Die Rolle der Grossforschungseinrichtungen beim Aufbau eines Entsorgungssystems in der Kerntechnik

Autor(en): **Böhm, Horst**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **95 (1977)**

Heft 24: **SIA-Heft, 3: SIA-Tag 1977, Luzern, 24. und 25. Juni**

PDF erstellt am: **23.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-73392

Nutzungsbedingungen

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

Haftungsausschluss

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

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

http://www.e-periodica.ch

Die Rolle der Grossforschungseinrichtungen beim Aufbau eines Entsorgungssystems in der Kerntechnik

Von **Horst Böhm**, Karlsruhe[1])

Wohl nie zuvor hat eine technologische Entwicklung in der öffentlichen Diskussion so breiten Raum eingenommen wie die Kerntechnik – und hier speziell die Entsorgung – und ist dabei zugleich aus der ursprünglich wirtschaftlichen technischen Problemstellung in eine überwiegend ideologische Richtung mit stark emotioneller Grundhaltung gedrängt worden. Die Entsorgung ist, so scheint es, zumindest psychologisch zur grössten Sorge der Kerntechnik geworden.

Über die Gründe, welche die Entsorgung in dieser Weise in den Mittelpunkt der Kernenergiediskussion gerückt haben, nachdem sie jahrelang in der Öffentlichkeit keinerlei Resonanz gefunden hatte, ist viel geschrieben und gesprochen worden. Sie liegen zum Teil in den technischen Schwierigkeiten und Verzögerungen beim Bau und der Inbetriebnahme neuer Wiederaufarbeitungsanlagen, was dazu führt, dass in den kommenden Jahren in steigendem Masse mit Minderkapazitäten bei der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente zu rechnen ist.

Die Erkenntnis der Kernenergiegegner, die Entsorgung sei wegen ihrer zentralen Bedeutung der strategisch günstigste Angriffspunkt gegen die Kerntechnik, hat das Ihre zu einer Intensivierung und Polarisierung der öffentlichen Diskussion getan. Damit zugleich wurden die Ängste vieler Bürger vor radioaktiven Strahlen in steigendem Masse auf die Entsorgung fokussiert. Schliesslich hat nicht zuletzt auch das im internationalen politischen Rahmen erörterte Problem des Missbrauchs von Plutonium zur derzeitigen Publizität der Entsorgung beigetragen.

Mit meinen Ausführungen hoffe ich das Verständnis über diesen Teil der Kerntechnik zu vertiefen und so vielleicht ein wenig zur Versachlichung der Diskussion beizutragen. Bevor ich jedoch auf die Rolle der Grossforschungseinrichtungen in diesem Zusammenhang zu sprechen komme, erscheint es mir zweckmässig, eine kurze Beschreibung der Entsorgung mit einer Begründung ihrer Teilschritte sowie einen Überblick über die Menge der zu verarbeitenden Brennelemente und Abfälle zu geben.

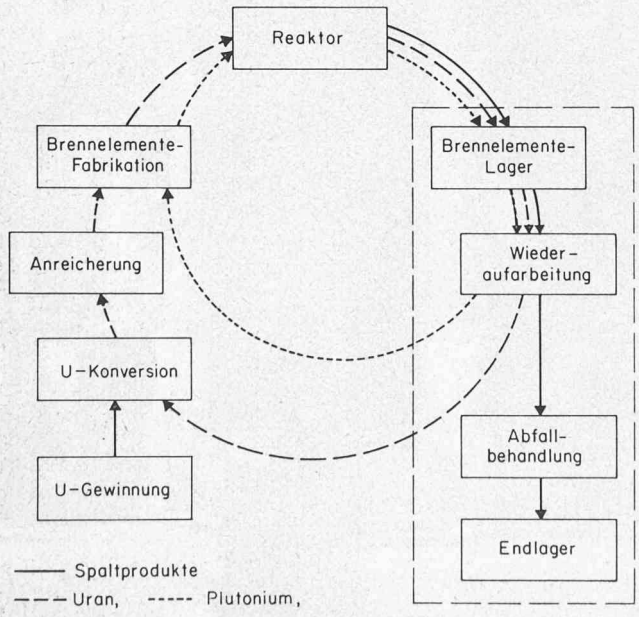

Bild 1. Der nukleare Brennstoffkreislauf

Beschreibung und Aufgaben der nuklearen Entsorgung

Unter der Entsorgung in der Kerntechnik verstehen wir die *Behandlung* und *Verwertung* beziehungsweise *Beseitigung*, das heisst die *sichere Endlagerung*, der durch *Kernspaltung, Aktivierung* oder *Kontamination* entstandenen *radioaktiven Produkte*. Da der weit überwiegende Teil der Radioaktivität in den abgebrannten Brennelementen in Form der *Spaltprodukte* konzentriert ist, liegt der *Schwerpunkt* der Entsorgung ganz bevorzugt bei den *Brennelementen*.

Eine etwas genauere Beschreibung lässt sich am besten an Hand von Bild 1 geben, das die einzelnen Schritte des *Leichtwasserreaktor-Brennstoffkreislaufs* von der Urangewinnung über die Konversion, die Anreicherung, die Brennelement-Herstellung, den Reaktorbetrieb, die Brennelement-Lagerung, Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung bis zur Endlagerung wiedergibt. Unter Entsorgung subsumiert man die Schritte, welche die abgebrannten Brennelemente nach ihrer Entnahme aus dem Reaktor durchlaufen.

Bild 2 gibt an, welche Aufgaben den einzelnen Teilschritten zukommen.

Die *Doppelfunktion* der Wiederaufarbeitung, nämlich die *Abtrennung* der aktiven Spaltprodukte zum Zwecke der Endlagerung *und die Gewinnung der Werkstoffe Uran* und *Plutonium* und ihre Rückführung in den Brennstoffkreislauf zeigt auch den wichtigen Versorgungscharakter, den die Wiederaufbereitung von Leichtwasserreaktorbrennelementen hat.

Zur Entsorgung zu zählen ist auch die *Behandlung* und *Beseitigung* radioaktiver Abfälle aus anderen Teilen des Brennstoffkreislaufs. Wegen der vergleichsweise geringen Aktivitäten werfen diese Abfälle aber keine qualitativ neuen Probleme auf.

Eine weitgespannte Definition des Begriffs «Entsorgung» wird auch die Beseitigung *stillgelegter kerntechnischer Anlagen* umfassen, auf die hier jedoch nicht eingegangen werden soll.

Bedeutung der Wiederaufarbeitung

Unter den gegebenen Randbedingungen stellt sich nicht die Frage: «Entsorgung – ja oder nein?», vielmehr kann die Frage nur lauten, ob die genannten Teilschritte zu einer vom ökologischen, technischen, politischen und wirtschaftlichen Standpunkt optimalen Entsorgung führen oder ob es nicht bessere Alternativen gibt.

