viel größer als der sichtbare Schwadenbereich, denn diese Anreicherung langt nicht überall zur Sättigung bzw. Kondensation. Der thermodynamische oder durch Ventilation angeregte Auftrieb der Schwaden sorgt dafür, daß der sichtbare Schwaden in der Nachbarschaft der Kühltürme nur sehr selten den Boden berührt – dies geschieht vereinzelt bei starkem und böigem Wind infolge der bauwerksbedingten Turbulenz. Aus diesem Grunde erreichen die für die bodennahen Luftschichten berechneten Temperatur- und Feuchteerhöhungen erst nach einigen Kilometern ihre maximalen Werte. In dieser Entfernung ist aber die Durchmischung mit der Umgebung so weit fortgeschritten, daß die errechneten mittleren Feuchte- und Temperaturerhöhungen weit unter der Grenze der meteorologischen Nachweisgenauigkeit liegen (bei der Temperatur weniger als ca. 0,01 K, bei der Feuchte ca. 0,1 %).

Bei Kühltürmen älterer Bauart wird immer wieder ein beachtlicher Tropfenauswurf in der Umgebung festgestellt. Diese Erscheinung rührt daher, daß mit dem Luftzug kleine Tröpfchen aus der Rieselanlage mitgerissen und herausgetragen werden. Naßkühltürme neuerer Bauweise schränken diesen Tropfenauswurf mit Hilfe sogenannter Tropfenfängereinbauten erheblich ein. Dadurch sind die berechneten Niederschlagserhöhungen mit ca. 1 % in 1 km Abstand gering.

Gefrierender Nebel und Glatteis als Folge des Kühlturmbetriebs sind sehr abhängig von der Bauhöhe. Bei den hohen Naturzug-Naßkühltürmen ist die Bodenberührung des sichtbaren Schwadens so selten, daß keine nennenswerten Effekte zu erwarten sind. Bei niedrigen Türmen nimmt die Häufigkeit und Wahrscheinlichkeit von Bodenberührungen aber zu und damit je nach klimageographischer Lage in Mitteleuropa auch die Wahrscheinlichkeit für Vereisungs- und Rauhfrosterscheinungen. Denn bei entsprechenden meteorologischen Bedingungen (das sind in diesem Fall starker Wind, hohe Luftfeuchte und Temperaturen unter 0°C) können durch den Aufprall von Schwadentröpfchen und Sprühwasser aus den Kühltürmen auf Vegetation und Straßen Rauhreif- oder Glatteisansätze entstehen.

Neben der rechnerischen Ermittlung der direkten Auswirkungen hat man – wie vorstehend beschrieben – den naheliegenden Problembereich untersucht und viele wertvolle Erkenntnisse gewonnen. So kann man festhalten, daß trotz der gewaltigen Energieemission der Kühltürme eine einschneidende Veränderung des Klimas in der Umgebung nicht stattfinden wird, solange nicht große „Kraftwerkzentren" mit einer Vielzahl von Naßkühltürmen entstehen.

Die Zuverlässigkeit dieser Aussage beruht zu einem Teil auf der Verifizierbarkeit der berechneten Ausbreitung. Der Nachweis dieser Verifizierbarkeit erfolgt durch einen wechselseitigen Informationsfluß, wobei zu gemessenen meteorologischen Zuständen Photos von Kühlturmschwaden sowie die für die Ausbreitungsrechnung notwendigen technischen Daten der Kühltürme international ausgetauscht werden. Es ist dann davon auszugehen, daß bei ausreichender Ähnlichkeit des berechneten Schwadens mit dem photographierten sichtbaren Schwaden auch die berechnete räumliche Verteilung anderer meteorologischer Parameter hinreichend realistisch erfaßt ist. Ansonsten dient dieser Austausch natürlich auch der Kalibrierung und Verbesserung der Ausbreitungsmodelle[4].

6. Indirekte Auswirkungen des Kühlturmbetriebs

Unter die Bezeichnung „indirekte Auswirkungen" fallen jene, welche nicht unmittelbar über eine Ausbreitungsrechnung erfaßbar sind. Dies sind vor allem

a) Beeinflussung der Strahlungsbilanz des Erdbodens,

b) Bildung von Nebel und Hochnebel,

c) Bildung von Quellwolken, Schauern und Gewittern,

d) Stabilisierung hochliegener Inversionen und Hochnebelniederschläge.

Die indirekten Auswirkungen betreffen besonders Situationen, bei denen der natürliche meteorologische Energieumsatz sehr gering ist, Fälle mit etwa gleich großen, einander entgegengesetzten Energieflüssen und solche mit einem „Energiestau", bei denen ein Initialimpuls fehlt, sie betreffen also Einzelwetterlagen bzw. meteorologisch-synoptische Grenzfälle.

a) Beeinflussung der Strahlungsbilanz des Erdbodens

Die Erde steht als ganzes im Strahlungsgleichgewicht, der Energiebetrag der von der Sonne kommenden – überwiegend kurzwelligen – sichtbaren elektromagnetischen Strahlung ist also so groß wie jener der terrestrischen Strahlung – die im infraroten Spektralbereich liegende und daher unsichtbare Temperaturstrahlung der Erde –, welche in den Weltraum hinausgeht. Wir erleben den täglichen Wechsel der Strahlungsströme im Temperaturgang: Mit der Sonnenstrahlung am Tage steigt die Temperatur, nachts führt die langwellige Temperaturstrahlung der Erdoberfläche zu einer fortschreitenden Abkühlung bis zum Sonnenaufgang. Nun werden diese beiden Haupt-Strahlungsströme, die kurzwellige, solare Einstrahlung und die langwellige, terrestrische Ausstrahlung, in der Lufthülle mehr oder weniger beeinflußt, sie werden teils gestreut, teils absorbiert oder auch reflektiert. Dies besorgen nicht nur die Luftmoleküle selbst, sondern vor allem auch die natürlichen und anthropogenen (vom Menschen stammenden) Luftbeimengungen. Die wichtigsten Beimengungen der Luft sind in diesem Sinne der Wasserdampf und das Kohlendioxid. Da von den Kühlturmschwaden die Rede ist, soll hier nur die Rolle des Wasserdampfes diskutiert werden.

Durch Nebel und Wolken wird die Ausstrahlung der Erdoberfläche vollständig absorbiert. So ist jedem geläufig, daß es in klaren Nächten sehr viel kühler wird als in bewölkten. Nun absorbiert die Wolkendecke nicht nur die Wärmestrahlung der Erdoberfläche, sondern sie sendet ihrerseits auch eine Temperaturstrahlung aus. Man spricht von der sogenannten „Gegenstrahlung" der Atmosphäre. Die Gegenstrahlung kann sogar zu einem Temperaturanstieg in der Nacht führen, und zwar dann, wenn die Temperatur an der Wolkenuntergrenze höher ist als am Erdboden. Dann herrscht eine Inversionssituation, die Temperatur nimmt mit der Höhe zu. Oft stellt sich dann nach einigen Stunden eine isotherme Temperaturschichtung ein, die Temperatur bleibt bis zur Wolkenuntergrenze gleich. In dieser Situation ist die terrestrische Strahlung so groß wie die Gegenstrahlung von der Wolkendecke, beide Strahlungsströme sind gleich groß und entgegengerichtet, man sagt, die langwellige Nettostrahlung oder auch die langwellige Strahlungsbilanz ist Null.

In klaren Nächten verteilt sich der Energieverlust durch die langwellige Ausstrahlung nicht gleichmäßig über den gesamten Himmelshalbraum, sondern es gehen bereits 80 % durch einen Kegel mit ca. 30° Zenitabstand. Es ist aus diesem Grunde verständlich, daß Kühlturmschwaden, welche ja niedrige Wolken darstellen, je nach Ausdehnung die nächtliche Nettostrahlung des Erdbodens lokal verändern bzw. verringern.

Zur Ermittlung langwelliger Energieströme gibt es erprobte empirische Gleichungen, anhand derer eine Abschätzung der Beträge vorgenommen wurde. Berücksichtigt wurde dabei lediglich die Absorption der Ausstrahlung durch den sichtbaren Schwaden und die von ihm ausgehende Gegenstrahlung.

Man hat in zahlreichen Untersuchungen das Verhalten der nächtlichen langwelligen Strahlungsbilanz des Erdbodens bei verschiedenen Arten und Mengen von Bewölkung untersucht. Als Sonderfall wurde oben bereits die Situation geschildert, daß die Temperatur an einer geschlossenen Wolkendecke dieselbe wie am Erdboden ist („Isothermie"). In den meisten Fällen, vor allem in der warmen Jahreszeit, ist es aber an der Wolkendecke kühler als am Erdboden, es wird dann die langwellige Ausstrahlung etwas größer sein als die Gegenstrahlung, so daß auch in solchen Nächten die Temperatur der bodennahen Luftschicht etwas zurückgeht. Dies ist in Abbildung 7, welche auf statistischen Ergebnissen fußt, der Fall. Die langwellige Nettostrahlung des Erdbodens weist daher auch bei geschlossener Wolkendecke noch einen geringen Restbetrag auf.

Im übrigen zeigt diese Abbildung das Verhalten der langwelligen Strahlungsbilanz der Erdoberfläche bei verschiedenen Bewölkungsmengen. Je größer die Wolkenlücken, desto mehr terrestrische Strahlung kann in den Weltraum emittiert werden bzw. je kleiner die Wolkenfläche, desto geringer ist der Betrag der zur Erde gerichteten Gegenstrahlung. Der Verlauf ist nicht linear, die Beeinflussung der nächtlichen Bilanz ist bei wenig Bewölkung klein, wächst aber bei stärkerer Bewölkung rasch an.

Diese Erkenntnisse wurden in einer groben Abschätzung auf Kühlturmschwaden angewendet, wobei diese die einzige Bewölkung in ansonsten klaren Nächten darstellten. Die Verminderung der nächtlichen Strahlungsbilanz des Erdbodens kann danach in den betroffenen Sektoren rund 50 % des ungestörten Betrages erreichen. Natürlich sind vor allem jene Bereiche betroffen, welche am häufigsten im Lee der Kühltürme liegen.

Die Verringerung der langwelligen Bilanz bedingt eine geringere nächtliche Abkühlung der bodennahen Luftschichten. Dennoch ist in der Regel auch auf diesem Wege keine nachweisbare Änderung der durchschnittlichen Temperaturen zu erwarten, weil die auch in Strahlungsnächten vielfach vorhandenen schwachen Luftbewegungen einen horizontalen Ausgleich herzustellen versuchen. Ausgenommen davon sind aber jene Kleinklimabereiche, welche von der allgemeinen Luftbewegung abgeschirmt sind, wie Waldlichtungen, kleine Täler und Senken. Hier ist in Strahlungsnächten mit darüberdriftenden Schwaden eine meßbar geringere Strahlungsabkühlung zu erwarten.

b) Bildung von Nebel und Hochnebel

Nebel ensteht im süddeutschen Flachland im allgemeinen als Strahlungsnebel. Bei ausreichender Luftfeuchte führt eine negative Strahlungsbilanz des Erdbodens zur Abkühlung unter den Taupunkt, wobei der Wasserdampf zu Tau (an festen Gegenständen) und Nebeltröpfchen kondensiert. Da die Kühlturmschwaden sich jedoch in höheren Luftschichten ausbreiten und eine Erhöhung der Feuchte in den bodennahen Schichten nicht zu erwarten ist, kann eine Zunahme von Häufigkeit und Dichte natürlich vorkommenden Strahlungsnebels ausgeschlossen werden. Eher als eine Zunahme von Strahlungsnebel kann im Gegenteil eine örtliche Abnahme eintreten, weil die Zunahme des Wasserdampfes im Ausbreitungsniveau und vor allem die sichtbaren Schwaden die terrestrische Ausstrahlung und damit die Abkühlung der Erdoberfläche darunter behindern.

Ungünstiger sind hingegen die Kühlturmauswirkungen auf Hochnebel zu beurteilen. Hochnebel ist eine vom Erdboden abgehobene Nebeldecke. Bei typischen herbst- und winterlichen Hochnebelsituationen befindet sich eine dichte Nebeldecke zwischen etwa 100 und 1000 m über Grund. Die obere Begrenzung bildet eine Absinkinversion mit sehr trockener, milder und klarer Luft, während es unter der Inversion und am Boden feucht-kalt ist.

Es wurde untersucht, ob durch die zusätzliche Feuchteeinspeisung der Kühltürme dieser Prozeß eine Hochnebelbildung begünstigen kann, denn bei Wetterlagen mit geringem Vertikalaustausch reichert sich Wasserdampf der Kühltürme in einer verhältnismäßig dünnen Luftschicht an.

Hochnebel entsteht in den meisten Fällen dadurch, daß sich mit dem nach oben gerichteten Wasserdampfstrom (durch Verdunstung aus dem Erdboden und dem Pflanzenbewuchs) ein mächtiger Strahlungsnebel vom Erdboden abhebt. Gelegentlich entsteht Hochnebel aber aus der Strahlungsabkühlung der feucht-kalten Luft unter einer markanten Absinkinversion.

Zum Verständnis dieses meteorologischen Prozesses muß man sich vergegenwärtigen, daß nicht nur feste oder flüssige Körper elektromagnetische Strahlung unterschiedlich absorbieren und emittieren, sondern auch Gase. Der gasförmige Wasserdampf absorbiert und emittiert Strahlung in breiten Bereichen des terrestrischen Strahlenspektrums. In klaren Nächten mit hoher Luftfeuchte kühlt es deutlich weniger ab als bei trockener Luft, und jedermann weiß, daß es in den sehr trockenen Wüstengebieten trotz glühender Hitze am Tage nachts empfindlich kalt werden kann. Je mehr Wasserdampf in der Luft ist, desto mehr langwellige Strahlung des Erdbodens wird von ihm absorbiert und wiederum als Gegenstrahlung zurückgestrahlt. Damit wird auch das Verhalten der langwelligen Bilanz des Erdbodens bei verschiedener relativer Luftfeuchte in Abbildung 7 verständlich: Bei sehr trockener Luft (f = 25 %) und wolkenlosem Himmel beträgt die Bilanz 95 Watt pro m^2, bei feuchter Luft (f = 85 %) hingegen nur 70 W/m^2. Die physikalischen Stoffe haben die Eigenschaft, in jenen Spektralbereichen, in welchen sie ein hohes Absorptionsvermögen aufweisen, auch entsprechend stark Strahlung zu emittieren. Eine dafür günstige Situation ist in der Atmosphäre dann gegeben, wenn eine wie oben geschilderte Inversion vorhanden ist, die eine sehr trockene Luftmasse oben von einer sehr feuchten Luft unten mit einer scharfen Begrenzung trennt. Die feuchte Luftmasse sendet dann eine langwellige Strahlung aus, welche

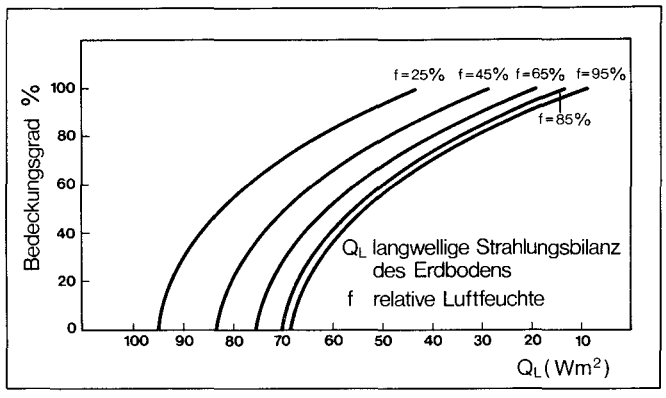


Abb. 7:
Verhalten der langwelligen Strahlungsbilanz des Erdbodens bei verschiedenen Bedeckungsgraden niedriger Bewölkung und bei verschiedener relativer Luftfeuchte (nach Angström)

nicht durch eine Rückstrahlung kompensiert werden kann, denn in den Luftschichten darüber befindet sich ja kaum Wasserdampf. Durch die Strahlungsabkühlung kann der Sättigungspunkt (Taupunkt) unterschritten werden, es setzt Kondensation und Nebel- bzw. Wolkenbildung ein.