Die *längerfristige Zwischenlagerung* abgebrannter Brennelemente oder deren Verarbeitung in anderen Ländern möchte ich nicht als Alternative in unserem Sinne betrachten, da sie das Problem zwar momentan entschärfen, aber im übrigen nur zeitlich beziehungsweise geographisch verlagern. Wie eben gezeigt wurde, ist die Wiederaufarbeitung mit der Rückführung des Urans und Plutoniums ein entscheidender Teilschritt der Entsorgung. In letzter Zeit wird nun mit Hinweis auf das *Risiko eines Plutonium-Missbrauchs* die Frage gestellt, ob die Wiederaufarbeitung ein notwendiger Schritt ist oder ob eine direkte Endbeseitigung der Brennelemente nicht eine einfachere, politisch akzeptablere und unter Umständen sogar wirtschaftlichere Lösung des Entsorgungsproblems sei.

Es ist deshalb zweckmässig, diese Frage ihrer grundsätzlichen Bedeutung wegen kurz zu behandeln. Bild 3 zeigt die beiden zu vergleichenden Alternativen. Betrachten wir zu-

[1]) Überarbeitete Fassung eines Vortrages, gehalten an der Mitgliederversammlung der «Arbeitsgemeinschaft der Grossforschungseinrichtungen» am 16. Februar 1977 in Bonn.

nächst den *Versorgungsaspekt* der Wiederaufarbeitung. Abschätzungen der bekannten wirtschaftlich abbaubaren Uranreserven zeigen, dass man bei dem vorgegebenen weltweiten Kernenergieausbauprogramm und einer auf Leichtwasserreaktoren basierenden Energieerzeugung mit einer Uran-Versorgung bis etwa ins zweite Viertel des nächsten Jahrhunderts rechnen kann. Die Rückführung des bei der Wiederaufarbeitung gewonnenen Urans und Plutoniums in Leichtwasserreaktoren würde eine *Streckung der Uranreserven* um rd. 20 Prozent ermöglichen, wäre also zweifellos ein wichtiger energiepolitischer Faktor, insbesondere auch was die Versorgungsabhängigkeit anbetrifft, aber würde an der genannten *Begrenzung der Uranreserven* nichts grundsätzlich ändern. Dieser Gesichtspunkt allein wäre daher nur schwerlich eine ausreichende Begründung der Wiederaufarbeitung.

Unabdingbare Voraussetzung ist die Wiederaufarbeitung jedoch für eine *langfristige Sicherstellung* der Energiegewinnung durch Kernspaltung bei einer *besseren Ausnutzung der Spaltstoffreserven* in *Brutreaktoren* beziehungsweise *Konvertern*. Dies gilt nicht nur für den eigentlichen Brüterbrennstoffkreislauf, sondern auch schon für einen Teil der Leichtwasserreaktor-Brennelemente, um Plutonium für die Brütereinführung zu gewinnen und Erfahrungen für die Brüterwiederaufarbeitung zu sammeln.

Lassen wir den Versorgungsaspekt der Wiederaufarbeitung jetzt einmal ausser acht und vergleichen die Entsorgung über eine Wiederaufarbeitung mit der über eine Direktbeseitigung der abgebrannten Brennelemente. Im Bild 4 sind die *Vor- und Nachteile* beider Möglichkeiten gegenübergestellt, wobei verschiedene Gesichtspunkte berücksichtigt wurden. Der Vergleich zeigt, dass weit mehr für eine Entsorgung über Wiederaufarbeitung spricht als für eine Direktbeseitigung der Brennelemente. Berücksichtigt man zudem noch den energiewirtschaftlichen Gesichtspunkt der Uran- und Plutonium-Rückführung sowie der Brütereinführung, so leitet sich daraus eine klare *Präferenz für die Wiederaufarbeitung als Teilschritt der Entsorgung* ab, zumindest für Länder mit einer hohen Kernenergieerzeugung und geringen Uranvorkommen. Damit ist noch nichts über den günstigsten Zeitpunkt der Wiederaufarbeitung gesagt, der durch eine Reihe verschiedener Faktoren bestimmt wird.

In der Bundesrepublik Deutschland hat man sich aus den obigen Gründen klar für eine Entsorgung über die Wiederaufarbeitung ausgesprochen. Um die Überwachung und die Sicherheit zu optimieren und damit unter anderem das Risiko eines Plutonium-Missbrauchs zu minimieren, hat man sich für eine Zusammenfassung aller Teilschritte der Entsorgung an einem Standort einschliesslich der Brennelemente-Herstellung entschieden, wie Bild 5 schematisch zeigt. Dadurch werden insbesondere auch die Transporte radioaktiven beziehungsweise sensitiven Materials auf ein Minimum reduziert.

Die anfallenden Mengen an Brennelementen und radioaktiven Abfällen

Nach diesen allgemeinen Ausführungen ist es zweckmässig, kurz auf die zu verarbeitenden Brennelement- und Abfallmengen einzugehen, über die Bild 6 einen Überblick gibt. Hierbei sind nur die *Prozess- und nicht die Betriebsabfälle* berücksichtigt. Danach fallen pro 1000 MWe jährlich etwa 30 t abgebrannter Brennstoff und 12,5 t Hüll- und Strukturmaterial an. Der Brennstoff ergibt bei der Wiederaufarbeitung 0,27 t Plutonium, etwa 28,6 t Uran und 1,13 t Spaltprodukte mit einer Aktivität von etwa $3 \cdot 10^7$ Ci. Bezogen auf die Aktivität befinden sich *99% der Spaltprodukte in flüssiger Phase* und *1% in gasförmiger Form*. Über 99% der in flüssiger Phase vorliegenden Spaltprodukte sind im *hochaktiven* Abfall konzentriert, der in *verglaster Form* ein Volumen von etwa 3 m³ einnimmt. Geringe Aktivitätsmengen befinden sich im *mittelaktiven* Abfall, der zum überwiegenden Teil aus *inaktiven Ballaststoffen* besteht und konditioniert, das heisst in endlagerfähiger Form, etwa 100 m³ bezogen auf 1000 MWe pro Jahr ergibt. Die *Hüll- und Strukturmaterialien* nehmen verfestigt ein Volumen von etwa 12 m³ ein. Welche Volumina beziehungsweise Mengen die zurückgehaltenen gasförmigen Spaltprodukte ergeben, hängt von den Rückhaltungs- oder Einengungsverfahren ab. Der Hinweis, dass pro 1000 MWe jährlich ca. 10 kg Krypton und Jod anfallen, zeigt aber die Grössenordnung.

Bei Kenntnis der installierten Kernkraftwerksleistung lassen sich aus den obigen Zahlen die Gesamtmengen der bei der Wiederaufarbeitung jährlich zu verarbeitenden und endzulagernden Mengen der radioaktiven Abfälle sofort ermitteln. Bei 30 Kernkraftwerken von je 1000 MWe wären dies zum Beispiel etwa 90 m³ verglaster hochaktiver Abfall und

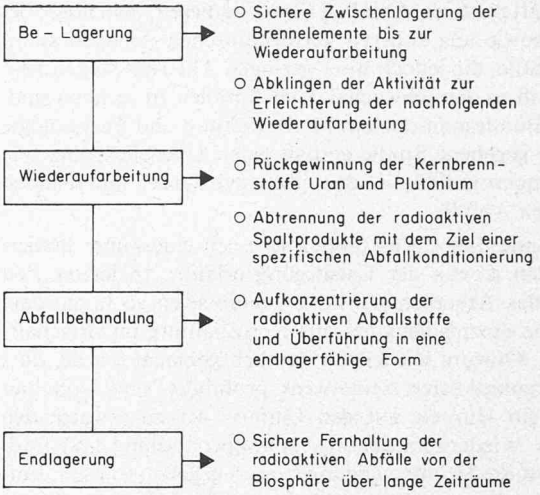

Bild 2. Ziele und Zwecke der einzelnen Teilschritte in der Entsorgung

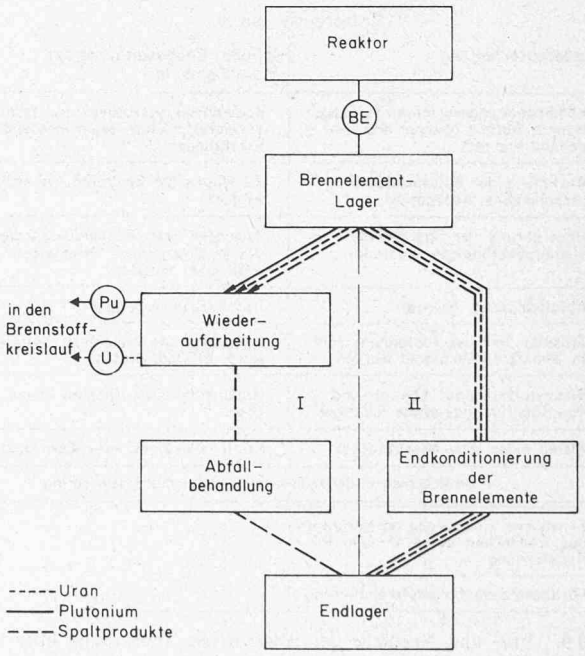

Bild 3. Alternativen der Entsorgung

3000 m³ mittelaktiver Abfall. Hierzu addieren sich noch betriebliche sowie aus anderen kerntechnischen Anlagen stammende Abfälle, die jedoch ihrer geringen Aktivität wegen zum grössten Teil zu den schwachaktiven Abfällen zu rechnen sind. Eine vom Bundesministerium für Forschung und Technologie in Auftrag gegebene Studie enthält einen Überblick über alle in der Bundesrepublik in den nächsten Jahren anfallenden radioaktiven Abfälle.

Am Ende dieses Abschnittes sei noch eine kurze Bemerkung zu den *Kosten* der Entsorgung erlaubt. In letzter Zeit ist häufig das Argument zu hören, diese seien so hoch, dass dadurch die Stromerzeugung aus Kernspaltung unwirtschaftlich würde. Obwohl wiederholt deutlich gemacht wurde, dass die Entsorgungskosten keineswegs prohibitiv sind, soll hier nochmals ein Hinweis auf den Einfluss der zu erwartenden Kosten für Wiederaufarbeitung, Abfallbehandlung und Endlagerung auf die Stromerzeugungskosten gegeben werden. Entsorgungskosten von 1000 Mark je kg abgebrannten Brennstoff, wie sie heute geschätzt werden, belasten den Strompreis mit etwa 0,45 Pf/kWh, wobei die Wertgutschrift für Uran und Plutonium noch nicht berücksichtigt ist. Mit anderen Worten heisst das, 220 Mark/kg Uran Entsorgungskosten entsprechen 0,1 Pf/kWh in den Stromerzeugungskosten. Hieraus wird ersichtlich, dass selbst unvorhergesehene realistische Kostensteigerungen bei der Entsorgung zu keiner untolerierbaren Belastung der Stromkosten führen.

Aufgaben der Grossforschungseinrichtungen

Wenden wir uns nunmehr der konkreten Frage nach der Rolle der Grossforschungseinrichtungen beim Aufbau eines Entsorgungssystems zu. Hierbei will ich unterscheiden zwischen den Jahren vor 1973/74 und der Zeit danach.

Bisherige Rolle

Die Zeit bis 1973/74 war, was die kerntechnische Entwicklung anbetrifft, gekennzeichnet durch eine *Prioritätsausrichtung auf Reaktorentwicklung* sowie die *ersten Teile des Brennstoffkreislaufs*, wie *Anreicherung und Brennelemententwicklung und -herstellung*. Die Wiederaufarbeitung, Abfallbehandlung und Endlagerung fanden weder in der «scientific community» noch in der Industrie oder bei Politikern besondere Resonanz. Wegen der seinerzeit vorhandenen *Überkapazität* bei der Wiederaufarbeitung und der dadurch *unrealistischen Preise* sowie des *international freien Marktes* galt dieser Sektor als technisch, wirtschaftlich und politisch unproblematisch. Der geringe Anfall abgebrannter Brennelemente, unbekannte Schwierigkeiten bei der Aufarbeitung hochabgebrannter Brennelemente sowie weniger restriktive Gesetze bezüglich der Abgabe radioaktiver Stoffe liessen damals viele Probleme weit weniger dringlich erscheinen als heute. Das bedeutete aber nicht, in den Kernforschungszentren sei während dieser Zeit auf diesem Gebiet nicht bereits intensiv gearbeitet worden. Die Existenz entsprechender Institute in *Berlin, Jülich, Clausthal* und *Karlsruhe* zeigt dies ebenso deutlich wie die Forschungs- und Entwicklungsprogramme der 60er Jahre, in denen umfangreiche Arbeiten zur Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung ausgewiesen sind.

Aus der vorher geschilderten Situation heraus war es verständlich, dass die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in dieser Zeit stärker auf *längerfristige Ziele* ausgerichtet waren als es zum Teil jetzt der Fall ist. So galt das Interesse bevorzugt der *Wiederaufarbeitung von Brennelementen fortgeschrittener Reaktoren* und weniger denen der in der Einführung stehenden Leichtwasserreaktoren. Die Tätigkeit der Forschungszentren beschränkte sich aber keineswegs auf Forschungs- und Entwicklungsaufgaben im engeren Sinn, vielmehr wurden auch *betriebliche beziehungsweise prototypische Entsorgungseinrichtungen* erstellt und so im wesentlichen Umfang auch *Dienstleistungen* auf dem Gebiet der Entsorgung durch die Grossforschungseinrichtungen übernommen. Damit wurden sie zugleich zu Trägern des betrieblichen Know-how. Kennzeichnend für diese Entwicklung war der *Aufbau grösserer Anlagen für die Behandlung radioaktiver Abfälle* in Jülich und Karlsruhe, die Errichtung der Wiederaufarbeitungsanlage in Karlsruhe sowie die Einrichtung des Versuchsendlagers Asse.