Zur Abschätzung eines solchen Ereignisses wurden verschiedene Modellfälle mit hochliegenden Inversionen untersucht, von denen hier zwei diskutiert werden. Die Abbildungen 8 und 9 zeigen im oberen Teil die vorgegebene meteorologische Situation, links ist der vertikale Temperaturverlauf. Die Temperatur

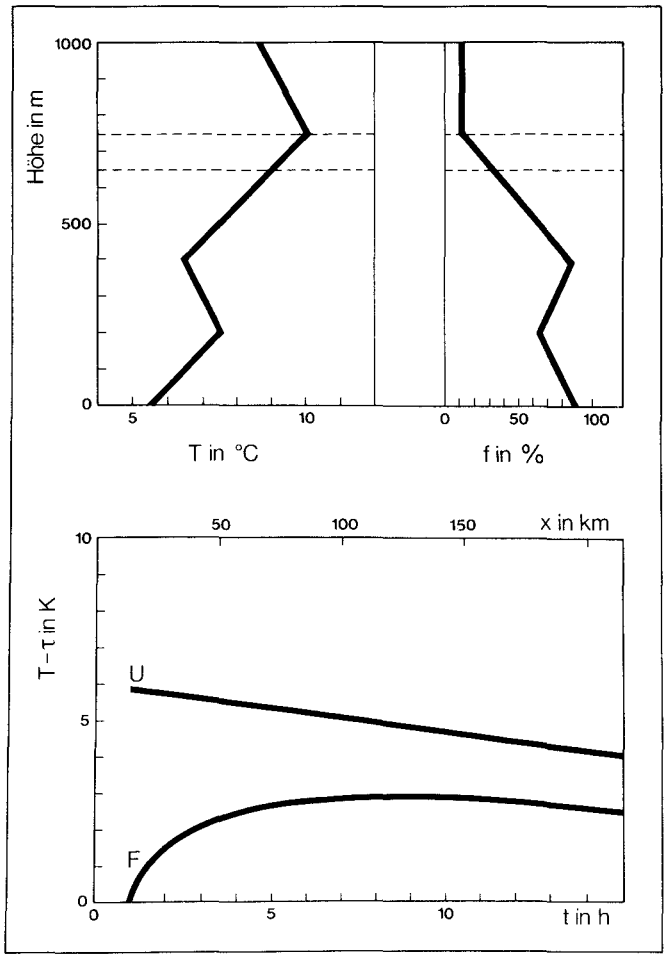


Abb. 8:
Oben: Vertikales Temperatur- und Feuchteprofil

Unten: Verlauf der Taupunktsdifferenz T–τ in der Umgebung (U) und im Fahnenelement (F)

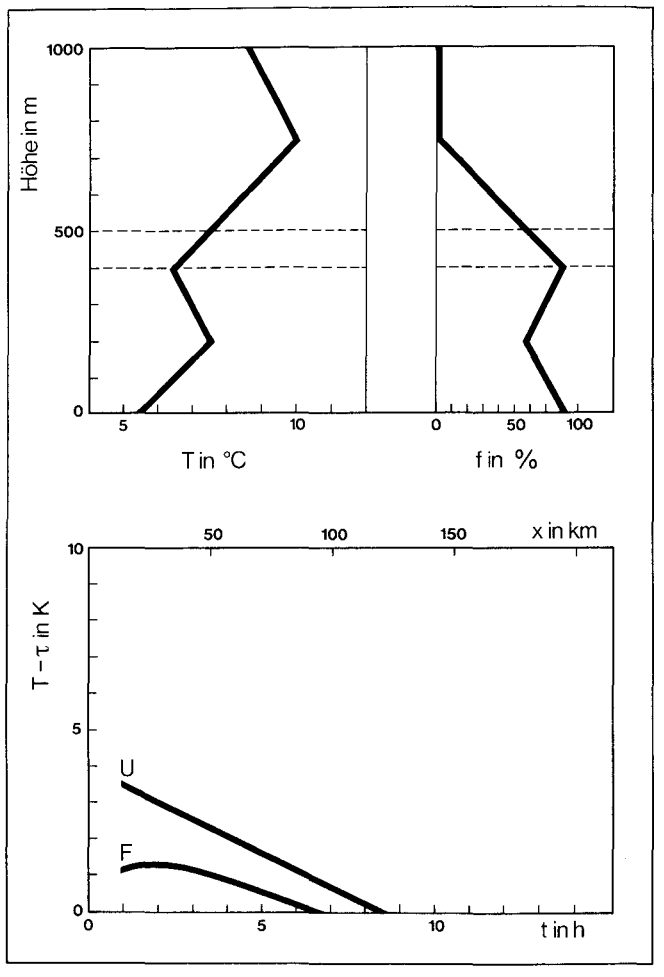


Abb. 9:
Oben: Vertikales Temperatur- und Feuchteprofil

Unten: Verlauf der Taupunktsdifferenz T–τ in der Umgebung (U) und im Fahnenelement (F)

nimmt vom Boden zunächst bis 200 m über Grund zu (Bodeninversion), darüber zunächst ab, zwischen 400 und 750 m über Grund aber erneut zu (Höheninversion), darüber wieder ab. Die relative Feuchte (rechte Kurve) beträgt oberhalb der Höheninversion im Fall der Abbildung 8 10 %, in Abbildung 9 0 %. Der Bereich, in welchem die Schwadenluft driftet, ist gestrichelt einmal im oberen, im zweiten Fall im unteren Bereich der Höheninversion angedeutet.

Es wurde nun berechnet, wie sich die Strahlungsabkühlung in der gestrichelten Schicht in Abhängigkeit von der Zeit vollzieht, und zwar sowohl im ungestörten Zustand (U für Umgebungsluft) wie für den Fall, daß sich in dieser Schicht feuchte Schwadenluft aus Kühltürmen befindet (F für Fahnenluft).

Die Ergebnisse sind im unteren Teil der Abbildungen dargestellt. Die Ordinate zeigt die sogenannte Taupunktdifferenz. Die Taupunktdifferenz ist ein Maß für die Wasserdampfsättigung. Wenn die Temperatur gleich dem Taupunkt ist, ist die Differenz von Temperatur und Taupunkt, die Taupunktsdifferenz, Null und es beginnt bei weiterer Abkühlung die Kondensation zu Nebeltröpfchen. Dieser Zustand wird im ersten Fall (Abbildung 8) auch nach 15 Stunden weder in der Umgebungsluft U, noch in der Schwadenluft F erreicht. In der Abbildung 8 ist also weder eine natürliche, noch eine durch Wasserdampfeinspeisung induzierte Hochnebelbildung zu erwarten.

Der zweite Fall (Abbildung 9) ist dagegen geeignet, auch einen natürlichen Hochnebel entstehen zu lassen. Voraussetzung dafür ist neben hoher Feuchte in einer unteren Schicht die extrem geringe darüber. Erst dann ist offenbar der Beitrag der Gegenstrahlung aus den Luftmassen oberhalb der Inversion ge-

nügend klein, um im Verlauf einer zunächst klaren Nacht einen Hochnebel entstehen zu lassen. Der beschriebene Modellfall läßt den Hochnebel in der ungestörten Umgebung nach 8 Stunden, im Fahnenelement bereits nach 6 Stunden entstehen. Es ist daraus der Schluß zu ziehen, daß die Wasserdampfemission die Hochnebelbildung begünstigt.

c) Bildung von Quellwolken, Schauern und Gewittern

Da die feucht-warme Kühlturmluft den atmosphärischen Auftrieb begünstigt und überdies Wasserdampf emittiert, ist unter bestimmten atmosphärischen Bedingungen auch eine künstliche Wolkenbildung zu erwarten.

Bei Wetterlagen, die zur Entwicklung von Quellwolken (Cumuluswolken) neigen, ist durch die Kühltürme der notwendige Initialimpuls zur Cumulusbildung gegeben; es sei denn, die Luftbewegung ist so stark, daß der Schwaden rasch aufgelöst wird.

Mit der vermehrten Cumulusbildung ist auch eine erhöhte Schauerbildung zu erwarten, doch muß die Befürchtung einer Zunahme schwerer Gewitter, von Hagel und Unwettern eher verneint werden.

Ein Gewitter mittlerer Intensität erbringt etwa eine Niederschlagsmenge von 10 mm auf einer Kreisfläche mit dem Radius von 2 km. Diese Wassermenge entspricht einer latenten Energie, welche rund 50 mal so groß ist, wie diejenige, welche ein Kühlturm für einen 1300 MWe-Block innerhalb einer Stunde emittiert. Auch hier liefern die Kühltürme offenbar nur einen Initialimpuls, sie können angesichts des Größenordnungsunterschieds nur die Auslösung von Gewittern begünstigen bzw. vorverlegen.

Diesen Effekt kann man unter einem positiven Aspekt sehen. Die frühere Auslösung sich aufbauender Labilitätsenergien ist oft der einzig brauchbare Weg zur Verhinderung von Labilitätskatastrophen. So versucht man z.B. im Lawinenschutz, bei Hagelunwettern, Tornados und tropischen Wirbelstürmen auf verschiedene Weise frühzeitig die Energien abzuleiten, z.B. durch das Abschießen von Lawinen oder durch das Besäen von Wolken mit Sublimationskernen.

Bei den Kühlturmeffekten ist zu berücksichtigen, daß nur bei Fast-Windstille die unmittelbare Kühlturmumgebung betroffen ist. Eine halbe Stunde kann größenordnungsgemäß als Zeitraum für die Bildung einer Schauerwolke bis zum Niederschlag angesehen werden. Bei einer Windgeschwindigkeit von 5 m/s legt ein aus dem Kühlturm emittiertes feuchtes „Luftpaket" in dieser Zeit fast 10 km zurück. Damit gelangt man mehr in einen Entfernungs- und Flächenbereich regionaler Größenordnung, und ein Ereignis „künstlicher Schauer" ist wegen der unterschiedlichen Ausbreitungsrichtungen und Windgeschwindigkeiten schon aus geographischen Gründen für einen bestimmten Ort so selten, daß eine klimatische Bedeutung ausgeschlossen werden kann, zumal die natürlichen räumlichen Schwankungen der meteorologischen Parameter wesentlich größer sind.

d) Stabilisierung hochliegender Inversionen und Hochnebelniederschläge

Bei Hochnebel – eine für viele Gegenden Süddeutschlands häufige Wettererscheinung im Herbst und Frühwinter – gibt es meist eine ausgeprägte Inversion in einer Höhe zwischen 300 und 1000 m; unten ist es feucht-kalt, über dem Hochnebel aber warm und trocken. Man spricht von einer Absinkinversion. Dabei sinkt die Luft oberhalb der Inversion langsam ab, und die Inversion stellt eine im Gleichgewicht befindliche Grenzfläche zwischen dieser Absinkbewegung und andererseits dem von unten nach oben gerichteten Wasserdampfstrom dar[6]. Ist die Absinkbewegung der Höhenluft stärker, so sinkt auch die Inversion ab, wobei sich der Hochnebel auflöst. Der Wasserdampfstrom aus großen Kühltürmen wirkt diesem Absinkvorgang entgegen und kann deshalb stabilisierend auf Inversion und Hochnebel wirken.

Bei Wetterlagen mit Hochnebel kann man immer wieder beobachten, daß lokal begrenzte Niederschläge auftreten. Dabei handelt es sich zum Teil um kurzzeitig leichte bis mäßige Sprühregen- oder Schneefälle, teils auch um stundenlang anhaltenden schwachen Niederschlag. Unter dem Schlagwort „Industrieschneefälle" sind Niederschläge solcher Art bereits bekannt geworden[7]. Viele Beobachtungen deuten darauf hin, daß diese Ereignisse in Stadt- und Industriegebieten häufiger sind als auf dem Lande. Wie für jeden Niederschlag muß auch hier eine Luftmassen-Hebung stattfinden. Kühltürme können ein solches Ereignis durchaus begünstigen, denn sie fördern mit ihrem thermodynamischen Auftrieb die konvektive Luftmassen-Hebung und bringen zusätzlichen Wasserdampf.

Die Ergiebigkeit solcher Niederschläge im Spätherbst und Winter ist jedoch gering und ihre geographische Begrenzung so eng, daß ihnen eine klimatische Bedeutung bislang nicht zugemessen wurde.

7. Zusammenfassung

Mit den obigen Punkten a bis d ist nun der Anschein eines Widerspruchs zum Vorhergehenden entstanden, und zwar derart, daß eine Änderung des Klimas nicht, des Wetters aber wohl doch zu erwarten sei. Der Widerspruch löst sich, wenn man sich an die Begriffsanalyse erinnert: Das Klima ist die Summe und die Variation der Wettererscheinungen. Die bei einzelnen Wetterlagen durch große Kühltürme erzeugten Modifikationen des natürlichen Wetterablaufs mögen örtlich berechenbare und meßbare Größen darstellen – die Summe wird dadurch nicht merklich verändert. Erst recht gilt dies für die natürliche Variation, in welcher vorerst noch die meisten anthropogenen Beeinflussungen – auch die der Kühltürme – untergehen. Dennoch ist die Aufgabe der genaueren Quantifizierung – besonders jene der indirekten Wirkungen – zu lösen.

Die Betrachtung der Umweltrelevanz einzelner Anlagen hat ihre Grenze da, wo sich die Emissionen mehrerer Emittenten überlagern. Dabei ist nicht nur an mehrere Kühltürme, sondern auch an die Emission von Städten und Industrien zu denken. Solche Überlagerungssituationen sind bei nicht wenigen Standorten in der Bundesrepublik sicher gegeben.

Literatur

[1] SAUER, E.: Abwärmeprobleme bei Kraftwerken: Kühlsysteme, Kosten, Umweltaspekte und Abwärmenutzung. Berichte der KFA Jülich, Jül-1255, 1975

[2] KLUG, W.: Ein Verfahren zur Bestimmung der Ausbreitungsbedingungen aus synoptischen Beobachtungen, Staub 29, Nr. 4, 1969

[3] GEISS, H., PASCHKE, M.: Radioökologie – die Emission von Radionukliden und ihr Verhalten in der Nahrungskette und im menschlichen Körper. Kernforschungsanlage Jülich, Jül-Conf-32, 1979

[4] Deutscher Wetterdienst, Wetteramt München: Amtliches Gutachten über das Klima sowie über die meteorologischen Auswirkungen der Kühltürme am Standort der Kernkraftwerke Isar I und II. Bericht für das Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, München, November 1978

[5] KÄSTNER, W.: Der Einfluß einer oder mehrerer Kühlturmfahnen auf die Strahlungsbilanz der Umgebung. unveröffentlicht

[6] SCHALLER, E., KRAUS, H.: Time dependent inversions in different climatic regions. Beiträge zur Physik der Atmosphäre. Bd. 51, 1978

[7] HARLFINGER, O., JAENICKE, M.: Schneefall durch Industrieemissionen?, Umwelt (VDI) Nr. 6, 1978

[8] Deutscher Wetterdienst, Wetteramt Frankfurt: Amtliches Gutachten über das Klima, die Ausbreitungsverhältnisse und die Auswirkungen der Kühltürme am Standort des Kernkraftwerks Biblis, Blöcke A, B und C. Gutachten für den Hessischen Minister für Wirtschaft und Technik, Offenbach, Dez. 1980

Die Sicherung kerntechnischer Anlagen und spaltbarer Materialien

E. Münch und G. Stein

Programmgruppe Kernenergie und Umwelt der Kernforschungsanlage Jülich GmbH

1. Einleitung

Die Frage nach der Möglichkeit, durch Sabotage oder gewaltsames Eindringen in ein Kernkraftwerk einen katastrophalen Unfall mit erheblichen Auswirkungen auf die Umgebung des Kraftwerkes herbeizuführen, ist zu einem gewichtigen Diskussionspunkt in der Auseinandersetzung um den Ausbau der Kernenergie für die Energieversorgung der Bundesrepublik Deutschland geworden. Als ebenso schwerwiegend wird das Problem der Entwendung von spaltbarem Material durch Terroristen angesehen; diese könnten damit in der Lage sein, aus dem gestohlenen Material eine sogenannte „Bastlerbombe" zu bauen und damit Staat und Bevölkerung erpressen und ihrem Willen gefügig machen. Ein weiterer Gesichtspunkt gewinnt durch den Export von Reaktoren, kerntechnischen Anlagen und Nukleartechnologien in andere Länder – vor allem der dritten Welt – an Bedeutung; es wird befürchtet, diese Länder könnten sich mit Hilfe der friedlichen Nutzung der Kernenergie in den Stand versetzen, eigene Atomwaffen zu produzieren und damit eine Bedrohung für den Weltfrieden darstellen. Das Beispiel Indien, das bekanntlich im Mai 1974 einen eigenen atomaren Sprengsatz zündete, hat die bestehenden Besorgnisse noch verstärkt.

Die besondere Problematik der angesprochenen Bereiche – Sabotage, Bastlerbombe, Kernwaffen – besteht darin, daß eine umfassende Information über Möglichkeiten oder Hindernisse nicht offen vermittelt werden kann. Gerade damit würden diejenigen mit Hinweisen und Anweisungen versorgt, die solche Aktivitäten planen oder sich durch diese Art von Aktionen Vorteile versprechen. Durch eine uneingeschränkte Darstellung der Sachverhalte würden sie ihren zweifelhaften Zielen nähergebracht oder aber vor bisher eingeschlagenen, möglicherweise erfolglosen Wegen gewarnt. Aus diesem Grunde werden diesbezügliche Informationen restriktiv gehandhabt und nur solchen Personen zugänglich gemacht, die aufgrund ihrer Funktion oder ihrer Tätigkeit notwendigerweise Kenntnis davon haben müssen. Ein weiterer Gegenstand vertraulicher Behandlung waren bisher die Katastrophenschutzpläne, die für jedes Kernkraftwerk ausgearbeitet wurden und wegen ihrer Vertraulichkeit häufig in Teilen der Öffentlichkeit fehlgedeutet wurden.

Andererseits erweckt ein völliges Schweigen über diese Fragen in einer für die Belange der Kernenergie sensibilisierten Öffentlichkeit den Eindruck, als sei man mit diesen Problemen nicht vertraut, habe dafür keine praktikablen Lösungen, sei diesen Anforderungen gegenüber hilflos oder habe sie gar übersehen. Daraus könnte die Vermutung entstehen, die geäußerten Befürchtungen seien im gewissen Maße berechtigt. Dies ist jedoch absolut nicht so. Dies deutlich zu machen soll das Ziel dieser Ausführungen über die Sicherung kerntechnischer Anlagen und spaltbarer Materialien sein.

Aufbauend auf eingehenden Untersuchungen, die selbstverständlich den Rahmen der erlaubten Information nicht sprengen und die Grenzen der Vertraulichkeit nicht überschreiten, sollen die Kenntnisse vermittelt werden, die es dem Leser ermöglichen, sich ein Bild über den Stand der physikalischen und technischen Gegebenheiten und über die ergriffenen Maßnahmen zu machen.

In diesem Zusammenhang sollen die drei Themenschwerpunkte

- Schutz von Kernkraftwerken gegen Sabotage,
- Katastrophenschutzpläne,
- möglicher Mißbrauch von spaltbarem Material auf nationaler und internationaler Ebene

eingehender behandelt und dargestellt werden.

2. Schutzbedürftige Stationen des Brennstoffkreislaufs

Betrachtet man die verschiedenen Stationen des Brennstoffkreislaufs (Abb. 1), so lassen sich unschwer die schutz- bzw. sicherungsbedürftigen Stationen ermitteln. Die Erzgewinnung und -aufbereitung sowie die Herstellung von Uranhexafluorid (gasförmige Uranverbindung UF_6) bieten keine Angriffsziele für potentielle Täter, weder zu Sabotagezwecken noch für die Entwendung von Material, da das in diesen Bereichen gehandhabte Natururan für einen Mißbrauch nicht geeignet ist.

Die Anreicherungsanlage könnte nur dann ein für eine Entwendung von Spaltstoff interessantes Objekt darstellen, wenn der Anteil an Uran-235, dem spaltbaren Isotop – also der Anreicherungsgrad – erheblich über 20 % hinausgeht. Uran-235 ist im natürlichen Isotopengemisch nur zu 0,7 % enthalten; Leichtwasserreaktoren arbeiten mit einem Uranbrennstoff, der zu 2,5 % bis 3,5 % an Uran-235 angereichert ist. Dieses Spaltmaterial ist für eine Bombenproduktion jedoch, wie später noch erläutert wird, völlig ungeeignet. Eine Erhöhung des Anreicherungsgrades ist bei einer Anlage prinzipiell möglich, jedoch sind bauliche und technische Investitionen erforderlich, die eine nicht zu verheimlichende Unternehmung darstellen. Die Lagerung des abgereicherten Urans wirft wegen des noch geringeren Gehaltes an Uran-235 als beim Natururan in nuklearer Hinsicht keinerlei sicherungstechnische Fragen auf.

In der Brennelementfabrik wird aus dem schwach angereicherten Uran ein für den Reaktorbetrieb geeignetes Brennelement hergestellt. In diesem Verarbeitungsschritt wird die Qualität des verwendeten Urans nicht verändert, so daß hierfür die gleichen Aussagen wie für die Anreicherung gelten. Dasselbe trifft auch für den Transport zwischen beiden und zum Kernkraftwerk zu.