Es ist angebracht, sich an dieser Stelle einmal den *Umfang* der erbrachten Leistungen dieser angesprochenen Einrichtungen vor Augen zu führen: Im *Kernforschungszentrum Karlsruhe* zum Beispiel hat die *Abteilung Dekontaminationsbetriebe*, die ausser hochaktiven Flüssigabfällen alle Arten von radioaktiven Abfällen verarbeitet, seit ihrer Inbetriebnahme unter anderem

≃ 100000 m³ schwachaktive Abwässer
≃ 2500 m³ mittelaktive Abwässer
≃ 8500 m³ feste radioaktive Abfälle sowie
über 2500 m³ radioaktiven Schrott

verarbeitet. Für die entsprechenden Anlagen der *Kernforschungsanlage Jülich* gelten, abgesehen von den dort kaum verarbeiteten mittelaktiven Abfällen, ähnliche Werte.

Die WAK *(Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe)*, die bekanntermassen im Rahmen eines Betriebsführungsvertrages von der «Gesellschaft zur Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen mbH» betrieben wird, hat seit ihrer Inbetriebnahme im Jahre 1971 über 60 t zum Teil hochabgebrannten Brennstoff wieder aufgearbeitet, wobei darauf hinzuweisen ist, dass die WAK als Versuchsanlage nicht das primäre Ziel eines möglichst grossen Durchsatzes hat.

Das *Versuchsendlager Asse* schliesslich hat bis jetzt 67000 Fässer mit schwachaktiven und 1250 Fässer mit mittelaktiven Abfällen aufgenommen.

Diese frühe, langjährige Tätigkeit der Grossforschungseinrichtungen auf dem Entsorgungssektor hat ihren Niederschlag in einer *Vielzahl von Erfindungen* und *Entwicklungen*

Entsorgung durch

Wiederaufarbeitung	Direkte Endbeseitigung der Brennelemente
Konditionierungsverfahren für abgetrennte Abfälle bekannt und weitgehend erprobt	Konditionierungskonzept noch nicht entwickelt; keine experimentellen Erfahrungen
Aufteilung der Spaltprodukte in verschiedene Kategorien	Aufteilung der Spaltprodukte nicht möglich
Überführung der Spaltprodukte in auslaugbeständigen Zustand	Aussagen über Auslaugbeständigkeit des endzulagernden Produktes noch nicht möglich
Abfallvolumina grösser	Abfallvolumina kleiner
Grösster Teil des Plutoniums kann in Reaktoren verbrannt werden	Endzulagernde Plutonium-Menge etwa 100 mal grösser
Brennstoffkreislauf (bei U- und Pu-Rückführung) etwas niedriger	Brennstoffkreislaufkosten etwas höher
Risiko eines Pu-Missbrauchs	Kein Risiko eines Pu-Missbrauchs
Unterschied in der radiologischen Belastung sehr gering	
Erhebliche Einsparung an Natururan und Trennarbeit durch U- und Pu-Rückfuhrung	
Voraussetzung für Brütereinführung	

Bild 4. Vor- und Nachteile der Alternativen. Entsorgung über Wiederaufbereitung (links) oder über die direkte Endbeseitigung der Brennelemente (rechts)

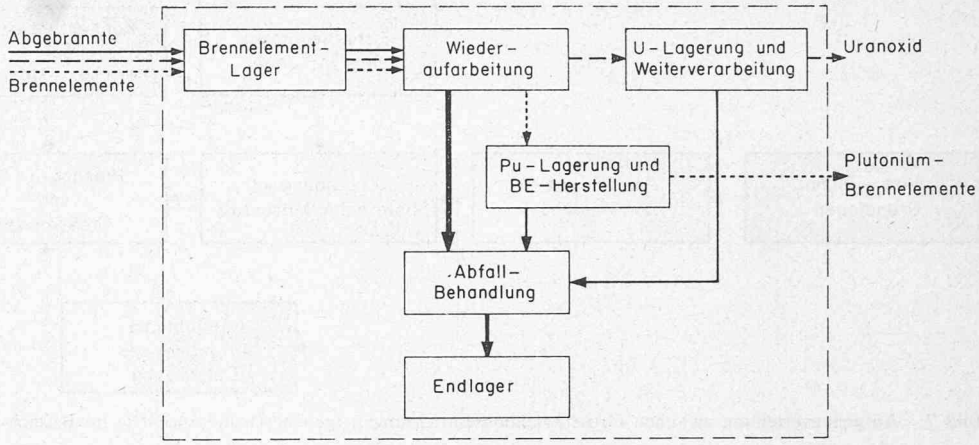

Bild 5. Entsorgungszentrum

gefunden, die allein beim Kernforschungszentrum Karlsruhe im Bereich der Abfallbehandlung, Abfallhandhabung und Endlagerung bisher zu etwa 18 Lizenzverträgen mit verschiedenen Firmen geführt haben.

Derzeitige und künftige Aufgaben

Wie nur zu gut bekannt ist, hat sich die Lage im Bereich der Wiederaufarbeitung, Abfallbehandlung und Endlagerung in den vergangenen drei Jahren deutlich gewandelt. *Verzögerungen beim Ausbau und der Inbetriebnahme von Anlagen,* die *Unterschätzung gewisser technischer Schwierigkeiten, Forderungen nach verstärkter Rückhaltung radioaktiver Produkte* sowie eine zunehmende *Beschränkung der Entsorgungsleistungen verschiedener Länder auf Abfälle aus eigenen Anlagen* haben zu einer veränderten Situation geführt, die nicht ohne Einfluss auf die Rolle der Grossforschungseinrichtungen geblieben ist.

War das *industrielle Engagement* im Bereich der Entsorgung bis dahin weitgehend auf die *Betriebsführung von Anlagen* wie der WAK, den *Transport nuklearen Materials,* die *Errichtung kleinerer Anlagen im Auftrage des Bundes* sowie die *vertragliche Sicherstellung der Aufarbeitung* ihrer Brennelemente in ausländischen Anlagen beschränkt, so wird nunmehr mit dem Bau und Betrieb eines räumlich integrierten Entsorgungssystems ein wesentlich stärkeres Engagement der Industrie gefordert und erwartet.

Der *Staat* hat zu erkennen gegeben, dass er seinen Beitrag zum Aufbau eines Entsorgungssystems unter anderem in der Durchführung von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in den Grossforschungseinrichtungen sieht, und er hat den Forschungszentren damit ihre Rolle in diesem Bereich zugewiesen.

Unter Berücksichtigung der allgemeinen Situation in der Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung bedeutet dies für die Forschungseinrichtungen

1. eine *Ausweitung* der Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten auf diesem Gebiet sowie
2. eine *verstärkte Ausrichtung auf kurz- und mittelfristige Aufgaben* in enger Abstimmung und Kooperation mit den zuständigen Industriepartnern.

Die Gesellschaft für Kernforschung hat dieser Situation im Jahre 1974 durch die Gründung ihres Projektes Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung Rechnung getragen.

Da im Gegensatz zu anderen kerntechnischen Bereichen die Industrie auf dem Gebiet der Entsorgung über kein vergleichbares Forschungs- und Entwicklungs-Potential verfügt, sind nahezu die gesamten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten bei den Grossforschungseinrichtungen konzentriert. Die Notwendigkeit einer *halbtechnischen aktiven Erprobung* von Verfahren *vor* ihrem grosstechnischen Einsatz *und* das *Fehlen entsprechender Testeinrichtungen in der Industrie* zwingt die Grossforschungseinrichtungen, sich in zunehmendem Masse auch der halbtechnischen Verfahrens- und Komponentenerprobung zuzuwenden.

Nun liegen die *Aufgaben der Zentren* nicht nur im Bereich der Erforschung der wissenschaftlich-technischen Grundlagen der Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung, der Verfahrensentwicklung und der halbtechnischen Verfahrens- und Komponentenerprobung, sondern auch auf den Gebieten der

- *kerntechnischen Sicherheit,* zum Beispiel der genauen Analyse von Störfällen, und Entwicklung von Massnahmen und Verfahren zur weiteren Erhöhung der nuklearen Sicherheit sowie
- der *Entwicklung eines Konzeptes zur Kernmaterialüberwachung* in einem Entsorgungszentrum.

Auf beiden Gebieten werden die Grossforschungseinrichtungen ihre bisher laufenden Aktivitäten verstärken.

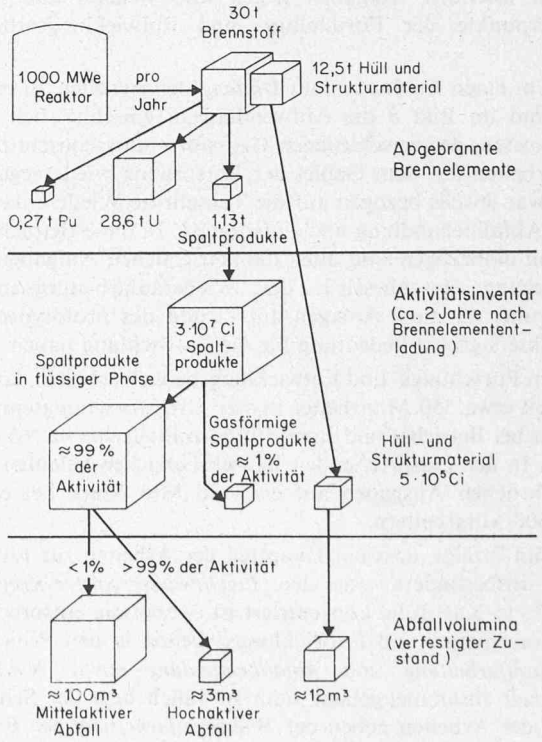

Bild 6. Jährlicher Anfall von abgebrannten Brennelementen sowie von radioaktiven Abfällen aus der Wiederaufbereitung, bezogen auf ein 1000-MWe-Kernkraftwerk

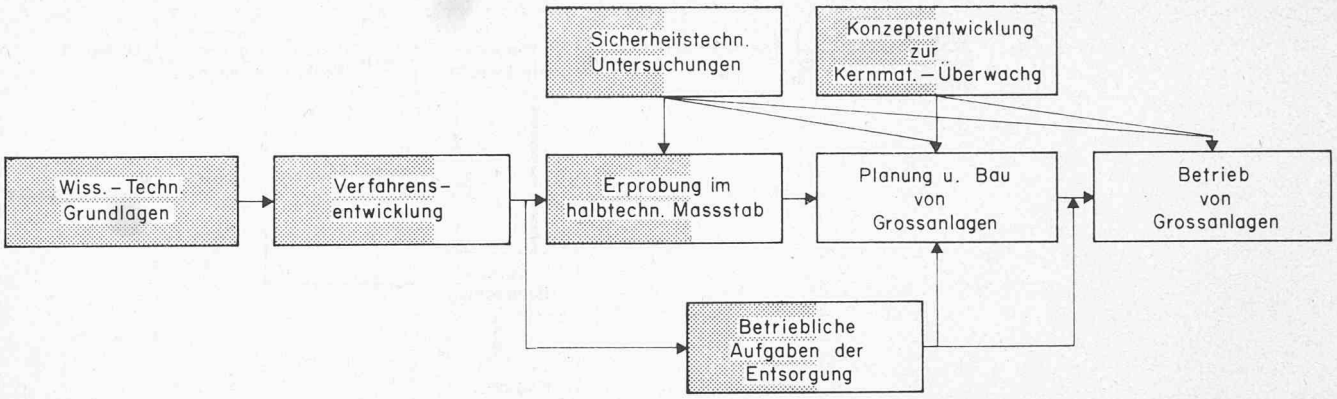

Bild 7. Aufgabenverteilung zwischen Grossforschungseinrichtungen (gerastert) und Industrie im Bereich der nuklearen Entsorgung

Berücksichtigt man, dass die bereits genannten betrieblichen Entsorgungsaktivitäten der Zentren auch in Zukunft beibehalten werden, so ergibt sich das in Bild 7 dargestellte Aufgabenspektrum der Grossforschungseinrichtungen auf dem Entsorgungsgebiet. Nicht alle Arbeiten beziehen sich dabei auf die Errichtung des ersten grossen Entsorgungszentrums. Ein Teil der Arbeiten dient der langfristigen Entwicklung neuer Verfahren, insbesondere auch für die Wiederaufarbeitung von Brennelementen fortgeschrittener Reaktoren.

Bisher unerwähnt geblieben ist die Rolle der Forschungszentren als *neutrale Informationsstelle für die Öffentlichkeit*. Wir betrachten die sachliche Information der interessierten Öffentlichkeit als eine ebenso wichtige Aufgabe wie die Durchführung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.

Umfang der Arbeiten

Ich bin bisher weder auf die Frage eingegangen, in welchem Umfang die einzelnen Kernforschungseinrichtungen Leistungen auf den genannten Gebieten erbringen noch wo die zu lösenden Aufgaben liegen und welches damit die Schwerpunkte der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sind.