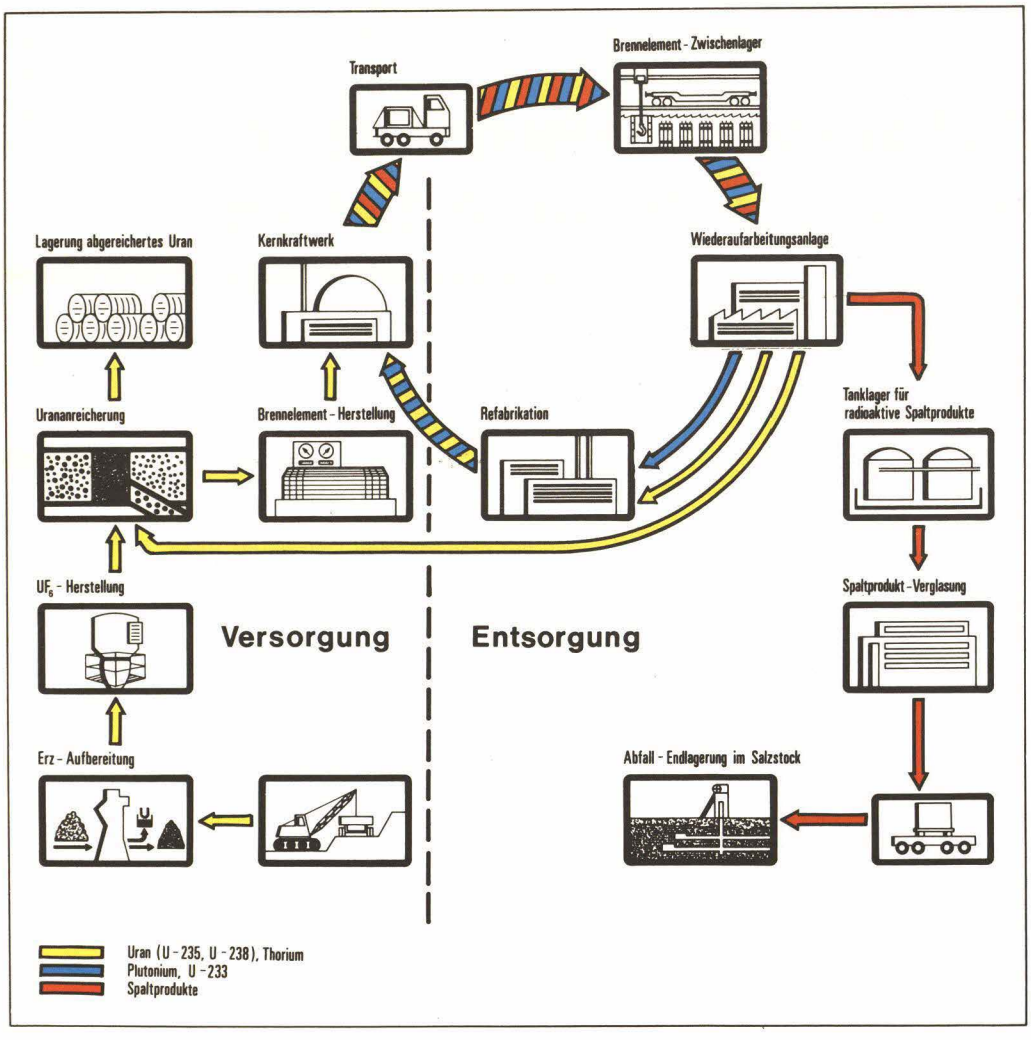


Abb. 1:
Der nukleare Brennstoffkreislauf

Die Entwendung der frischen Brennelemente aus dem Kernkraftwerk stellt ebenfalls kein nukleares Risiko dar. Im Reaktorbereich ist jedoch – als erstes Schwerpunktthema – ein Schutz gegen mutwillige Beschädigung der Anlage durch Sabotage angebracht. Unter Sabotage soll im Rahmen dieser Ausführungen die mutwillige Beschädigung einer kerntechnischen Anlage mit dem Ziel, Spaltprodukte freizusetzen, verstanden werden. Die während des Reaktorbetriebes abgebrannten, also benutzten Brennelemente, schützen sich gegen Entwendung selbst durch ihre außerordentlich hohe, auch für den Dieb äußerst gefährliche Radioaktivität; sie sind jedoch wegen der Radioaktivität der Spaltprodukte gegen mutwillige Zerstörung zu schützen. Daher geschieht der Transport der abgebrannten Brennelemente in die Wiederaufarbeitungsanlage oder in ein Zwischenlager in Behältern, die so ausgelegt sind, daß sie auch bei den schwersten Transportunfällen eine jederzeit dichte Einschließung der radioaktiven Stoffe gewährleisten. Durch extreme Experimente wird die Einhaltung dieser Forderungen überprüft.

Darüber hinaus ist, wie Abb. 2 zeigt, die Größe und vor allem das Gewicht dieser Transportbehälter bis über 100 Tonnen so, daß eine Handhabung nur mit dafür eigens erstellten Apparaturen und Einrichtungen möglich ist. Ein mögliches Zwischenlagerkonzept, wie es z.B. in Ahaus und Gorleben geplant ist, sieht vor, die abgebrannten Brennelemente in Transportbehältern zu lagern, so daß sie dort mindestens ebenso gut wie beim Transport geschützt sind.

In der Wiederaufarbeitungsanlage werden das unverbrauchte Uran, das entstandene Isotopengemisch des Plutoniums und die Spaltprodukte voneinander getrennt. Hier ist ähnlich wie beim Reaktor eine Sicherung gegen Sabotage nötig. Außerdem ist, wie auch bei der Refabrikation (Fabrik für die Herstellung plutoniumhaltiger Brennelemente) ein Schutz des Plutoniums gegen Entwendung erforderlich. Die Refabrikation wird sich schon aus Gründen der Minimierung von Transporten bei der Wiederaufarbeitungsanlage befinden. Für die Sicherung derartiger Kernmaterialtransporte sind indes in einer internationalen Konvention umfassende Maßnahmen ausgearbeitet worden, die weltweit auch bei grenzüberschreitenden Transporten Anwendung finden. Die Endlagerung der radioaktiven Abfälle stellt wegen der großen Radioaktivität der Spaltprodukte wiederum keine sensitive Stelle für Diebe oder Saboteure dar; da die Radioaktivität bei der Endlagerung an feste Materie gebunden ist, ist auch das Freisetzungsrisiko außerordentlich gering. Auch die direkte Endlagerung abgebrannter Brennelemente wird so durchgeführt werden, daß langfristig ein wirksamer Schutz gegen Entwendung und Spaltproduktfreisetzung besteht.

Damit ergeben sich im gesamten Brennstoffkreislauf vornehmlich zwei Stationen, die einen besonderen Schutz, eine zusätzliche Sicherung benötigen, nämlich ein Schutz des Reaktors selbst gegen die mutwillige Herbeiführung von Störfallen, die zur Freisetzung von Radioaktivität in großem Umfang führen könnten, sowie die Verhinderung der Sabotage und der Entwendung von Plutonium-Isotopen aus der Wiederaufarbeitungsanlage.

Für alle kerntechnischen Anlagen, in denen sich größere Mengen radioaktiven Materials befinden, bestehen vergleichbare Anforderungen an die Sicherung gegen die Einwirkung Dritter. Die sich daraus ergebenden Sicherungsmaßnahmen sollen beispielhaft für Kernkraftwerke dargestellt werden, da sie dort bereits verwirklicht sind. Für die anderen kerntechnischen Einrichtungen liegen realisierbare Konzepte vor.

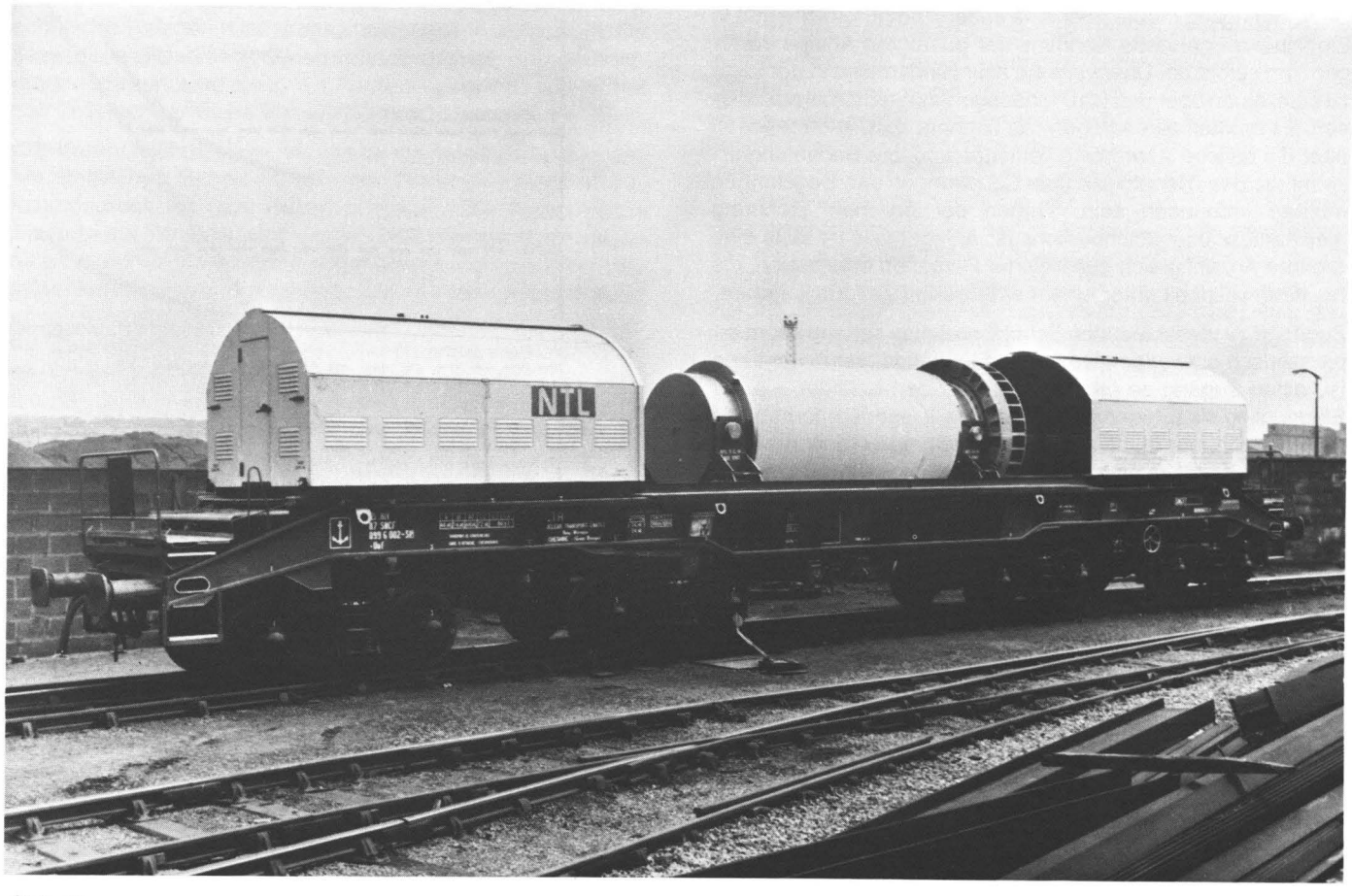


Abb. 2:
Transportbehälter für abgebrannte Brennelemente (NTL 11, Gesamtgewicht ca. 80t, Transportkapazität ca. 3t Uran)

3. Schutz von Kernkraftwerken gegen Sabotage

Der Schutz von Kernkraftwerken gegen Sabotage oder das Eindringen von Unbefugten wird durch das Zusammenwirken von technischen und administrativen Maßnahmen erreicht. Der im Rahmen des Genehmigungsverfahrens geforderte „Schutz des Kernkraftwerkes gegen äußere Einwirkungen" sowie die erforderliche „redundante" und „diversitäre" Auslegung von wichtigen Einrichtungen erleichtern die Realisierung eines wirksamen Sicherungsmodells erheblich.

Zum Schutz gegen äußere Einwirkungen sind bauliche Maßnahmen durchgeführt, die dafür sorgen, daß selbst beim Absturz einer schnellfliegenden Düsenmaschine, bei einem Erdbeben oder bei der Explosion von Gaswolken keine Gefährdung der Umgebung des Kernkraftwerkes durch den Reaktor verursacht wird. Zu diesem Zweck ist der äußere Sicherheitsbehälter des Reaktors mit einer zusätzlichen Stahlbetonhülle mit einer Wandstärke bis zu 1,8 m, dem sogenannten Reaktor-Schutzgebäude, umgeben.

Sicherheitstechnisch bedeutsame Einrichtungen sind redundant, d.h. mehrfach ausgelegt (die wörtliche Bedeutung ist: überflüssig), wobei in der Regel die Auslegung zwei Einheiten mehr vorsieht, als für eine einwandfreie Funktion erforderlich sind. So sind z.B. für die Notkühlung eines Druckwasserreaktors zwei Notkühlsysteme erforderlich, vier Systeme sind insgesamt vorhanden, die völlig unabhängig voneinander arbeiten. Dabei ist auch der Reparaturfall eines Systems berücksichtigt. Diese Einrichtungen sind jedoch nicht nur redundant in der Anzahl, sondern auch räumlich getrennt voneinander oder gegeneinander verbunkert angeordnet. Das hat zur Folge, daß diese Einrichtungen nicht durch ein einziges Ereignis, sei es nun zufällig auftretend oder mutwillig herbeigeführt, gleichzeitig völlig ausgeschaltet werden können. Ein weiteres Prinzip der Sicherheitsphilosophie ist die „Diversität", d.h. die Anwendung von unterschiedlichen physikalischen Methoden, um ein und dieselbe Funktion zu erfüllen. Dies Prinizip verhindert das Versagen von Systemen aus gleicher Ursache. Beide Bestandteile der Sicherheitsphilosophie, Schutz gegen äußere Einwirkungen und die örtliche Redundanz sicherheitstechnisch wichtiger Einrichtungen, unterstützen den Schutz gegen Einwirkungen Dritter deutlich und wirksam.

Der Zugang zu wichtigen Anlageteilen wird durch den Aufbau verschiedener Schutzbereiche, die nacheinander angeordnet sind, erheblich erschwert oder sogar unmöglich gemacht. Bei den Hindernissen, die zwischen diesen Bereichen gegen ein gewaltsames Durchdringen errichtet werden, ist dafür gesorgt, daß die Zeit, die der Eindringling benötigt, um mit vorhandenen Hilfsmitteln das Hindernis zu überwinden, größer ist als die Zeit, die erforderlich ist, den Täter festzustellen, Alarm auszulösen, Schutz- und Hilfskräfte herbeizuführen und über die Situation am Ort zu informieren. Primär sind diese Hindernisse mechanische Barrieren – dies gilt auch für Türen und Tore –, die mit automatischer Detektierung versehen sind. Administrative Maßnahmen, wie Zugangskontrollen und Überwachungen, haben eine zusätzliche Wirkung.

Bei jeder Barriere, die ein Eindringling zu überwinden im Stande war, vermindern sich seine Hilfsmittel, wenn er diese zur Überwindung einsetzen mußte. Auch ist ihm die Zahl der zu überwindenden Hindernisse unbekannt, da nahezu jedes Kernkraftwerk in dieser Beziehung eine Einzelanfertigung darstellt. Währenddessen verliert er ständig Zeit, die für wirksame Gegenmaßnahmen, wie sie für einen solchen Fall vorgesehen sind, genutzt wird.

Der Eindringling müßte über eine äußerst umfangreiche und in Einzelheiten gehende Kenntnis der gesamten Anlage verfügen, um selbst bei Überwindung aller Hindernisse in der Lage zu sein, einen über den GaU hinausgehenden Störfall auszulösen. Es müßten alle Anlagenteile bekannt sein, Informationen über die örtliche Anordnung vorliegen und ihre Bedeutung erkannt werden. Kenntnisse über Schaltungen und Regelungen müßten vorhanden sein. Wegen der örtlichen Trennung gleichartiger und gleichberechtigter Anlagenteile ist stets eine größere Anzahl gleich qualifizierter Personen erforderlich, die bei ihrer Tätigkeit unter einem erheblichen Zeitdruck stehen.

Zugänge zu verschiedenen Schutzbereichen können kaum erpresserisch erzwungen werden, da derjenige, der in der Lage ist, einen Zugang zu öffnen, sich nicht dort befindet, wo der Eindringling sich Zugang verschaffen will, sondern fernab von dieser Stelle, nur durch eine Fernsehleitung verbunden. Darüber hinaus sind im Alarmfall, der schon beim Versuch, das erste Hindernis zu überwinden, ausgelöst wird, ohnehin keine Zugangstüren mehr von außen zu öffnen.

Wie für betrieblich auftretende Störfälle für ein Kernkraftwerk Analysen durchgeführt werden, so werden auch alle Möglichkeiten der Einwirkung Dritter untersucht und analysiert. Um solche Betrachtungen möglichst pessimistisch anzustellen, werden potentielle Tätergruppen angenommen, die über Kenntnisse und Hilfsmittel verfügen, optimal ausgerüstet sind und den Reaktor in einem Betriebszustand antreffen, der ihren Absichten entgegenkommt. Aus den Ergebnissen werden Schwachstellen identifiziert und neue wirksame Schutzmaßnahmen abgeleitet.

Das im Kernkraftwerk beschäftigte Personal unterliegt der Überprüfung durch die Verfassungsschutzorgane des Staates. Ein personeller Einsatz erfolgt nur, wenn diese Prüfung ein völlig zufriedenstellendes Ergebnis hat und sichergestellt ist, daß keine Anzeichen für irgend einen Verdacht vorliegen. Darüber hinaus besteht eine sorgfältige Personenkontrolle beim Betreten der verschiedenen Kraftwerksbereiche, die zum Reaktor hin immer strenger wird und das Betreten des innersten Bereiches nur in Spezialkleidung nach Ablegen der eigenen Kleidung und nach Durchschreiten von Schleusen erlaubt. Außerdem wird eine wirksame Überwachung für das Einbringen von Gegenständen und Material durchgeführt sowie eine ständige Überprüfung der verschiedenen Bereiche auf das Vorhandensein von unerwünschten Stoffen und Materialien. Schließlich ist es üblich, daß Arbeiten innerhalb der Reaktoranlage nur von mehreren Personen gleichzeitig ausgeführt werden. Durch diese Maßnahme wird ein zusätzlicher Sicherheitsgewinn erzielt.