Um einen Eindruck vom *Umfang* der Arbeiten zu erhalten, sind im Bild 8 die Aufwendungen, einschliesslich Personalkosten, der verschiedenen Grossforschungseinrichtungen für Arbeiten auf dem Gebiet der Entsorgung wiedergegeben, und zwar jeweils bezogen auf die Teilschritte Wiederaufarbeitung, Abfallbehandlung und Entsorgung. In diese Betrachtungen mit einbezogen sind auch die betrieblichen Aufgaben der Entsorgung einschliesslich der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe, da diese Anlagen auf Grund des prototypischen Charakters grosse Bedeutung für die Entwicklung haben.

Im Forschungs- und Entwicklungsbereich arbeiten danach zur Zeit etwa 350 Mitarbeiter in vier Grossforschungseinrichtungen bei Betriebs- und Investitionsmitteln von ca. 65 Mio Mark. In den entsprechenden Betriebsbereichen belaufen sich die jährlichen Ausgaben auf etwa 56 Mio Mark bei etwas über 600 Mitarbeitern.

Bild 8 zeigt, dass ein Hauptteil der Arbeiten zur Entsorgung, insbesondere was den *Leichtwasserreaktor-Kreislauf* betrifft, in Karlsruhe konzentriert ist, wobei die entsprechenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in den Projekten *Wiederaufarbeitung* und *Abfallbehandlung* sowie *Nukleare Sicherheit* zusammengefasst sind. In Jülich liegt der Schwerpunkt der Arbeiten neben der *Wiederaufarbeitung der Brennelemente des Thorium-Hochtemperaturreaktors* auf dem Gebiet der *Behandlung hochaktiver Abfälle*. Dem Gebiet der *Verfestigung* hochaktiver Abfälle widmet sich auch das Hahn-Meitner-Institut in Berlin, wobei Untersuchungen zum Verhalten und zur Verbesserung der *Gläser* und *Glaskeramiken als Spaltproduktträger* im Mittelpunkt stehen. Für die Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung als vierte der auf dem Entsorgungsgebiet arbeitenden Grossforschungszentren ist bekanntermassen die *Endlagerung* das zentrale Thema ihrer Arbeiten in diesem Bereich.

Beim Vergleich der Aufwendungen für die einzelnen Teilschritte ist darauf hinzuweisen, dass zur Wiederaufarbeitung auch die umfangreichen Arbeiten zur *Abgasbehandlung* sowie zur *Abfallminimierung* gerechnet werden.

Fachliche Schwerpunkte der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten

Häufig wird die Frage gestellt, ob in dem vorliegenden detaillierten Konzept der Entsorgung, das eine sichere Behandlung der Brennelemente und Beseitigung der Abfälle gewährleisten muss, alle entscheidenden Teilschritte sowohl vom Konzept als auch vom Standpunkt der technischen Realisierbarkeit, grundsätzlich als gelöst anzusehen sind, soweit ihre grosstechnische Verwendung nicht bereits nachgewiesen wurde. Auch wenn diese Frage mit einem klaren Ja zu beantworten ist, so bestehen doch bezüglich der Verfahrensoptimierung, der Erhöhung der Sicherheit sowie Verfügbarkeit der Anlagen, der Verminderung der Abfallmengen, der Minimierung der Abgabe radioaktiver Stoffe so viele kurz-, mittel- und langfristige Aufgaben, dass der genannte Aufwand voll gerechtfertigt ist.

Für die *Entsorgung der Leichtwasserreaktoren* resultieren die Aufgaben im wesentlichen aus

- der Übertragung der bekannten Verfahren auf Anlagen mit einem sehr viel höheren Durchsatz
- der Erhöhung des Abbrandes der wiederaufzuarbeitenden Brennelemente
- genehmigungstechnischen Auflagen, einschliesslich der Minimierung der Abgabe radioaktiver Stoffe.

Schwerpunktmässig seien einige Beispiele genannt, die zur *Kennzeichnung des Entwicklungsstandes* und zum Verständnis für die Aufwendungen der Grossforschungseinrichtungen notwendig sind.

1. Beginnen wir mit dem Teilschritt der *Wiederaufarbeitung*. Zunächst ist darauf hinzuweisen, dass sich das für die Wiederaufarbeitung weltweit gewählte *PUREX-Verfahren* in 20jährigem Betrieb bei der Verarbeitung von ca. 600 t oxidischer Brennelemente bewährt hat. Bei diesem Verfahren wird der Brennstoff in Salpetersäure aufgelöst und das

Uran und Plutonium aus der salpetersauren Lösung mit Hilfe von Tributylphosphat extrahiert, während die Spaltprodukte in der salpetersauren Lösung verbleiben. Nach den gemachten Erfahrungen besteht keine Notwendigkeit, neue Wiederaufarbeitungsverfahren für Leichtwasserreaktor-Brennelemente zu entwickeln.

Die Forderung nach Minimierung der Abgabe radioaktiver Spaltgase an die Umwelt bei der Wiederaufarbeitung macht die *Entwicklung und Erprobung entsprechender Abgasreinigungsanlagen* zur Rückhaltung des *Kryptons 85, Jods 129* und *Tritiums* erforderlich. Sowohl in Karlsruhe als auch in Jülich – hier mit Schwergewicht auf Hochtemperaturreaktor-Wiederaufarbeitung – wird seit Jahren intensiv an der Entwicklung entsprechender Verfahren und ihrer Erprobung gearbeitet. Für die *Edelgasabtrennung* ist hierbei das Verfahren der *Tieftemperaturrektifikation,* für die Jodrückhaltung die *Absorption an silberimprägnierten porösen Feststoffen* vorgesehen. Das in Karlsruhe entwickelte *Jodfilter* hat den Nachweis seiner Funktionsfähigkeit im aktiven Betrieb der WAK bereits erbracht. Aber auch bei den anderen Abgasreinigungsschritten sind die Entwicklungsarbeiten so weit fortgeschritten, dass mit dem Einbau einer entsprechenden Prototypanlage in die WAK zur aktiven Erprobung in nächster Zeit begonnen werden soll.

2. Der sehr viel höhere Durchsatz einer Wiederaufarbeitungsanlage bei gleichzeitiger Erhöhung des Abbrandes, das heisst des Plutoniumgehaltes der Brennelemente, erschwert die *geometrisch sichere Auslegung der Apparate gegen Kritikalitätsunfälle.* Geometrisch sicher heisst, dass die Querschnitte der Rohrleitungen und Apparate so bemessen sind, dass es nicht zur Ansammlung einer kritischen Masse von zum Beispiel Plutonium mit der daraus folgenden Kettenreaktion kommen darf. Es sei an dieser Stelle nachdrücklich betont: Kritikalitätsunfälle haben nichts mit nuklearen Explosionen im landläufigen Sinn zu tun. Die Energiefreisetzung entspricht der von einigen Litern Benzin, die daraus resultierenden mechanischen Schäden sind gering. Gefährlich ist die blitzartige Strahlungsfreisetzung, die in unmittelbarer Nähe zu sehr hohen Dosiswerten führen kann.