4. Schutz gegen Sprengstoffe und Geschosse

Aufgrund der heute üblichen Auslegung gegen äußere Einwirkungen sind Kernkraftwerke auch gegen Explosionen und Waffeneinwirkungen in hohem Maße geschützt. Die Abbildung 3 gibt einen Überblick über diesen Schutzgrad gegen die Druckwelle als direkte und gegen das induzierte Erdbeben als indirekte Waffenwirkung. Die rot eingezeichnete Gerade gibt für die Druckwelle, die als Folge von Explosionen unterschiedlicher Stärke auftritt, den Grenzabstand für eine Beschädigung des Reaktorgebäudes an. Die grünen Kurven gelten für Erdbeben, die durch Explosionen erzeugt werden. Sie zeigen an, in welchem Grenzabstand Atombomben verschiedener Sprengkraft zur Explosion gebracht werden können, ohne die Sicherheit eines Kernkraftwerkes, welches für die Erdbebenintensität VII ausgelegt ist, zu beeinträchtigen. In der Bundesrepublik geht die Erdbebenauslegung noch über die Intensität VII hinaus. Die Darstellung ist einer schweizerischen Untersuchung entnommen[1] und zeigt, daß eine konventionelle Bombe mit der Sprengkraft einer Tonne in einem geringeren Abstand als

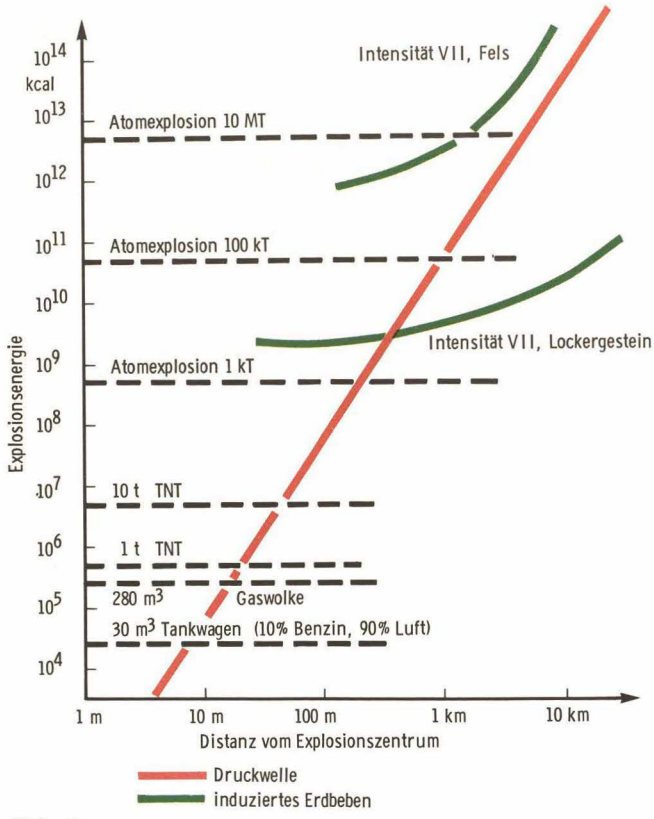


Abb. 3:
Zulässige Explosionen für Reaktorgebäude

20 m vom Reaktorschutzgebäude explodieren müßte, um dieses zu beschädigen. Dadurch würde jedoch der hinter der biologischen Abschirmung befindliche Reaktor nicht zerstört. Eine Atombombe mit einer Sprengkraft von 100 Kilotonnen TNT (Trinitrotoluol) müßte in einem Abstand von höchstens 1 km gezündet werden, um das Reaktorschutzgebäude zu beschädigen. Die Bombe von Hiroshima hatte eine Sprengkraft von 20 Kilotonnen TNT. Durch Waffen und Geschosse, die in die Hand von Terroristen gelangen und von diesen benutzt werden können, kann ein Kernkraftwerk nicht zerstört werden. Das Anbringen von Haftladungen an das Reaktorschutzgebäude von außen würde einen Aufenthalt der Täter dort – also bereits auf dem Kraftwerksgelände – erfordern, was vom Schutzpersonal im Ernstfall verhindert werden kann. Außerdem ergäben sich hierdurch auch keine ernsthaften Zerstörungen.

Die aufgeführten Beispiele verdeutlichen, in welch hohem Maße das Kernkraftwerk gegen Sabotage und Terroranschläge geschützt ist. Das Durchbrechen der gegen Zerstörung und unberechtigtes Eindringen errichteten Barrieren ist extrem schwierig und setzt den Einsatz von äußerst umfangreichen Mitteln voraus, die in keinem Verhältnis zum damit erreichbaren Erfolg stehen. Für Sabotage und terroristische Angriffe existieren zahlreiche Ziele nichtnuklearer Art, die mit erheblich kleinerem Aufwand, mit geringerem Risiko und größeren Erfolgsaussichten erreichbar sind.

Aufgrund der dargestellten Vielfalt von Schutzmaßnahmen kann davon ausgegangen werden, daß durch Sabotageakte das Risiko der Bevölkerung durch Kernkraftwerke nicht signifikant gegenüber dem normalen Risiko, das in der Rasmussen-Studie[2] oder der Deutschen Risikostudie[3] angegeben ist, erhöht wird.

5. Katastrophenschutzpläne

Ebenso wie für andere großtechnische Einrichtungen – Raffinerien, chemische Werke und ähnliches –, bei denen die Möglichkeit besteht, durch Störungen des Betriebsablaufs die Um-

gebung der Anlage zu beeinträchtigen, werden auch für kerntechnische Anlagen Katastrophenschutzpläne aufgestellt. Da diese Pläne aus verschiedenen Gründen bisher vertraulich behandelt wurden, sind sie in der Kernenergiediskussion oft auf zum Teil abenteuerliche Weise zitiert und interpretiert worden.

Katastrophenschutzpläne werden für die jeweilige Anlage von den staatlichen Behörden (z.B. der Kreisverwaltung) in Zusammenarbeit mit dem Betreiber erstellt. Die Pläne geben Hinweise auf Personen und Institutionen, die im Katastrophenfall zu verständigen sind, mit Angabe der Telefonnummer. Sie geben Anweisungen für das Verhalten im Katastrophenfall und enthalten weiterhin detaillierte Angaben über die freizuhaltenden Zugangsstraßen für Hilfsfahrzeuge sowie die vorgesehenen Wege für Evakuierungsmaßnahmen. Darüber hinaus wird dafür Sorge getragen, die Bevölkerung am Betreten des betroffenen Gebietes zu hindern. Gerüchte, die im betroffenen Gebiet wohnende Bevölkerung dürfe dieses nicht verlassen, sind völlig unsinnig. Es ist lediglich beim Verlassen des Gebietes im Fall von Evakuierungsmaßnahmen eine Kontaminationskontrolle, d.h. eine Überprüfung auf radioaktive Verschmutzung sowie eine Entfernung dieser Verschmutzung durch Dekontamination erforderlich. Damit soll eine mögliche Verschleppung von Radioaktivität verhindert werden. Insgesamt kann festgestellt werden, daß auch für den Fall eines höchst unwahrscheinlichen Ereignisses eine umfangreiche Vorsorge im Rahmen des Katastrophenschutzplanes getroffen ist.

Die Vertraulichkeit der Katastrophenschutzpläne soll verhindern, daß durch private Anrufe die erforderlichen Telefonleitungen besetzt sind oder durch Leichtsinn oder auch durch Mutwillen die für Hilfsfahrzeuge und Evakuierung vorgesehenen Straßen und Wege versperrt werden. Zum anderen soll die Bevölkerung nicht unnötig beunruhigt werden. Es kann wohl begründet die Meinung vertreten werden, daß eine solche Vertraulichkeit sinnvoll ist und eigentlich nicht Anlaß zum Mißtrauen sein sollte. Die Innenministerkonferenz hat inzwischen beschlossen, Katastrophenschutzpläne für kerntechnsiche Anlagen offenzulegen, damit die Bevölkerung sich darüber informieren kann, was im unwahrscheinlichen „Ernstfall" auf sie zukommt. In einigen Bundesländern ist diese Offenlegung und damit für die Bevölkerung die Möglichkeit der Einsichtnahme bereits verwirklicht.

6. Mißbrauch von spaltbarem Material

Von Zeit zu Zeit erscheinen in Presse, Funk oder Fernsehen Meldungen und Berichte, nach denen es Studenten und damit erst recht Physikern oder Ingenieuren möglich sein soll, die Pläne für den Bau einer wirkungsvollen Atombombe zu erstellen. Solche Behauptungen sind geeignet, die Bevölkerung, bei der ohnehin die schrecklichen Ereignisse der Atombombenabwürfe von Hiroshima und Nagasaki noch nachwirken, immer wieder zu verängstigen. Nun besteht allerdings zwischen dem Plan zum Bau einer solchen Waffe und der technischen Verwirklichung dieses Planes ein erhebliches technisches Vakuum, das von den Atommächten vor mehr als 35 Jahren nur mit äußerster Anstrengung und mit höchstem wissenschaftlichem, technischem und finanziellem Aufwand gefüllt werden konnte. Für die Sowjetunion war es nur durch Spionage möglich, in den Besitz des zum Bau und zur Zündung der Atombombe notwendigen Rüstungs-know-how zu kommen. Dies gibt schon eine Vorstellung der Schwierigkeiten, die dem Bau einer „Bastlerbombe" zum Glück entgegenstehen.

Auf einige konkrete Hindernisse gegen den Mißbrauch von spaltbarem Material soll im folgenden detailliert eingegangen werden.

Zuerst ist es erforderlich, in den Besitz des spaltbaren Materials zu gelangen. Zur Sicherung dieses Materials ist jedoch ein vergleichbarer Schutz vorgesehen wie gegen das unberechtigte Eindringen in ein Kernkraftwerk, es sind vielfältige Hindernisse aufgebaut, die – verbunden mit administrativen Maßnahmen – einen Diebstahl verhindern. Gegen gewaltsame Entwendung werden die bereits zum Schutz gegen Sabotage und Geschosse diskutierten Barrieremaßnahmen eingesetzt. Von Bedeutung sind dabei Betonstrukturen, Zaun- und Schleusensysteme, mit denen der Zugriff zum Kernmaterial erschwert oder verhindert werden kann. Gegen heimliche Entwendungsversuche von Kernmaterial durch Betriebsangehörige lassen sich mit Hilfe automatischer Detektierungssysteme der Kernmaterial- und Personenverkehr über bestimmte Bereiche verfolgen. Als weitere Möglichkeit zur Entdeckung einer unerlaubten heimlichen Entwendung in einer Anlage wird die Arbeitsablaufkontrolle verwendet. Hier läßt sich durch technische und apparative Maßnahmen sicherstellen, daß das Abweichen von vorgeschriebenen Arbeits- bzw. Handhabungsabläufen zum Alarm führt[4]. Die Wirksamkeit dieser Maßnahmen kann leicht abgeschätzt werden, wenn man bedenkt, daß in den mehr als 30 Jahren militärischen Umgangs mit spaltbarem Material kein Fall von Entwendung bekannt geworden ist, obwohl hier außerordentlich große Mengen gehandhabt wurden. Die Sicherung ist umso intensiver, je höher die Anreicherung des Materials, d.h. der Anteil an spaltbaren Isotopen ist. Dies trifft sowohl für hochangereichertes Uran als auch für hochreines Plutonium-239 zu. „Waffenuran" hat eine Anreicherung von mehr als 90 % an Uran-235, während „Waffenplutonium" zu etwa 93 % aus Plutonium-239 besteht. Tab. 1 und Tab. 2 geben einen Überblick über Mengen an angereichertem Uran bzw. Plutonium, die notwendig sind, eine schnell-kritische Konfiguration herzustellen – eine der zahlreichen Voraussetzungen für den Bau einer Kernwaffe. Für Anreicherungsgrade unter 20 % an Uran-235 werden die benötigten kritischen Massen so groß, daß ein Bau von Kernwaffen mit derartigem Kernmaterial ausgeschlossen werden kann. Für Anreicherungen an Uran-233 liegt die entsprechende Grenze bei 12 % Anreicherung. Die Beschaffung des Materials in der erforderlichen Menge ist die erste große Schwierigkeit. Der

Anreicherung (% U-235)	kritische Masse (kg U-235)	kritische Masse (kg Uran)
100	15	15
80	17	21
60	22	37
40	30	75
20	~ 50	~ 250
10	~ 130	~ 1300

Tab.1:
Schnelle kritische Massen für Uran mit unterschiedlicher Anreicherung und einem Reflektor von 15 cm Natururan[5]

Spaltstoff	kritische Masse (kg)
Waffenplutonium (93.5 % Pu-239)	11
Reaktorplutonium (60 % Pu-239)	13
Uran 233	16
Waffenuran (93.5 % U-235)	56

Tab.2:
Schnelle kritische Massen für unterschiedliche Spaltstoffe ohne Reflektor[6]

Diebstahl von Waffenspaltstoff aus dem militärischen Bereich kann nach der Erfahrung der letzten Jahrzehnte ausgeschlossen werden. Somit müßte lediglich die Konsequenz einer eventuellen Entwendung von Plutonium aus der Wiederaufarbeitung berücksichtigt werden.

Die zweite Hürde zwischen Plan und Verwirklichung stellt die Verarbeitung des Plutoniums dar. Aufgrund seiner chemischen und radiologischen Eigenschaften, auf die in einer separaten Abhandlung[7] detailliert eingegangen wird, kann Plutonium nur in hochtechnisierten und spezialisierten Einrichtungen verarbeitet werden. Diese Einrichtungen erfordern zweistellige Millionenbeträge. Überdies stellt die Verarbeitung für den Bastler stets eine nicht übersehbare Gefahr dar[8]. Wegen der bei der Bearbeitung gehandhabten Radioaktivität würden solche Einrichtungen durch bestehende Strahlenschutzüberwachungen auffindbar und lokalisierbar sein.

Als drittes sind die technischen Schwierigkeiten vor allem bei der Zündung einer solchen Bombe zu nennen. Die bloße Anhäufung einer hinreichend großen Menge Spaltstoff würde lediglich zur Kritikalität – dem extrem kurzfristigen Ablauf einer Kettenreaktion – führen, die die Wirkung von Handgranaten hätte. Für eine wirkungsvolle Zündung müßten zwei nahekritische Massen mit einer erheblichen Geschwindigkeit gleichsam zusammengeschossen werden. Diese Geschwindigkeit entspricht nach Auskunft von Experten bei Waffenplutonium etwa dem Zehnfachen der Schallgeschwindigkeit, d.h. mehreren Kilometern pro Sekunde. Dies ist mit einfachen technischen Mitteln schon nicht mehr zu erreichen, so daß moderne Implosionstechniken beherrscht werden müssen. Zusätzliche Schwierigkeiten bereitet die extrem genaue Zeitabstimmung zwischen Zusammenschuß und Neutronenimpuls, mit dem die Kettenreaktion angeregt wird.

Waffenplutonium wird in speziellen Reaktoren in kurzen Betriebszyklen, wobei die Brennelemente nur einen ganz geringen Abbrand erreichen, eigens produziert. Bei längerem Verbleib im Reaktor bilden sich aus dem Plutonium-239 zunehmend höhere Isotope wie Plutonium-240, Plutonium-241, Plutonium-242 (Abb. 4). Bei Leistungsreaktoren ist bei dem normalen Abbrandzustand die Beimischung an höheren Isotopen auf über 40 % gestiegen (Tab. 3). Damit befinden sich im Plutonium aus der Wiederaufarbeitung von Leichtwasserreaktor-Brennstoff (Reaktorplutonium) auch Isotope (Pu-240, Pu-242), die spontan, d.h. von selbst spalten und so für die wirkungsvolle Zündung einer Bombe eine gegenüber Waffenplutonium erheblich höhere Zusammenschußgeschwindigkeit erfordern. Selbst mit hohem Aufwand und großem Geschick sind die erforderlichen Werte kaum erreichbar. Je größer die Abweichung von den Sollwerten ist, umso kleiner wird die Wahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche Zündung und umso geringer die Wirksamkeit eines solchen nuklearen Sprengsatzes. Die Verwendung von Reaktorplutonium erhöht also die technischen Schwierigkeiten für den Bau einer Bombe beträchtlich.

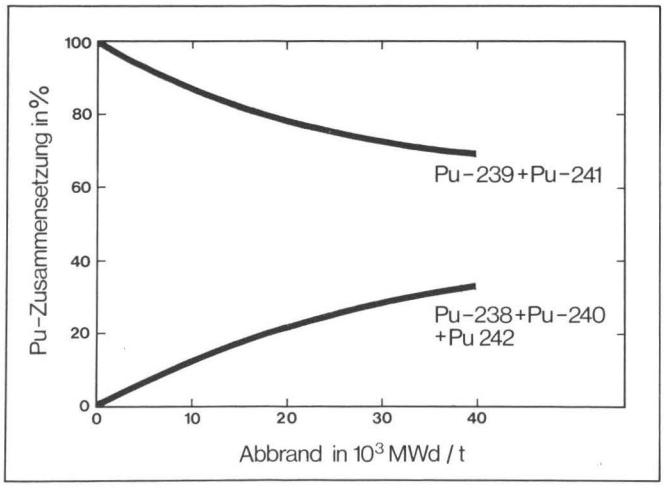


Abb. 4:
Abhängigkeit der Plutoniumzusammensetzung vom Abbrand der Brennelemente von Leichtwasserreaktoren

Reaktortyp	SWR	DWR
Ausgangsmaterial 1000 g „schwach" angereichertes Uran		
Anreicherung	2,6 % U-235	3,3 % U-235
Abbrand	27,5 MWd/kg	33 MWd/kg
Von 1000 g U verbleibt im abgebrannten Brennstoff:		
U-238	953,0 g	945,0 g
U-236	3,3 g	4,2 g
U-235	6,2 g	8,6 g
Pu-239	4,0 g	5,3 g
Pu-240	2,1 g	2,4 g
Pu-241	0,9 g	1,2 g
Pu-242	0,4 g	0,4 g
andere Aktiniden-Elemente	ca. 0,5 g	ca. 0,6 g
Spaltprodukte	29,5 g	32,5 g

Tab.3:
Brennstoffzusammensetzung für abgebrannte Brennelemente

Aufgrund der geschilderten vielfältigen Hindernisse kann festgestellt werden, daß der Bau einer funktionierenden Bastlerbombe aus Reaktorplutonium für Terroristen kaum durchführbar ist[8].

In den Abbildungen 5 und 6 sind die beiden Atombomben im Modell dargestellt, die im August 1945 über Japan explodierten. Die Dimensionen geben nur einen geringen Eindruck von den technischen Schwierigkeiten, die zu überwinden waren, obwohl für den Bau dieser Bomben das technische Potential und das technologische Know-how der Vereinigten Staaten von Amerika zur Verfügung standen.

Im Zusammenhang mit dem Export von kerntechnischen Anlagen, insbesondere in Länder der Dritten Welt, ist in der Öffent-

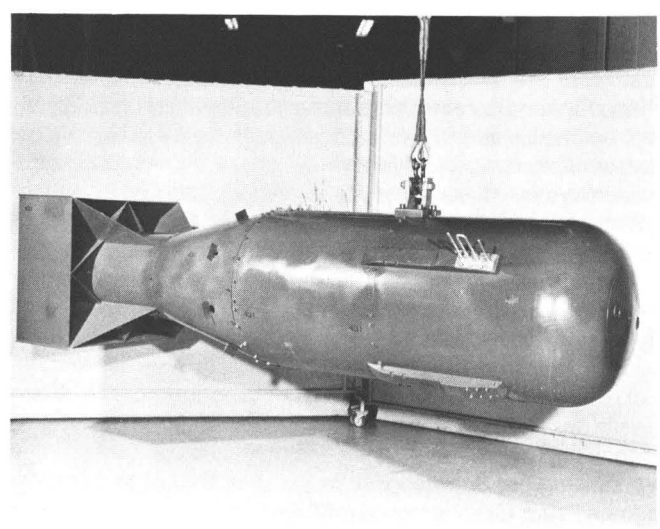


Abb. 5:
Modell der Atombombe „Little Boy", die 1945 über Hiroshima explodierte.
(Durchmesser ca. 70 cm, Länge ca. 300 cm, Gewicht ca. 4 t, Explosivkraft ca. 20 kt TNT)

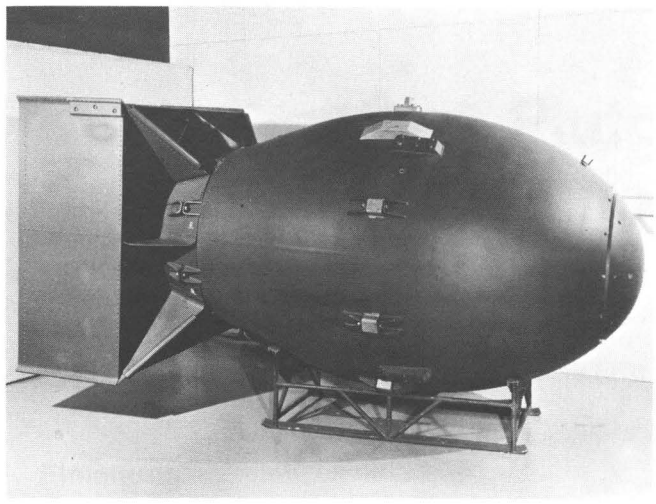


Abb. 6:
Modell der Atombombe „Fat Man", die 1945 über Nagasaki explodierte.
(Durchmesser ca. 150 cm, Länge ca. 300 cm, Gewicht ca. 4,5 t, Explosivkraft ca. 20 kt TNT)

lichkeit heftiger die Frage diskutiert worden, ob solche Staaten über die friedliche Nutzung der Kernenergie in den Besitz von Atomwaffen gelangen können.

Prinzipiell ist hierzu festzustellen, daß ein Staat, der in der Lage ist, sich die wissenschaftlich-technischen Kenntnisse auf dem Nukleargebiet zu verschaffen, der bereit ist, erhebliche Geldmittel aufzubringen und auszugeben, auch Erfolg beim Bau von Kernwaffen haben könnte. Es ist jedoch dann die Frage zu klären, ob die Weltöffentlichkeit und die Nuklearmächte dies ohne Intervention zulassen würden.

Die Internationale Konferenz zur Bewertung des Nuklearen Brennstoffkreislaufs (INFCE), die nach zweijähriger Zusammenarbeit von etwa 60 Staaten und internationalen Organisationen Anfang 1980 beendet wurde, untersuchte insbesondere die Frage, inwieweit die zur friedlichen Nutzung verwendeten kerntechnischen Anlagen und Materialien einer Weiterverbreitung von Kernwaffen, auch Proliferation genannt, dienen könnten[9]. INFCE kam zum Ergebnis, daß die Entscheidung eines Staates, sich Kernwaffen zu beschaffen, im wesentlichen durch politische Randbedingungen bestimmt wird. Die technischen Gegebenheiten der friedlichen Nutzung der Kernenergie können für eine derartige Entscheidung nur eine untergeordnete Rolle spielen. Dies bedeutet, daß z.B. die Brennstoffkreislauf-Alternativen, direkte Endlagerung abgebrannter Brennelemente (Wegwerfzyklus) oder Wiederaufarbeitung und Verwendung des Plutoniums im Schnellen Brüter (Brüterzyklus), vom Aspekt der Proliferation her als gleichwertig betrachtet werden müssen.

Weiterhin ergaben die INFCE-Diskussionen, daß ein Staat zwar ein zur friedlichen Nutzung ausgelegtes Nuklearprogramm zu Herstellung von waffenfähigem Kernmaterial mißbrauchen kann, dies jedoch von den verschiedenen Möglichkeiten weder die leichteste noch die einfachste ist. Der Weg zum Besitz von Kernwaffen über die friedliche Kernenergienutzung, die Investitionskosten in Milliardenhöhe erfordert, ist für einen Staat also ein Umweg. Zudem ist eine aus Reaktorplutonium von einem Staat mit großem Aufwand erstellte Nuklearwaffe unbestimmt in ihrer Wirkung und unsicher in ihrer Funktionstüchtigkeit. Das Ziel des Baues eines nuklearen Sprengsatzes könnte mit anderen Möglichkeiten, z.B. durch kleine, für die Produktion von Waffenplutonium modifizierte Reaktoren, einfacher erreicht werden. Die politische Entscheidung, über die kommerzielle Kernenergienutzung Kernwaffen zu entwikkeln, erfordert die höchsten Kosten, den umfangsreichsten technologischen Aufwand, die weitestgehende industrielle Kapazität und die längste Zeit[10]. In der erwähnten INFCE-Konferenz wurde eine Fülle von Maßnahmen zur Verhinderung der Proliferation, also der Kernwaffenverbreitung, beschrieben, die derzeit angewendet werden bzw. zukünftig insbesondere für große Wiederaufarbeitungs- und Anreicherungsanlagen sowie für Lager zum Einsatz kommen können[11].

Von zentraler Bedeutung für das derzeitge Nichtverbreitungssystem sind der Atomsperrvertrag, dem mittlerweile 114 Staaten beigetreten sind, und die Sicherungskontrollen für Kernmaterial in kerntechnischen Anlagen, die von der Internationalen Atomenergieorganisation (IAEO) in Wien durchgeführt werden. Das wesentliche Ziel der Sicherungskontrollen besteht darin, eine Abzweigung von Kernmaterial aus der friedlichen Nutzung rechtzeitig zu entdecken. Diese Sicherungskontrollen werden mit Hilfe von Kernmaterialbilanzen, Maßnahmen des sicheren Einschlusses und der automatischen Überwachung in den Anlagen sowie durch Inspektionen durch die IAEO durchgeführt.

Ebenso werden auch für alle kerntechnischen Anlagen und Kernmaterialien, die von der Bundesrepublik Deutschland z.B. nach Brasilien oder Argentinien exportiert werden, derartige Sicherungskontrollen der IAEO auf Grund von trilateralen Verträgen angewendet. Ein möglicher Mißbrauch würde dadurch mit höchster Wahrscheinlichkeit entdeckt werden. Für kerntechnische Anlagen mit großem Kernmaterialdurchsatz oder -inventar – Anreicherungs-, Wiederaufarbeitungs- oder Lageranlagen – wurden Modelle entwickelt, die auch eine Multinationalisierung solcher Anlagen einschließen. Neben der Erschwerung der Proliferation kann die Multinationalisierung auch der nuklearen Versorgungssicherheit dienen[12]. Im Stadium der Konkretisierung befindet sich mittlerweile ein internationales Lager für Überschuß-Plutonium, das die Ansammlung von größeren Plutoniummengen unter nationaler Obhut verringern helfen soll. Von den über 100 Nicht-Kernwaffenstaaten, die den Atomsperrvertrag unterzeichnet haben, besitzt etwa die Hälfte die technologische Basis, Kernwaffenmaterial zu produzieren. Bisher gibt es keine Anzeichen dafür, daß sie davon Gebrauch gemacht haben.

Die Tatsache, daß in vielen Landern der Welt, wie auch in unserem Land, erhebliche Mengen an höchstwirksamen Kernwaffen lagern, wird von der Bevölkerung hingenommen, ohne daß es dagegen größeren Widerstand oder gar Demonstrationen gibt. Verglichen damit sind die Mengen an Spaltstoffen, die im Zuge der friedlichen Nutzung der Kernenergie Verwendung finden, weniger bedeutend.

7. Zusammenfassung

Die bisher dargelegten Ausführungen über die Sicherung kerntechnischer Anlagen und spaltbarer Materialien sollen in einigen kurzen Thesen zusammengefaßt werden.

- Die Möglichkeiten der Einwirkung Dritter auf die verschiedenen Stationen des Brennstoffkreislaufs wurden eingehend analysiert. Dabei konnte festgestellt werden, daß in erster Linie der Reaktor selbst sowie die Wiederaufarbeitungsanlage, vor allem im Hinblick auf eine Entwendung von Plutonium, einer besonderen Sicherung bedürfen.
- Das Kernkraftwerk ist durch bauliche, technische und administrative Maßnahmen derart gegen Sabotage und Terroreinwirkungen geschützt, daß dadurch das Kernenergierisiko nicht signifikant erhöht wird. Auf nationaler Ebene sorgt ein integriertes System der Sicherung aufgrund atomrechtlicher und polizeirechtlicher Vorschriften und Maßnahmen für eine wirkungsvolle Prävention gegen die Einwirkung Dritter auf kerntechnischen Anlagen.

- Gegen die Entwendung von Plutonium sind ähnliche Maßnahmen vorgesehen, wie sie für ein Kernkraftwerk gegen unberechtigtes Eindringen realisiert sind.
- Das Bestehen von Katastrophenschutzplänen ist nicht auf Kernkraftwerke beschränkt sondern für große Industrieanlagen üblich. Sie treffen Vorsorge auch für den Fall höchst unwahrscheinlicher Ereignisse.
- Die Herstellung einer wirksamen und sicher zu zündenden Atombombe durch Terroristen aus den im Reaktor anfallenden Spaltstoffgemischen kann ausgeschlossen werden.
- Die Entscheidung für den Bau von Kernwaffen ist für einen Staat primär eine politische Entscheidung. Ob Staaten zum Bau einer Bombe in der Lage sind, hängt von ihrem Einsatz ab, den sie aufwenden wollen und vom Verhalten der Weltöffentlichkeit und der Kernwaffenstaaten. Der Weg zu Kernwaffen über den Mißbrauch eines kommerziellen Brennstoffkreislaufs ist extrem aufwendig und nicht leicht. Umfangreiche Maßnahmen zur Verhinderung der Proliferation, bei denen der Atomsperrvertrag und die Sicherungskontrollen der IAEO zentrale Bedeutung haben, würden darüber hinaus den Versuch eines heimlichen Mißbrauchs frühzeitig entdecken.

Die Fragen der Sabotage oder der Möglichkeit der Waffenproduktion mit Hilfe der Kernenergie können somit nicht entscheidende Gründe für die Ablehnung der friedlichen Nutzung der Kernenergie sein. Selbst ein vollständiger Verzicht der Bundesrepublik Deutschland auf die Nukleartechnologie würde zwar eine Energieversorgungsmöglichkeit aufgeben, das Problem der internationalen Proliferation jedoch in keiner Weise lösen.

Literatur

[1] Zünd, H.: Äußere Einwirkungen. SVA-Tagung Sicherheit von Kernkraftwerken. Nov.1974. Zürich: Schweizerische Vereinigung für Atomenergie (SVA) 1974

[2] (Nureg 75/014) U.S. Nuclear Regulatory Commission. October 1975, Reactor Safety Study, An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants. WASH-1400
Der Rasmussen-Bericht (WASH-1400), Übersetzung der Kurzfassung. IRS-S-13. Institut für Reaktorsicherheit der Technischen Überwachungsvereine e.V., Köln 1976

[3] Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke, Verlag TÜV Rheinland, 1980

[4] Leven, D.; Schier H.: Ziele und Methoden der Sicherheitskontrolle spaltbaren Materials. Atomwirtschaft, Bd. 24 (1979) S.25

[5] Taylor, T.B.: Nuclear-Safeguards. Annual Review of Nuclear Science, Vol.25, 1975

[6] Selden, R.W.: Reactor Plutonium and Nuclear Explosives. Lawrence Livermore Laboratory, 1976
De Volpi, A.: Proliferation, Plutonium and Policy. Pergamon Press, 1979

[7] Stoll, W.: Plutonium – Eigenschaften und Möglichkeiten. Kernforschungsanlage Jülich, Jül-Conf-24, 1981, dieses Heft S. 47

[8] Meyer, W., Loyalka, S.K. Nelson, W.E., William, R.W.: The Homemade Nuclear Bomb Syndrome. Nuclear Safety, Bd.18, Nr.4 (1977) S.427-438

[9] Deutscher Bundestag; Internationale Bewertung des Kernbrennstoffkreislaufs INFCE. Drucksache 8/3968, 1980

[10] Starr, C.: Nuclear power and weapons proliferation – the thin link. Nuclear News. Bd.20, Nr.6 (1977) S.54-57

[11] Patermann, C., Stein, G.: Die Behandlung der Proliferation und ihrer Gegenmaßnahmen in INFCE. Atomwirtschaft, Bd.25 (1980), S.449

[12] Dolzer, R., Hilf, M., Münch, E., Richter, B., Stein, G.: Institutionelle Aspekte des nuklearen Brennstoffkreislaufs. Kernforschungsanlage Jülich, Jül-Spez-69, 1980

Plutonium – Eigenschaften und Möglichkeiten

W. Stoll

ALKEM GmbH, Hanau

1. Einleitung

Von den Kritikern der Kernenergie wird oft behauptet, der Umgang mit Plutonium bringe sowohl in der Qualität wie auch in der Quantität ganz neue, mit den gewohnten ganz unvergleichliche Gefahren und Risiken mit sich. Um zu diesen Behauptungen Stellung zu nehmen, ist es notwendig, die radiotoxischen Eigenschaften des Plutoniums und die Möglichkeit seines Mißbrauchs – auch im Bereich der Kritikalität – zu analysieren und den wirksamen und erprobten Methoden zur Sicherung sowohl in der Verarbeitung als auch bei Zwischenfällen gegenüber zu stellen. Die weitgehend unfallfreie Hantierung von Plutonium in der Vergangenheit sollte Anlaß genug sein, sich auch in der Öffentlichkeit nüchtern mit Potential und Gefahren auseinanderzusetzen und weltweit gezielt die jeweils zugängliche Plutoniummenge zu minimieren, indem man es in Reaktoren zurückführt. Andererseits zwingt der geringe Anteil von spaltbarem U-235 im natürlichen Uran zur Nutzung des Uran-238 über das daraus erbrütete Plutonium. Diese Situation ist vor allem für Länder von Bedeutung, die nicht besonders reich an Uranvorkommen sind.

Im Gegensatz dazu haben sich in den letzten Jahren in Ländern, wo dies für die nationale Energiesituation nicht schädlich ist, Denkweisen zum Brennstoffkreislauf herausgebildet, die Plutonium als Option für sich und damit bewußt beispielgebend für andere ausschließen wollen. Grundlage für diese Denkweisen waren zum Beispiel die Fox-Studie[1] in Australien, der Flowers-Report[2] in England, und die Ford-Foundation-Studie[3] als Spiegelbild der Grundzüge der kanadischen, US-amerikanischen und australischen Politik. In INFCE[1]) haben die großen westlichen Uranlieferländer, voran die USA, diese Position zu verteidigen versucht. Dies gelang nur insoweit, als man für die derzeitige Form der Rückführung von Plutonium in die Leichtwasserreaktoren, in denen es erzeugt wurde (self generated recycle), ein ungünstiges Verhältnis von wirtschaftlichem Nutzen zur Proliferationswirkung behauptete, während die Berechtigung, Brennstoff aufzuarbeiten und den Brüter zu nutzen, mindestens für fortgeschrittene Nuklearprogramme uranarmer Länder akzeptiert wurde.

2. Die Rolle des Plutoniums im Kernbrennstoffkreislauf

Über die Menge des zu vertretbaren Preisen und unter erträglicher Umweltbelastung aus der Erdkruste gewinnbaren natürlichen Urans gibt es widersprüchliche Aussagen. Gleichgültig, ob die Uranvorräte noch 30 oder vielleicht 300 Jahre ausreichen, um den Bedarf der Kernenergie zu decken, bleibt es doch recht unbefriedigend, wenn man berücksichtigt, daß aus einem Gramm U-235 eine Energie von 23000 kWh gewonnen werden kann, daß aber im Leichtwasserreaktor nur jedes 200. Uranatom Energie liefert und dieses wiederum bergmännisch aus dem tausendfachen Erzgewicht gewonnen wird.

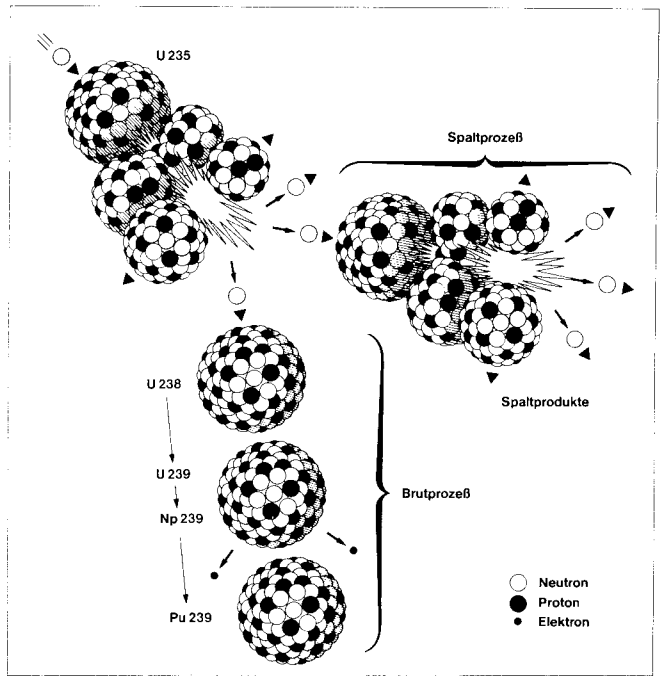


Abb. 1:
Der Spalt-Brut-Prozeß

Schon im Leichtwasserreaktor (LWR) wird aber bekanntlich die Energiebilanz dadurch wesentlich verbessert, daß das (durch Neutroneneinfang und nachfolgendem zweimaligen β-Zerfall) aus U-238 gebildete Pu-239 bei seiner nachfolgenden Spaltung etwa 1/3 der insgesamt aus dem Brennstoff gewinnbaren Wärmeenergie liefert. Beim Schwerwasserreaktor (HWR) sind dies gegen Ende des Abbrandes sogar über 50 %[4]. Im Brutreaktor (SBR) schließlich erlaubt der wiederholte Einsatz des Uran-238 im schnellen Neutronenfluß einen vollständigen Umsatz, so daß selbst unter Abzug der im Brennstoffkreislauf erwarteten Materialverluste das Uran etwa 70 mal mehr Energie liefert, als seinem ursprünglichen U-235-Gehalt entspricht (Abbildung 1).