Zur Erhöhung der Sicherheit gegen Unfälle dieser Art ist anzustreben, stark *neutronenabsorbierende Werkstoffe für den Bau bestimmter Apparate* zu verwenden. Hierdurch können Probleme, die bei der sogenannten *homogenen Vergiftung,* das heisst der Zugabe neutronenabsorbierender Stoffe in die Spaltstofflösung, entstehen, vermieden werden. Vom Kernforschungszentrum Karlsruhe werden gemeinsam mit der Industrie sehr erfolgversprechende Entwicklungen auf diesem Sektor vorangetrieben.

3. Die Wiederaufarbeitung hochabgebrannter Brennelemente führt wegen der höheren Radioaktivität zu einer stärkeren Zersetzung des Extraktionsmittels, was zu Schwierigkeiten bei den nachfolgenden Verfahrensschritten sowie zu geringeren Plutonium-Ausbeuten führen kann.

Die Entwicklung und Erprobung von *Extraktionsapparaten,* bei denen die Kontaktzeit zwischen Extraktionsmittel und Spaltprodukten möglichst gering ist, sowie die *Verbesserungen der chemischen Fliessschemata* zur Vermeidung der oben genannten Probleme, sind wichtige Forschungs- und Entwicklungsaufgaben auf diesem Gebiet.

4. Wie gezeigt wurde, entstehen bei der Wiederaufarbeitung grössere Volumina *mittel- beziehungsweise schwachaktiver Abfälle,* die jedoch nur weniger als 1% der gesamten radioaktiven Spaltprodukte enthalten. Die relativ grosse Menge entsteht durch *inaktive Ballaststoffe,* die in Form von *Prozesschemikalien* dem Wiederaufarbeitungsprozess zugeführt werden. Es muss deshalb das Ziel sein, die *Abfallvolumina zu reduzieren.* Dies kann geschehen durch

- Verwendung elektrolytischer Verfahren anstelle von chemischen Umsetzungsprozessen
- Verwendung von leicht in schadlose gasförmige Stoffe umsetzbare Reagenzien
- Regeneration und Rückführung der Einsatzstoffe.

Auf allen drei Bereichen, die sowohl unter dem Gesichtspunkt der *Verfahrensoptimierung* und *Erhöhung der betrieblichen Verfügbarkeit* als auch der *Verminderung der Schadstoffabgabe* zu sehen sind, arbeitet die Gesellschaft für Kernforschung seit vielen Jahren erfolgreich, wie zahlreiche patentierte Verfahrensneuentwicklungen zeigen. Zeitbestimmender Schritt bei der Entwicklung ist fast immer die erforderliche halbtechnische Erprobung unter aktiven Bedingungen.

5. Bei der Abfallbehandlung und Endkonditionierung liegen die Schwerpunkte der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf der *Verfahrensentwicklung zur Verfestigung des hochaktiven Abfalls.* Die *chemische Einbindung* der hochaktiven Spaltprodukte *in Gläser* gilt weltweit als das erfolgversprechendste Verfahren, weil Gläser nach unseren Kenntnissen die beste Kombination der vom endzulagernden Produkt zu fordernden Eigenschaften aufweisen. So zielen auch alle drei der in der Bundesrepublik verfolgten Verfahren auf die Verglasung der Spaltprodukte. Allen Verfahren gemeinsam sind die Teilschritte *Denitrierung* des Abfalls, *Trocknung bzw. Kalzinierung* und *Schmelzen* einschliesslich der notwendigen *Abgasbehandlung.* Zwei dieser Verfahren werden in Grossforschungseinrichtungen, nämlich in Jülich und in Karlsruhe, entwickelt. Sowohl für das in Jülich entwickelte ursprünglich für den hochaktiven Abfall der Hochtemperaturreaktor-Wiederaufarbeitung konzipierte FIPS-Verfahren wie auch für das in Karlsruhe entwickelte VERA-Verfahren steht die aktive Erprobung im technischen Massstab noch aus. Dies gilt auch für das Verfahren der Firma Gelsenberg. Diese *Erprobung muss etwa Anfang der 80er Jahre erfolgen,* wenn der Terminplan, der eine Verglasung der hochaktiven Abfälle (HAW) mehrere Jahre

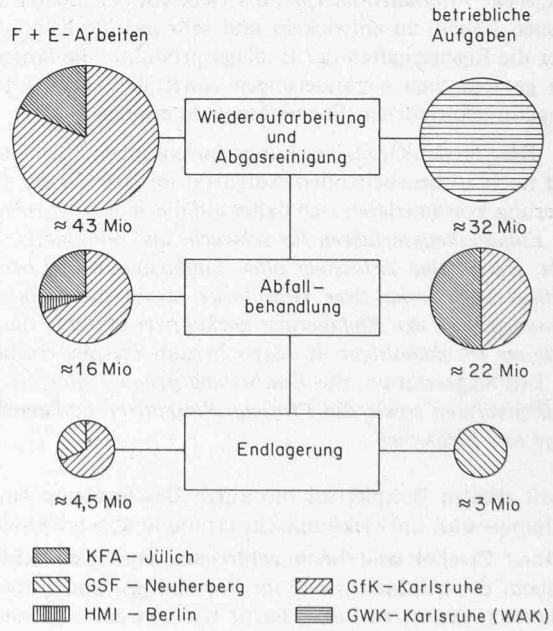

Bild 8. Aufwendungen der Grossforschungseinrichtungen auf dem Gebiet der nuklearen Entsorgung für das Jahr 1976

nach Beginn der Wiederaufarbeitung vorsieht, eingehalten werden soll. Beim Hahn-Meitner-Institut sind Arbeiten zur HAW-Verfestigung primär auf die Produkteigenschaften und deren Verbesserung ausgerichtet.

Auf dem Gebiet der weniger aktiven Abfälle liegt die Zielsetzung in einer Optimierung bereits erprobter Verfahren, Verbesserung der Produkteigenschaften sowie Entwicklung von Konditionierungsverfahren für spezielle zum Beispiel tritium- und α-haltige Abfälle.