In allen Fällen kann man allerdings die Energie, die das im abgebrannten Brennstoff enthaltene Plutonium liefert, nur nach dessen Abtrennung von den Spaltprodukten, d.h. nach der Wiederaufarbeitung, sinnvoll gewinnen. Daraus ergibt sich, daß eine rationelle Nutzung der Kernenergie zwangsweise an den Umgang mit Plutonium gekoppelt ist.

[1]) INFCE, International Nuclear Fuel Cycle Evaluation (Internationale Konferenz zur Bewertung des nuklearen Brennstoffkreislaufs, 1977-1980)

3. Der offene Brennstoffkreislauf

Der Begriff „offener Brennstoffkreislauf" trägt den Widerspruch in sich. Er beleuchtet daher nicht ohne Zusammenhang auch die gegenwärtige Kontroverse um die Kernenergie.

In Abbildung 2 wurde versucht, orientiert an der Zeitskala der jeweils etablierten Technologie, die bestimmenden Plutoniumströme aufzuzeigen. Danach eignet sich der Gas-Graphitreaktor mit Brennelementen aus Uranmetall schon wegen seiner Ausrichtung auf die Gewinnung von Plutonium als Waffenmaterial nicht zur wirtschaftlichen Schließung des Kreislaufes.

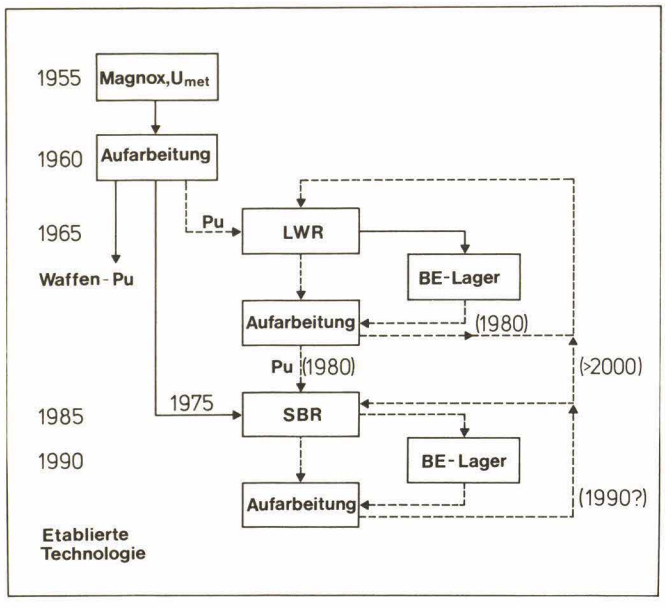


Abb. 2:
Zeitliche Entwicklung verschiedener Arten der Plutonium-Erzeugung und -Verwendung

Daneben entstand in der westlichen Welt – in den USA, der Bundesrepublik Deutschland und Japan – eine in sich geschlossene friedliche Leichtwasserreaktor-Technologie, deren Kreislauf im Prinzip geschlossen werden kann. Die Kernenergieprogramme Großbritanniens und Frankreichs sahen dagegen ihr Entwicklungsziel im direkten Übergang vom Gas-Graphitreaktor zum Schnellen Brüter (SBR). Die spätere Hinwendung auch zum LWR ändert jedoch letztendlich nichts am Konzept zum Einsatz des Schnellen Brüters.

Dies ist dort mindestens bis in die Demonstrationsphase des Brüters deshalb möglich, weil der Plutoniumüberschuß aus den Magnox-Reaktoren in funktionierenden Aufarbeitungsanlagen abgetrennt und zur Versorgung von einigen Brutreaktoren verwendet werden kann, ohne das Pu aus deren abgebrannten Elementen sofort rückführen zu müssen. Die Schließung des LWR-Kreislaufes dagegen ist nicht nur durch die technischen Schwierigkeiten bei der Aufarbeitung in den bestehenden Anlagen, sondern auch durch den Widerstand gegen die Plutoniumhantierung in den USA im Gefolge der GESMO-Studie[5] und der Politik von Präsident Carter ernstlich behindert.

4. Die gegenwärtigen und zukünftigten Plutoniummengen

Aus den bekanntgegebenen Reaktorleistungen der westlichen Welt[6] ergibt sich, daß bis Anfang 1980 etwa 100 t „friedliches Plutonium" in abgebrannten Brennelementen vorgelegen haben muß. Davon stammen 35 t aus dem Uranmetall-Brennstoff der Gas-Graphitreaktoren, von denen 90 % in England und Frankreich in Betrieb sind. Da sich diese Elemente nicht lange lagern lassen und die bestehenden Aufarbeitungsanlagen diesen relativ niedrig abgebrannten Brennstoff schon seit Jahren ohne wesentliche Probleme aufarbeiten, müßte diese Menge größtenteils verfügbar sein. Von den rund 35 t Pu dagegen, die

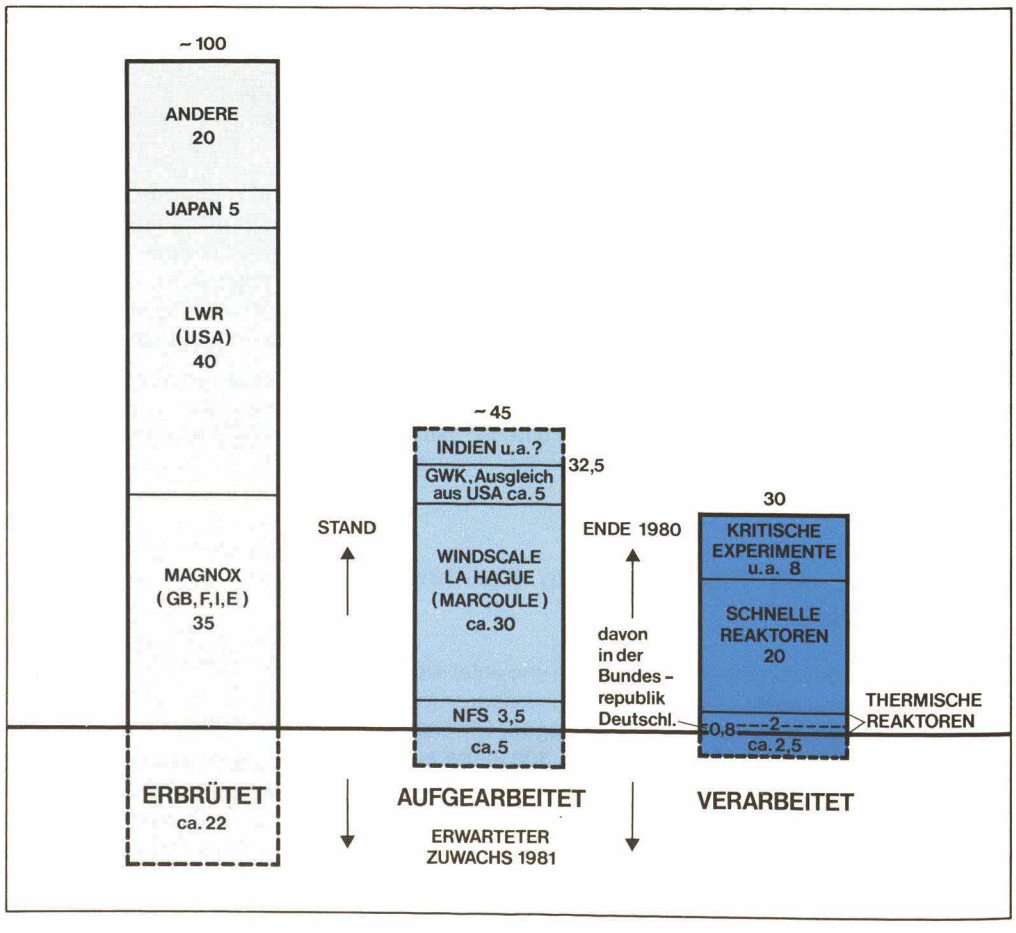


Abb. 3:
Gegenwärtiger Stand der Erzeugung, der Isolierung und des Verbrauchs an spaltbaren Plutonium-Isotopen (Zahlenangaben in t Pu-fiss)

im LWR-Brennstoff kommerzieller Reaktoren der USA enthalten sind, wurden durch Aufarbeitung weniger als 4 t verfügbar, da die einzige kommerzielle Aufarbeitungsanlage der Nuclear Fuel Services in West Valley mit einer Kapazität von 300 t pro Jahr nur wenige Jahre in Betrieb war. Andererseits hatte jedoch die ehemalige USAEC bis 1970 alle Brennelemente aus zivilen Reaktoren in ihren Anlagen aus dem Manhatten-Programm aufgearbeitet und aus ihren Beständen Experimente, kritische Anordnungen und sonstige Pu-Verbraucher in USA – und im Rahmen von umfassenden Programmen auch in Europa und Japan – mit Pu versorgt, so daß die Grenze zwischen dem zivilen und militärischen Bereich dort nicht scharf zu ziehen ist (Abbildung 3).

Hierzu kommt eine Menge von etwa 5 t in Japan und 15-20 t, die den veröffentlichten Reaktorleistungen des Ostblocks zuzuordnen ist, und eine nicht bekannte, weltweit mit 300 t abgeschätzte Menge in den verschiedenen Waffenarsenalen, dazu noch 5-9 t, die aus Waffenversuchen mehr oder weniger gleichmäßig über die Erdoberfläche (mit 1 bis 8×10^{-14} Ci/g in der obersten Bodenschicht) verteilt sind.

Aus den derzeit in Betrieb befindlichen Kernkraftwerken mit einer Kapazität von 120 GW_e[1]) (davon 9 GW_e Gas-Graphit-Reaktoren) entstehen stündlich etwas über 2,5 kg spaltbares Plutonium[2]) (Pu-fiss), was einem Zuwachs von 22 t Pu-fiss/Jahr entspricht.

Nuklid	kg	Nuklid	kg
^{237}Np	1700	^{242}Pu	1500
^{238}Pu	800	^{241}Am	200
^{239}Pu	18000	^{243}Am	380
^{240}Pu	8000	^{244}Cm	120
^{241}Pu	4000		

angenommener mittlerer Abbrand: 36000 MWd/t,
Lagerzeit 3 Jahre

Tab. 1:
Jährlich weltweit in den laufenden Kernkraftwerken entstehende Transurane (Stand 1980)

Tabelle 1 zeigt, daß daneben jährlich weltweit in den laufenden Kernkraftwerken auch noch eine Reihe anderer zum Teil technologisch verwertbarer Transurane entstehen.

Wenn 1990 alle derzeit in Bau und Planung befindlichen Kernkraftwerke (~ 360 GW_e) in Betrieb sein werden und dann noch alle Graphit- und D_2O-moderierten Reaktoren laufen, steigt die Pu-Brutrate der westlichen Welt auf 12-15 kg Pu-fiss pro Stunde oder 100-130 t Pu-fiss pro Jahr an.

Sieht man vom Waffeneinsatz ab, so wurde spaltbares Plutonium bisher im wesentlichen zu drei Zwecken verwendet:

1. Kritische Anordnungen und Testbestrahlungen (8 t)
2. Demonstration und Rückführung in thermische Reaktoren (2 t)
3. Schnellbrüterbrennstoff (20 t).

Der Anteil der verschiedenen Plutonium-Isotope am erzeugten Plutonium ist unterschiedlich. Charakterisiert man das Plutonium durch den Gehalt am Pu-239, so wurden für die genannten drei Verwendungszwecke aus Reaktoren der USA als Nebenprodukt der Waffenfertigung bis 1970 etwa 5 t mit 90 % Pu-239 bereitgestellt, aus Gas-Graphitreaktoren Englands und Frankreichs (Magnox-Reaktoren) ca. 18 t mit 85 % Pu-239 und aus LWR der USA und Europas weniger als 7 t mit 65-70 % Pu-fiss.

Sowohl im langfristigen Gefährdungspotential als auch in der wirtschaftlichen Bedeutung sind die höheren Isotope Pu-239 nachgeordnet, so daß es genügt, zunächst vor allem dieses zu behandeln.

5. Der geschlossene Brennstoffkreislauf

Der geschlossene Brennstoffkreislauf definiert jenen Zustand, bei dem im Idealfall außer Wärme bzw. elektrischer Energie und Spaltprodukten nichts aus dem Kreislauf abgegeben wird (Abbildung 4).

Bei den Spaltprodukten und den hierin verbleibenden Pu-Resten aus der Wiederaufarbeitung hat man sich darauf einzurichten, daß ihre Aktivität erst nach etwa 900 Jahren umschlossener Lagerung auf einen Wert abgeklungen ist, der ein solches Lager etwa mit der Halde eines Uranbergwerks im Strahlenpegel vergleichbar und damit wieder für unsere gewohnte Umwelt akzeptabel macht[7].

Mit dem Leichtwasserreaktor (LWR) ist ein solcher geschlossener Brennstoffkreislauf darstellbar, indem das von den Spaltprodukten abgetrennte Uran mit einer Restanreicherung von 0,6 % (Siedewasserreaktor, SWR) bis 0,9 % (Druckwasserreaktor, DWR) wieder der Anreicherung zugeführt und das entstandene Plutonium mit Natur-Uran verdünnt und in Form neuer Brennelemente zusammen mit Brennelementen aus angereichertem Uran (etwa im Mengenverhältnis 1:4) wieder in den Reaktor eingesetzt wird[4], wo das Plutonium mit entsprechendem Wärmegewinn gespalten wird. Je 1000 MW_e Reaktorleistung müßte man im Gleichgewicht jährlich etwa 200 kg Pu im Brennstoffkreislauf bewegen, wenn man bei optimaler Nutzung gerade das Gesamtinventar konstant halten wollte[8]. Dabei ist bemerkenswert, daß es bei wiederholter Rückführung unter Verminderung des spaltbaren Anteils bis auf etwa 57 % im Gleichgewicht gelingt, das Plutonium – auch das nicht spaltbare – vollständig abzubauen.

Es erscheint jedoch wenig wahrscheinlich, daß man diesen Weg wählen wird, da das in den LWR entstandene Pu mindestens teilweise als Erstcoreladung in Schnelle Brüter eingesetzt wird, in deren Neutronenfluß die langlebigen höheren Transurane rascher abgebaut werden.

Der geschlossene Brennstoffkreislauf des Brutreaktors hat nicht nur diesen Vorteil, sondern er liefert auch im Brutmantel ein Plutonium mit einem geringeren Anteil an höheren Pu-Isotopen, das im Austausch vorteilhaft im LWR einzusetzen ist. Von der industriellen Realisierung des Schnellbrüterkreislaufs trennen uns allerdings noch mindestens 10 Jahre. Während es bisher nur Aufarbeitungskapazitäten im Technikumsmaßstab gibt, die die hohen Plutoniumkonzentrationen und Abbrände hantieren können[9], ist für 1988 in Frankreich die erste industrielle Anlage vorgesehen.

Es kann daher bereits als ausreichend demonstriert gelten, daß der erprobte Purex-Prozeß der bestehenden Aufarbeitungsanlagen auch für Brüterbrennstoff geeignet ist. Im Unterschied zum LWR (200 kg) laufen pro installiertem GW_e etwa 1400 kg Pu pro Jahr im Brüter-Brennstoffkreislauf um. Das bedeutet aber wegen der kürzeren Kühlzeiten der Brennelemente eine nur etwa dreifache Vergrößerung des gesamten Plutoniuminventars und keine wesentliche Änderung im Proliferationsrisiko.

(Im Prinzip kann auch der Thorium-Hochtemperaturreaktor mit spaltbaren Pu-Isotopen statt mit U-235 betrieben werden. Auch ein gekoppelter Zyklus für einen Schwerwasser-Reaktor mit dem Austausch von Spaltstoffen zwischen ei-

[1]) 1 GW (Gigawatt) = 1 Mrd Watt = 1000 MW = 1 Mio kW
[2]) Spaltbar sind die Pu-Isotope Pu-239, Pu-241; nicht spaltbar dagegen Pu-238, Pu-240 (s. Tabelle 1)

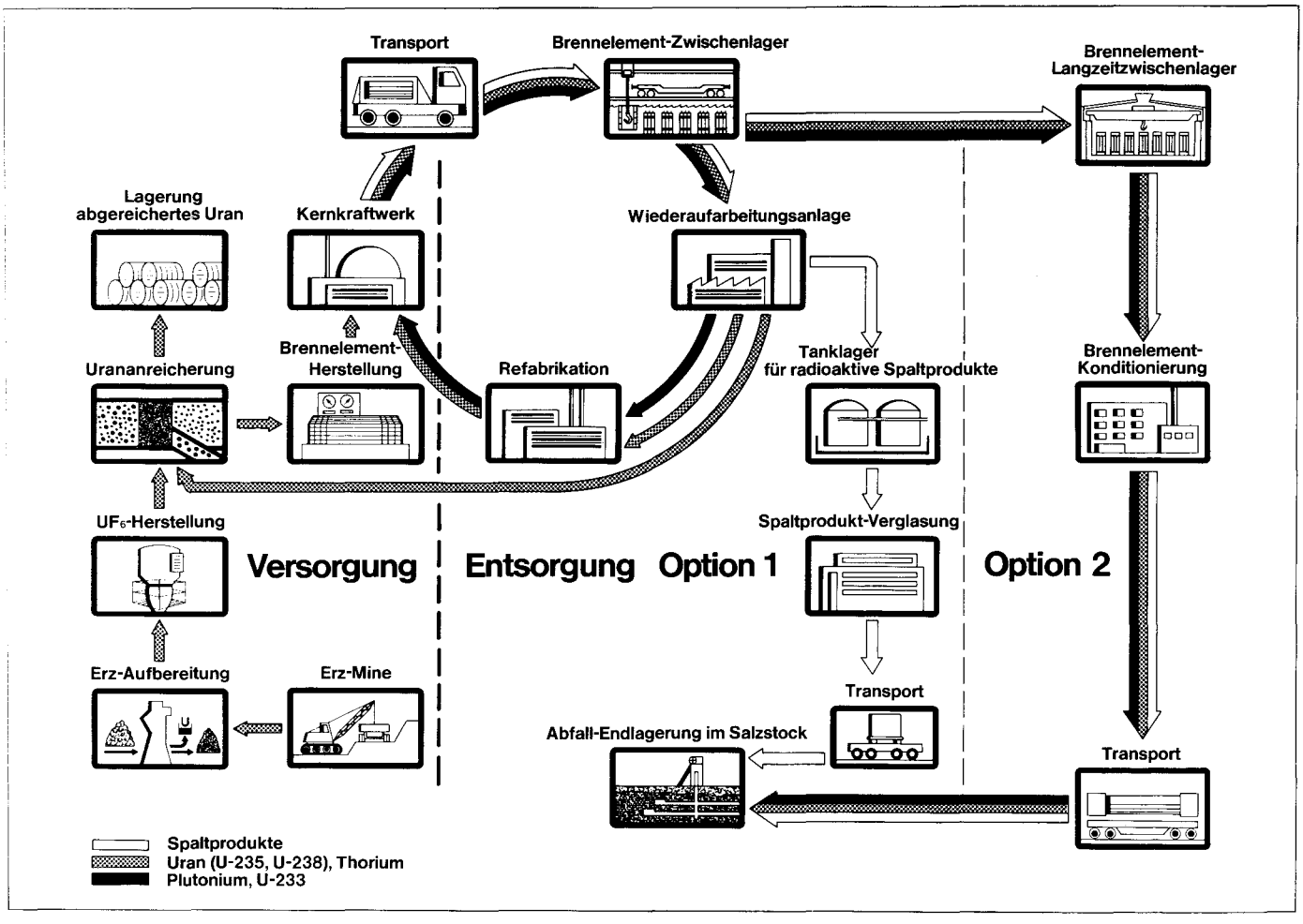


Abb. 4: Der geschlossene Brennstoffkreislauf

nem Th-Pu-Core und einem U-235-U-233-Core mit einer Brutrate nahe 1 ist schon konzipiert worden. Da jedoch zur Schließung eines zugehörigen Brennstoffkreislaufes bisher weder eine entsprechende Zahl von Reaktoren noch ein technisch realisierbares Aufarbeitungskonzept vorliegt, sei hier auf Einzelheiten verzichtet.)

Bei der schrittweisen Schließung des Brennstoffkreislaufes standen bisher wirtschaftliche Überlegungen zur optimalen Brennstoffnutzung und technologische Probleme als Folge der Erhöhung des Abbrandes der Brennelemente und der Kapazitätsvergrößerung der Aufarbeitungsanlagen im Vordergrund (Beitrag von M. Laser in diesem Heft). Für die Zukunft wäre demgegenüber eine stärkere Ausrichtung auf sinnvolle ökologische Forderungen denkbar.

Danach müßte man die Gesamtmenge des Plutoniums mindestens in den Formen, in denen es zugänglich ist, minimieren und dafür sorgen, daß das Ökosystem, in dem wir leben, nicht dauerhaft durch Ablagerung von Plutonium in jeder Form belastet wird. Ergibt doch schon eine einfache Betrachtung der Halbwertszeit von 24000 Jahren, daß Pu-239 infolge seiner radiotoxischen Eigenschaft etwa die hundertfache Zeit unter Verschluß gehalten werden muß, wie alle übrigen Spaltprodukte und Radionuklide der Kernspaltung zusammen. Um dieses Ziel zu erreichen, bemüht man sich einerseits, die Konzentration von Restplutonium im hochaktiven Abfall der Aufarbeitung und im Abfall der Brennstoffverarbeitung zu minimieren, andererseits strebt man die Rückführung möglichst allen verfügbar werdenden Plutoniums, soweit es nicht für die Erstcoreladungen der Schnellbrüterreaktoren gebraucht wird, in thermische Reaktoren an.

Bei einem zügigen Einsatz der für Aufarbeitung und Plutoniumverarbeitung verfügbaren Technologien wäre es möglich, schon zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme aller derzeit geplanten Kernkraftwerke den weltweiten Jahres-Plutoniumeinsatz einschließlich der bis dahin bestehenden Brutreaktoren auf etwa 100 t zu begrenzen, was deutlich weniger als das augenblicklich in Nuklearwaffen festgelegte Inventar wäre. Von dieser Menge würde wahrscheinlich nur 1/10 in allen Anlagen, die weltweit existieren, in einer zugänglichen – d.h. weder mit Spaltprodukten noch mit dem Mehrfachen an Uran verdünnten – und daher prinzipiell für den Mißbrauch geeigneten Form vorliegen.

Demgegenüber ist jedoch zu erwarten, daß die mehrjährigen Verzögerungen, die die verlängerten Genehmigungsprozeduren und damit verspäteten Termine für den Anlauf von Aufarbeitung und Brennelemententfertigung für Brutreaktoren verursacht haben, eine weltweite Anhäufung von mindestens 1000 t Plutonium in allen Formen – vor allem in Brennelementen – in der zweiten Hälfte der 80er Jahre zur Folge haben werden. Deren Abbau bis zu einer tragbaren Gleichgewichtsmenge wird vor dem Jahr 2000 nicht möglich sein.

6. Sicherung von Plutonium

Obwohl heute feststeht, daß Plutonium wie andere Schwermetalle zum Zeitpunkt der Verfestigung der Erdkruste vorhanden war, ist es seither bis auf kleinste Reste zerfallen. Der Mensch hat daher vermeintlich der Familie der natürlich vorkommenden Elemente das Plutonium als künstliches Element erst 1942 hinzugefügt. Die in ihm verwirklichte Energiekonzentration auf das Zweimillionenfache gegenüber Benzin oder Trinitrotoluol

hat er zu allererst dazu benutzt, in Nagasaki über 70000 Menschen in Jenseits zu befördern. Bei aller historisch am Feuer wie am Schießpulver beweisbaren Anpassungsfähigkeit des Menschen an neue Kräfte und Sachverhalte in seinem Umfeld sollte es nicht verwundern, wenn diese negative Sensation in dieser Welt noch eine Weile fortwirkt. Auf Dauer hat sich der Mensch in seiner Geschichte noch von keiner ihm zugänglichen Energiequelle – ohne Rücksicht auf die in ihr steckenden Gefahren – wieder getrennt.

Die von Plutonium ausgehenden Gefahren lassen sich auf drei Fakten zurückführen:

- als α-Strahler ist es radiotoxisch,
- als spaltbarer Stoff genügen in geeigneter Form und Anordnung schon wenige kg für eine kritische Masse, die Strahlen- und Explosionsschäden hervorrufen kann,
- als Sensation weit über seine wirklichen Gefahren medienverstärkt eignet es sich als Reizwort für Drohung und Erpressung.

6.1 Schutz vor Plutonium als Radiotoxin

Alle wichtigen Plutoniumisotope (Überblick in Tabelle 2) sind α-Strahler, deren α-Energie gut unterscheidbar über der Energie und Halbwertzeit häufiger natürlicher α-Strahler unserer Umgebung (Radon, Thoron und deren Folgeprodukte, die unsere Atemluft aus Mauerwerk und Boden dauernd nachgeliefert erhält) liegt. Plutonium steht als Radiotoxin zwischen Radium und Ionium (Th-230), wobei es am ehesten mit Radium-226 vergleichbar ist. Bei beiden Nukliden fällt die äußere Strahlung nicht ins Gewicht. Die Reichweite der α-Strahlung von 0,03 mm im Gewebe kann sich nur nach Inkorporation[3]) oral[4]), über Wunden oder durch Einatmung auswirken. Vergleicht man die Schädigung durch injizierte lösliche Salze, so ist Plutonium – bezogen auf die abgegebene Energie – etwa 5-10 mal giftiger als Radium, da es sich noch etwas spezifischer als dieses in den blutbildenden Zentren des Knochenmarks ansammelt, wo es durch Strahlenwirkung auf empfindliche Zellen Krebs auslösen kann. Vergleicht man dagegen die orale Giftigkeit, so ist lösliches Plutonium um einige Größenordnungen weniger giftig als Radium[10], da es sich im Verdauungstrakt bei allen dort vorkommenden unterschiedlichen Säuregehalten im Unterschied zu Radium in unlösliches $Pu(OH)_4$ umwandelt. Beim Vergleich der oralen Inkorporation von unlöslichen Verbindungen tritt bei beiden Radionukliden wegen der sehr geringen Aufnahme in das Blut (weniger als der hunderttausendste Teil) erst bei Gramm-Mengen eine gefährliche Schädigung auf, wobei Ra etwa dreimal giftiger ist als Pu.

Beide genannten Inkorporationswege sind allenfalls für einen kleinen Kreis der beruflich mit Plutonium umgehenden Personen bei Unfällen von Bedeutung. Radiotoxische Wirkungen auf andere Organe wie Leber und Gonaden treten insgesamt ebenfalls weit in den Hintergrund.

Der einzige Inkorporationsweg, gegen den man sich wirksam schützen muß, ist der, über den wir alle laufend natürliche α-Strahler aus den Zerfallsreihen von Uran und Thorium in unsere Lungen aufnehmen (ca. ein Sechstel unserer natürlichen Strahlenbelastung) und über den wir bereits im Mittel 10^{-12} Ci Pu-239 aus dem Fall-out der Atombombentests in unsere Lunge gebracht haben: Die Einatmung von feinem, unlöslichem PuO_2-Staub.

Das Diagramm der Abbildung 5 zeigt in einer nach Literaturwerten [10-13] vereinfachten Darstellung, welche Folgen mit einer hohen Wahrscheinlichkeit nach der Ansicht verschiedener Fachleute eine Inhalation von lugengängigem PuO_2-Staub (0,5-5 µm Partikeldurchmesser) für die Betroffenen hat. Danach kann eine Verkürzung der mittleren Lebenserwartung durch Knochenkrebs, Lungenkrebs oder – bei sehr großen Dosen – durch einen der Lungenentzündung ähnlichen Krankheitsverlauf (Fibrose) erfolgen. Die starke Streuung der Werte erklärt sich aus den verschiedenen Annahmen bei Umrechnung aus dem Tierversuch.

Isotop	Zerfallsart	Halbwertzeit [Jahre]	spezifische Aktivität [Ci/g][1])
Pu-238	α Spontanspaltung	86,4 49 Mrd.	17,45
Pu-239	α Spontanspaltung	24390 5550000 Mrd.	0,0622
Pu-240	α Spontanspaltung	6850 145 Mrd.	0,23
Pu-241	β α	13,2	111,5
Pu-242	α Spontanspaltung	370000 71 Mrd.	0,04

[1]) Ci = Curie, Maßeinheit für die Radioaktivität.
Ein Stoff weist die Aktivität von 1 Curie auf, wenn in ihm je Sekunde 37 Milliarden Zerfälle (Kernumwandlungen) stattfinden. 1 Gramm Radium besitzt die Aktivität von 1 Curie.

Untereinheiten:
1 Millicurie (mCi) = 10^{-3} (ein Tausendstel) Curie
1 Mikrocurie (µCi) = 10^{-6} (ein Millionstel) Curie
1 Nanocurie (nCi) = 10^{-9} (ein Milliardstel) Curie
1 Picocurie (pCi) = 10^{-12} (ein Billionstel) Curie

Tab. 2:
Einige Daten der häufigsten Plutoniumisotope

Es ist meßtechnisch heute möglich, 10^{-15} Ci Plutonium (das sind bei LWR-Plutonium weniger als 10^{-15} g) in 1 g Materie zweifelsfrei nachzuweisen. Das 10millionenfache dessen ist weltweit[14] heute als unschädliche Lungendosis des Menschen anerkannt und erst das 10 milliardenfache dieser Menge löst mit einiger Sicherheit in der menschlichen Lunge Krebs aus, wenn es sich dort 10 bis 30 Jahre aufgehalten hat. Es gibt demgegenüber keine einzige carcinogene Chemikalie, bei der der Abstand zwischen der meßbaren Konzentration und der Wirkung auch nur annähernd so groß ist.

Aus der Darstellung ist weiter zu entnehmen, daß die zulässige Lungendosis wahrscheinlich mindestens hundertmal kleiner ist als jede möglicherweise lebensverkürzende Dosis und daß z.B. selbst 5 Minuten Aufenthalt in der stärksten Staubatmosphäre, die sich bei PuO_2 über max. 1 Stunde aufrecht erhalten läßt (3 mg/m³) und bei der eine im Mittel letale Dosis (260 µg) aufgenommen wird[9], noch ein Weiterleben für 2-4 Jahre mit allen Chancen lebensverlängernder medizinischer Hilfen, wie z.B. Lungenwäsche und Komplexierung des löslichen Pu-Anteils mit EDTA, offen läßt, während eine gleiche Dosis Nervengas in wenigen Minuten tötet[15].

Wieweit im Einzelfall Plutonium tatsächlich freigesetzt wird und dann zu einer gesundheitlichen Schädigung führen kann, hängt vom jeweiligen Zusammenwirken von etwa 30 veränderlichen und nur teilweise vorherberechenbaren Einflußgrößen ab (Abbildung 6). Es verwundert daher nicht, wenn selbst ernstzunehmende Darstellungen von geradezu apokalyptischen Dimensionen bis zu harmlosen Szenarios in der Litera-

[3]) Aufnahme in den Körper
[4]) durch den Mund

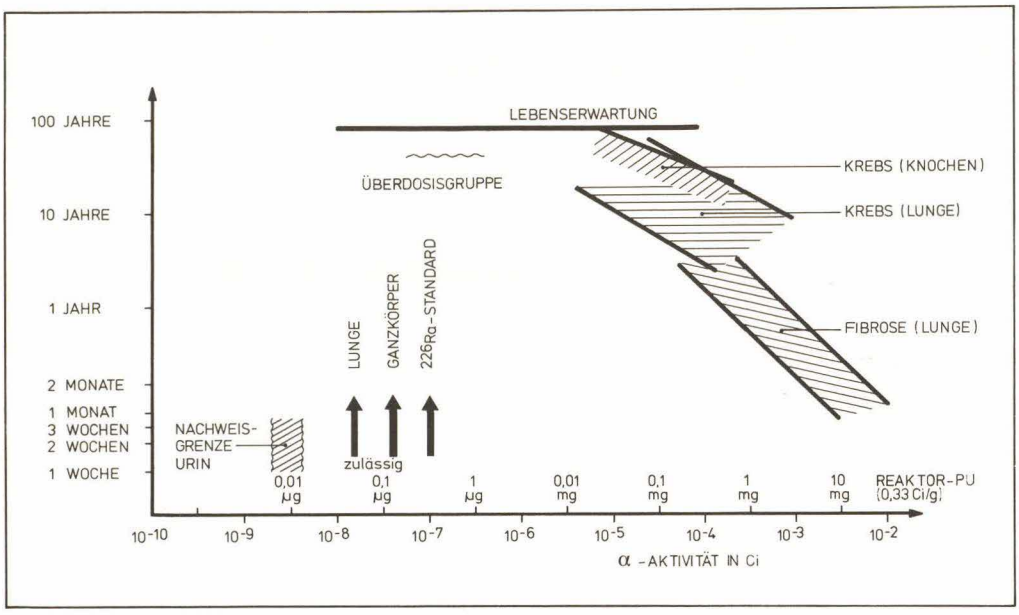


Abb. 5: Abhängigkeit der Überlebenszeit von der Menge an inhaliertem Plutonium (PuO_3-Staub)

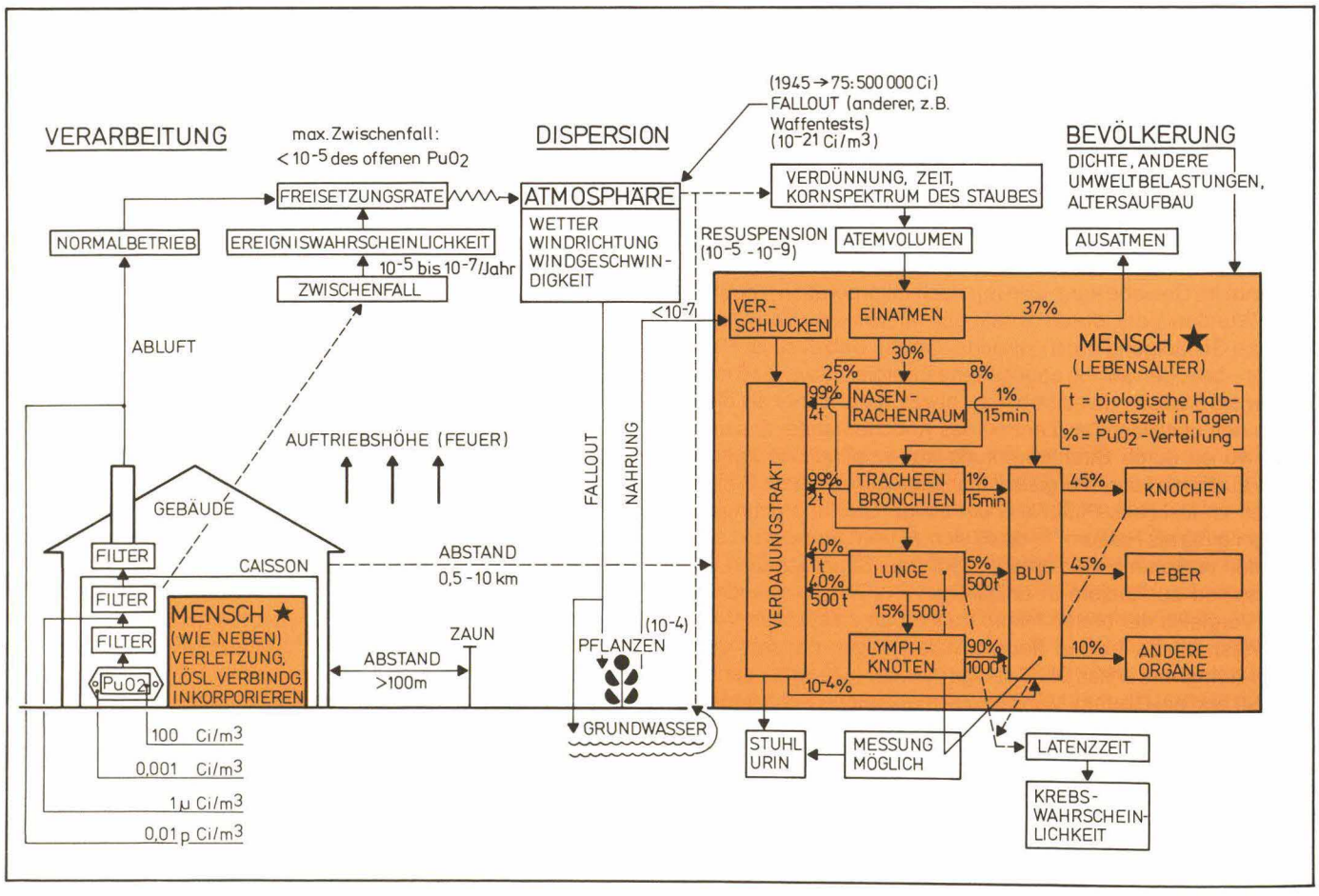
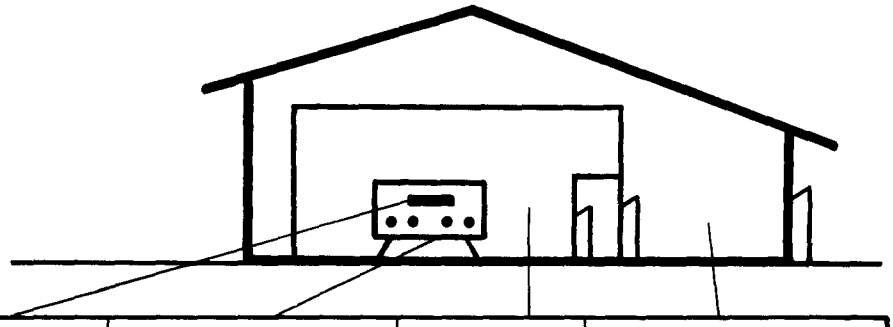


Abb. 6: Einflußgrößen zur Plutonium-Dispersion (1 µCi = 0,000 001 Ci = 10^{-6} Ci; 1 pCi = 0,000 001 µCi = 10^{-12} Ci)

tur zu finden sind. Ungünstige Annahmen – geringe Windgeschwindigkeiten, bodennahe Freisetzung, Inhalation ohne Vorwarnung (nachts) bei städtischer Bevölkerungsdichte (Beispiel New York: 10 000 Menschen/km²) – führen statistisch zu einem Krebstod (nach 15-45 Jahren Latenzzeit) pro 1,3 g freigesetztem Plutoniumdioxidstaub, wobei Unfälle zugrundegelegt werden, bei denen 100 g Pu freigesetzt werden. Die Erfahrungen von tatsächlich aufgetretenen Dispersionen beim Aufschlagbrand von mit Plutoniumbomben beladenen Flugzeugen[16] (Palomares, 16. Januar 1966; Thule, 21. Januar 1968) zeigten nur relativ kleine Flächen (2,26 bzw. 0,1 km²), die mit mehr als 30 µCi/m² verseucht waren, während meßbare Inkorporationen an Personen in beiden Fällen nicht auftraten.

Werden wie in Tabelle 3 beschrieben die konzentrischen Barrieren systematisch um das Plutonium aufgebaut und intakt gehalten, so bleibt die Freisetzung von Pu, die dann nur mit der mehrfach gefilterten Luft erfolgt, im Bereich von 10^{-14} Ci/m³ und darunter. Da die allgegenwärtige Umweltbelastung aus den Kernwaffentests schon 10^{-14} Ci/g oberflächennaher Bodenschicht beträgt, dauert es wahrscheinlich Jahrzehnte, bis dieser Wert in der Nähe einer Verarbeitungsanlage sich meß-



Austritt von Pu	aus Behälter	aus Handschuhkasten	aus Caisson	aus Gebäude
im Normalfall	bei Hantierung und Verarbeitung	mit Abluft (immer); bei defektem Handschuh oder Ausschleussack	keiner	keiner ($< 10^{-14}$ g/m^3) über Abluft)
Häufigkeit/Jahr	immer in der Arbeitszeit	400–600	< 1/10	
Pu-Form	Pu-Oxid, PuU-Mischoxid, Tabletten, Pu-Lösungen	Pu-Oxid, PuU-Mischoxid, Lösungen (selten)	PuO_2	
Pu-Konzentration	100 % PuO_2-Pulver bis 0,001 % Pu im Abfall	innen ca. 1mg/m^3, außen 10^{-9} bis 10^{-4} g/100 cm^2 bei Kontamination	$< 10^{-12}$g/m^3	
Gegenmaßnahmen	Begrenzung der offenen Umlaufmenge, Sauberkeit am Arbeitsplatz	Abluftfilter (Abscheidegrad 99,98 %), Prüfung der Handschuhe, Prüfung der Hände, Schulung der Mannschaft, Handschuh-freundliches Design	Routinefilterwechsel, Schleuse sauberhalten	
bei Zwischenfällen	Arbeitskampf, Gefahr von außen	Brand, Explosionen, Mechanische Zerstörung	Großbrand, Explosion, Kritikalität	Naturgewalten Sabotage, Flugzeugabstürze
Häufigkeit/Jahr	ca. 1/10–1	< 1/10	< 1/100	< 1/10000000
Pu-Form	alle	PuO_2	PuO_2	PuO_2
Pu-Konzentration	alle	bis 0,1 mg/m^3 im umbauten Raum	bis 0,1 mg/m^3	< 100g total, maximal 10^{-8} bis 10^{-9} Ci Personeninkorporation
Gegenmaßnahmen	Pu ausschleusen und in gesichertes Lager bringen	Brand löschen, Umgebung benetzen und dann dekontaminieren, bei akuter Gefahr mit Maske Raum verlassen	Löschen, Lüftung abstellen Personen retten Großdekontamination	Baukonzept, Zugangserschwernis, möglichst viel Material in besonders gesichertes Lager, Personenkontrolle, Bewachung im äußeren Sicherungsbereich
Gefährdung der nächsten Barrieren	möglich	Filterzerstörung, Kontaminationsverschleppung		
Häufigkeit	< 10 % aller Fälle	< 1 % aller Fälle	< 10 % aller Fälle	
Gegenmaßnahmen	Begrenzung der offenen Umlaufmenge, Sauberkeit am Arbeits platz	Abstellen der Lüftung, Großreinigung		
Gefährdung der Umwelt	keine	keine	keine	

Tab. 3: Konzentrische Barrieren bei Anlagen zur Plutonium-Verarbeitung

bar erhöht haben wird. Unfallbedingte Freisetzungen, bei denen wenigstens eines der drei Absolutfilter im Abluftstrom intakt bleibt, können diesen Wert etwa verzehnfachen.

Somit sind auch relativ schwere Zwischenfälle in einer Anlage für die Umgebung unwesentlich. Risiken, die Barrieren von innen zu durchbrechen, lassen sich verfahrenstechnisch und konstruktiv auf ein Minimum bringen, indem feuergefährliche und explosive Stoffe und Gemische, größere Druckbehälter und große unabgeschirmte rotierende Massen außerhalb des Kontrollbereiches bleiben. Somit bleibt das Projektilrisiko von außen. Gegen seitliche Druckwellen, Erdbeben, Flut und kleinere fliegende Objekte lassen sich Industriebauten relativ leicht schützen. Erheblichen zusätzlichen Aufwand an Wandstärke und Armierung erfordert erst die Absicherung gegen die Folgen eines Absturzes schnell fliegender Militärmaschinen, voll getankter Großraumflugzeuge oder Meteoriten. Wieweit solche Ereignisse mit einer Eintreffwahrscheinlichkeit von eins in 10^7 bis 10^{10} Jahren tatsächlich in der Auslegung berücksichtigt werden müssen, hängt von den durch die nachfolgende Dispersion von PuO_2 zu erwartenden Personen- und Sachschäden ab[17,18]. In der Risikobetrachtung nehmen besonders seltene Ereignisse mit besonders großen denkbaren Schadensfolgen eine umstrittene Sonderstellung ein, da sie nie experimentell belegt werden können. In Analogie zu Kernkraftwerken wird neuerdings in der Bundesrepublik Deutschland jedoch für Tonnenmengen von Pu ein dem Reaktorcontainment entsprechender Schutz verlangt.

Damit wird auch das Risiko der Dispersion bei kriegerischer oder Sabotage-Einwirkung vermindert; Raub und Diebstahl werden erschwert. So verbleiben nur noch die nicht unmittelbar mit der Verarbeitung verbundenen Dispersionsrisiken aus dem Transport, den Folgen von Mißbrauch in verbrecherischer Absicht und den Nebenwirkungen von Kritikalitätsunfällen.

Für den Transport werden sogenannte Typ-B-Behälter, die voher entsprechend unter mechanischen und thermischen Beanspruchungen getestet wurden, verwendet. Außerdem werden größere Transporte durch entsprechend abwehrfähige Begleitmannschaften und wirksame Nachrichtenverbindungen zu aktionsfähigen Einsatzstellen gesichert.

6.2 Schutz vor Kritikalität

Zwischen der mißbräuchlichen Dispersion, dem Kritikalitätsunfall und der unvollkommenen Kernsprengladung bestehen funktionale Übergänge.

Zunächst kann man davon ausgehen, daß die Dispersion von Plutonium in erpresserischer Absicht angekündigt werden muß, wenn sie einschüchtern soll. Damit werden aber gleichzeitig Vorkehrungen zur Minderung der Folgen, wie Atmen durch improvisierte Filter, Flucht in geschlossene Räume, Abstellen von Ventilatoren usw., möglich. Außerdem gibt es keine unmittelbaren Schadensfolgen – selbst im Falle der Inhalation absolut tödlicher Mengen (z.B. mehr als 30 mg PuO_2) verbleiben noch 3 Wochen, in denen eine Rettung durch medizinische Behandlung oder Eingriffe möglich ist. Eine Nervengas-Konzentration von 10 mg/m^3 tötet dagegen schon nach einer Minute die Hälfte aller, die es einatmen.

Kritikalitätsunfälle können trotz aller Vorkehrungen, wie Aufteilung des Spaltstoffes in sichere Mengen, sichere Geometrie und sichere Konzentrationen sowie Ausschluß von Moderatoren beim Umgang mit größeren Mengen, nicht mit letzter Sicherheit ausgeschlossen werden. Auch Warnsysteme kommen für die unmittelbar am Kritikalitätsort befindlichen Personen meist zu spät. Abhängig von der Reaktionsintensität (Neutronenpulse von $1x10^{14}$ bis $5x10^{18}$ sind bei Pu vorstellbar) kommt es zu Energiefreisetzungen, die außer der unmittelbaren Wirkung des Neutronenblitzes (Neutronen, γ-Quanten, Spaltprodukte) durch Zerstörung von Umhüllungen auch Pu freisetzen können. Geschlossene Anlagen werden bei bis zu 10^{18} Neutronen pro cm^2 (etwa 1 Handgranate) kaum Pu in die äußere Atmosphäre bringen. Kontaminationen in der Anlage werden durch Filter beherrscht.

Werden unterkritische Anordnungen aus Plutoniumdioxid aber mit erheblich höheren Geschwindigkeiten, als sie die bei unfallbedingter Kritikalität in Verarbeitungsanlagen angenommene Schwerbeschleunigung liefert, zur kritischen Geometrie vereinigt, so sind abhängig vom Neutronenpegel, der erzielten Dichte und der Gesamtmasse an Spaltstoff Explosionen erzielbar, die – wenn auch mit einer sehr niedrigen Auslösesicherheit – einigen 100 kg Sprengstoff entsprechen. Da eine solche Anordnung aber selbst die Größe einer LKW-Ladung hätte, ist kaum einzusehen, warum man sie leicht erhältlichem und sicher wirksamem konventionellem Sprengstoff vorziehen sollte. Obwohl im militärischen Bereich mindestens 30000 nukleare Granaten und Fliegerbomben, die je zwei Mann tragen können, handlich verpackt (und bei richtiger Behandlung auch mit Funktionsgarantie) über eine große Zahl von Depots in den Krisenzonen der Welt verteilt sind, hat man von Diebstahl oder Mißbrauch nichts gehört.

Weder bei deren Fertigung noch bei den vergleichsweise hierzu bescheidenen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der friedlichen Nutzung hat es – bei mindestens 30000 Personen, die in mehr als 50 Labors und Fabriken beruflich mit Plutonium umgehen – bisher einen nachweislich auf die Toxizität von Pu zurückgehenden Gesundheitschaden gegeben. Ebenso nimmt sich die – vor allem in der Anfangszeit bei Zwischenfällen – insgesamt freigesetzte Pu-Menge von weniger als 100 g bescheiden aus im Vergleich zu den 5-8 t, die als Folge der Kernwaffentests auf die Menschheit herniederregneten. Mehr als 300 Personen haben zum Teil bis zur 10fachen zulässigen Ganzkörperbelastung teilweise seit bald 30 Jahren Plutonium in ihrem Körper, ohne fühlbaren Schaden gelitten zu haben[12,13].

Dieser kurze und wegen der spärlichen Information aus dem militärischen Bereich notwendigerweise unvollständige Überblick soll zeigen, wie außerordentlich wirksam die Maßnahmen sind, mit denen man sich bei der Hantierung von Plutonium schützt.

6.3 Sicherung gegen Diebstahl

Alle für den Umgang mit Radionukliden, insbesondere aber mit Spaltstoffen Verantwortlichen müssen sich den hohen Signalwert klarmachen, den allein schon das potentielle Verbrechen mit Radionukliden hat. Von der Scheintat, die nur auf mögliche Mißstände oder vermutete Lücken im Sicherheitssystem hinweisen will, über Drohung und Erpressung mit nicht vollständig auszuschließenden Handlungen bis zu den verschiedenen echt verbrecherischen Taten sind eine Vielzahl von Szenarios denkbar. Diese können alle, dank der übertriebenen Ängste, die Kernenergiegegner unbehindert verbreiten, mit einer unvergleichlichen Publikumswirksamkeit in den Massenmedien rechnen.

Daraus ergibt sich zwingend, daß ein engmaschiges Netz von Sicherungsmaßnahmen gegen die denkbaren Fälle von Diebstahl, Raub und Erpressung vorzusehen ist [19], (Beitrag von E. Münch und G. Stein in diesem Heft). Dabei kommt es im wesentlichen darauf an, potentielle Täter früh zu erkennen und ihnen durch eine Reihe von schwer überwindbaren konzentrischen Barrieren um den Spaltstoff den Zugang zum Spaltstoff solange zu verwehren, bis entsprechende Verstärkungen der Ordnungskräfte herbeigeholt sind.

Ebenso zwingend wird man die jeweils in der Verarbeitung und im Transport zugängliche Plutoniummenge mindestens in

Form des unverdünnten, dispersiblen Oxides mengenmäßig soweit als möglich einzuschränken versuchen.

Insgesamt sollte verstanden werden, daß Anhäufungen von Plutonium in jeder Form dessen Gefahrenpotential erhöhen. Es sollte daher auf kürzestem Weg an den Ort seiner Entstehung, den Reaktor, zurückgeführt werden, um dort unter Energiegewinn durch Spaltung verbraucht zu werden.

7. Zusammenfassung

Die Rolle, die das Plutonium im Kernbrennstoffkreislauf spielt, wurde an dem bisher offenen Brennstoffkreislauf gezeigt. Die Möglichkeiten und Vorteile der Schließung über die Rückführung in Leichtwasserreaktoren und Schnelle Brüter wurden aufgezeigt und gewertet.

Daraus ergibt sich, daß der gegenwärtige Verzicht auf Rückführung einen Zuwachs der Plutoniumbestände um mindestens 18 t pro Jahr auslöst. Dabei ist die bisher verwendete Technik bereits in der Lage, die Hantierenden und die Umwelt sicher vor Schäden, die sowohl aus der Radiotoxität wie aus den Kritikalitätsparametern entstehen könnten, zu schützen. Auch die potentiellen Gefahren durch Terrorismus und Einwirkung von außen sind erkannt und beherrschbar. Es sollte ein Interesse daran bestehen, die Plutoniummenge durch fortlaufende Rückführung unter Energiegewinn im Reaktor zu spalten und damit die jeweils zugängliche Menge so klein wie möglich zu halten.

Literatur

[1] Ranger Uranium Environmental Inquiry. Australien Government Publishing Service. First Report. Canberra 1976. Second Report. Canberra 1977

[2] Royal Commission on Environmental Pollution. Sixth Report. Nuclear Power and the Environment. Her Majesty's Stationary Office, London 1976

[3] Nuclear Power – Issues and Choices. Report of the Nuclear Energy Policy Study Group. Ballinger Publishing Company, Cambridge, Mass. 1977

[4] MÄRKL, H., STOLL, W.: Rückführung von Plutonium in thermische Reaktoren. Atomwirtschaft Bd. 17 (1972) S. 306-312

[5] Generic Environmental Statement on Mixed Oxide Fuel (GESMO), Wash 1327, August 1974

[6] Verzeichnis der Kernkraftwerke der Welt. Atomwirtschaft Bd. 25, (1980) S. 157-162

[7] HAUG, H.O.: Anfall, Beseitigung und relative Toxizität langlebiger Spaltprodukte und Actiniden in den radioaktiven Abfällen der Kernbrennstoffzyklen. Gesellschaft für Kernforschung, Karlsruhe 1975, KFK-2002, S. IX

[8] SCHMIEDEL, P., STOLL, W.: Rückführung von Uran und Plutonium. Entsorgung der Kerntechnik, Symposium am 19. und 20. Januar 1976 in Mainz, Berichte, Deutsches Atomforum e.V., Bonn 1976

[9] Jahresbericht des CEA für 1975, Wiederaufarbeitung

[10] COHEN, B.L.: The Hazards in Plutonium Dispersal. University of Pittsburg, Juli 1975, S. 30a u. S. 4-7

[11] SEIDEL, A.: Verhalten und Wirkung von Transuranen. Chemiker-Ztg. Bd. 9 (1975) S. 370-378

[12] BAIR, W.J., RICHMOND, C.R., WACHHOLZ, B.W.: A Radiological Assessment of the Spatial Distribution of Radiation from Inhaled Pu. Wash 1320, Sept. 1974

[13] DOLPHIN, G.W.: Biological Problems in the Radiological Protection of Workers exposed to ^{238}Pu. Health Physics. Bd. 20 (1971) S. 459

[14] ICRP-Empfehlung 1957, Radiology 56, 431-439, wiederholt 1972: ICRP-Publication 19: Metabolism of Pu and other actinides

[15] Chemische und Bakteriologische Waffen. Bericht des Generalsekretärs der Vereinten Nationen vom 1.7.1969. Anhang II. Lit.[10], S. 19

[16] JORDAN, H.S.: Distribution of Plutonium from Accidents and Field Experiments. Proceedings of Environmental Plutonium Symposium, Los Alamos Scientific Laboratory, LA-4756, August 1971, S. 21-24

[17] SELBY, J.M. et al.: Consideration in the Assessment of the Consequences of Effluents from Mixed Oxide Fuel Fabrication Plants. Batelle Pacific Northwest Lab., BNWL 1967, Hanford 1973

[18] CHELAPOLI, C.V., KENNEDY, R.P., WAHL, J.B.: Probabilistic Assessemt of Aircraft Hazard for Nuclear Power Plants. Nuclear Engineering and Design. Bd. 5 (1972) S. 19

[19] Recommendations for Physical Protection of Nuclear Material. IAEA-Panel, März 1972