6. Als letztes Beispiel für die umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsaufgaben im Bereich der Entsorgung möchte ich die *Endlagerung* radioaktiver Abfälle ansprechen, die in der Öffentlichkeit häufig ungeprüft zum völlig ungelösten Problem erklärt wird und Anlass für ein Schreckensszenario ist. Es erscheint deshalb angebracht, ein paar Worte zum *Gefährdungspotential* eines Endlagers zu sagen, wobei das Augenmerk auf die hochaktiven Abfälle zu richten ist, die in verglaster Form in tiefen Steinsalzschichten eingelagert werden sollen. Alle Überlegungen und Modellvorstellungen zeigen, dass selbst bei einiger Aktivitätsfreisetzung im Endlager, zum Beispiel durch Wassereinbruch bei gleichzeitiger Schädigung der isolierenden geologischen Schichten, eine gefährliche Verunreinigung der Erdoberfläche praktisch undenkbar ist. In diese Überlegungen gehen ein die hohe Auslaugbeständigkeit der Gläser, die extrem niedrige Wanderungsgeschwindigkeit zum Beispiel des Plutoniums relativ zur Strömungsgeschwindigkeit des Wassers im Boden sowie die Erniedrigung der spezifischen Aktivität beim Transport durch Abklingen und insbesondere durch Dispersion.

Es ist also nicht nur die Wahrscheinlichkeit eines solchen Störfalles wegen der langzeitigen Stabilität der geologischen Formationen äusserst gering, vielmehr sind auch die Folgen eines solchen Störfalles nach unseren Kenntnissen und Vorstellungen so begrenzt, dass das Gesamtrisiko eines Unfalles sicher als viel geringer einzustufen ist als das anderer technischer Einrichtungen und Prozesse. Selbstverständlich bedeutet dies nicht, dass es bei der Endlagerung keine zu lösenden Aufgaben mehr gibt. Gerade der *extrem langfristige Aspekt*, der es nicht möglich macht, den experimentellen Nachweis der säkular sicheren Endlagerung in allen Punkten zu erbringen, zwingt uns, in die Sicherheitsbetrachtungen auch *extrem unwahrscheinliche Ereignisse* einzubeziehen, *mehr Alternativkonzepte*, als vielleicht bei anderen Problemen üblich, zu entwickeln und sehr genaue Kenntnisse über die Eigenschaften der Endlagerprodukte, die langzeitigen geologischen Veränderungen sowie die Transportvorgänge in geologischen Formationen zu erlangen.

Die von den Grossforschungseinrichtungen bearbeiteten und noch zu bearbeitenden Aufgaben im Bereich der Endlagerung konzentrieren sich daher auf die *Weiterentwicklung der Einlagerungsverfahren für schwach- und mittelaktive Abfälle*, die *genaue Erfassung aller Einflussparameter bei der Endlagerung hochaktiver Glasblöcke* sowie die *praktische Demonstration der Einlagerung hochaktiver Abfälle*, die *Beseitigung tritiumhaltiger Abwässer* in zum Beispiel erschöpften Erdöllagerstätten, die *Erarbeitung genauer Störfall- und Risikoanalysen* sowie die *Prüfung alternativer Endlagerkonzepte und Strategien*.

Mit diesem Beispiel sei die kurze Beschreibung einiger Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte abgeschlossen.

Ohne Zweifel sind noch zahlreiche, zum Teil schwere Aufgaben, die keineswegs nur im Forschungs- und Entwicklungsbereich liegen, zu lösen, bevor wir von einer grosstechnisch erprobten, routinemässigen Entsorgung sprechen können. Es ist aber nicht, wie es manchmal unterstellt wird, unbegründeter und verblendeter Optimismus, auf Grund dessen wir von der rechtzeitigen und voll befriedigenden Lösung der technischen Aufgaben überzeugt sind, sondern jahrelange, zum Teil auch leidvolle Erfahrungen auf diesem Gebiet und eine sachliche, realistische Beurteilung der gesamten Problematik.

Fragen der Zusammenarbeit

Sollen die Grossforschungseinrichtungen die ihnen zugewiesene Rolle erfolgreich ausfüllen, so müssen hierzu nicht nur die materiellen und personellen Voraussetzungen zur Durchführung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten vorhanden sein, vielmehr müssen auch Form und Geist der *Kooperation mit dem industriellen Partner* so sein, dass eine vertrauensvolle und effektive Zusammenarbeit gewährleistet ist. Fragen des Umfanges des Kenntnisaustauschs beziehungsweise eines Kenntnispools, der Eigentums- und Verwertungsrechte der Kenntnisse der Partner, Fragen der Abstimmungsverfahren und der Arbeitssteuerung in einer Kooperation, der Verantwortungsabgrenzung, der Exklusivität einer Zusammenarbeit, all dieses sind Punkte, die bei der Festlegung optimaler Zusammenarbeitsformen sowohl unter politischen und wirtschaftlichen Aspekten als aber auch unter dem Gesichtspunkt der Motivation der Mitarbeiter gesehen werden müssen. Da diese Fragen keineswegs spezifisch für die Entsorgung sind, sondern grundsätzliche Bedeutung haben und damit den Rahmen dieses Referates überschreiten, soll hier nicht weiter darauf eingegangen werden.

Nicht nur die Zusammenarbeit mit den industriellen Partnern und den politischen Stellen ist für das Gelingen von Bedeutung, vielmehr muss sie auch zwischen den einzelnen Grossforschungseinrichtungen zu einer optimalen Steuerung der Forschungs- und Entwicklungsaufgaben führen. Die AGF hat bereits in einer frühen Phase durch Gründung von Koordinierungsausschüssen für verschiedene Schwerpunkte, so auch bei der Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung für eine Abstimmung zwischen den Forschungszentren gesorgt. In manchen Fällen mag eine noch stärker formalisierte Kooperation mit einer zentrumsübergreifenden Leitung eines Forschungs- und Entwicklungsvorhabens notwendig und wünschenswert sein. Im Bereich der Endlagerung versuchen zur Zeit die Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung und die Gesellschaft für Kernforschung dies durch die Bildung einer Arbeitsgemeinschaft mit einer zentralen Leitung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten beider Gesellschaften auf diesem Gebiet zu erreichen.

Es erübrigt sich fast, an dieser Stelle auf die Bedeutung der *internationalen* Zusammenarbeit gerade im Bereich der Entsorgung hinzuweisen. Dies sei nur der Vollständigkeit halber getan. Wir hoffen, dass die auf verschiedenen Teilgebieten der Entsorgung existierenden zum Teil sehr engen Kooperationen mit *Frankreich, Grossbritannien* und den *USA* auch in Zukunft bestehen bleiben oder sogar weiter intensiviert werden.

Schlussbemerkung

Es ist die Absicht dieser Ausführungen, den Leser mit der Rolle der Grossforschungseinrichtungen beim Aufbau eines nuklearen Entsorgungssystems und bei der Weiterentwicklung dieses Teils der Kerntechnik ein wenig vertraut zu machen. Sollten sie darüberhinaus die Kenntnisse über die Vorgänge und Probleme der Entsorgung vertieft haben, ist das gesteckte Ziel erreicht.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. *H. Böhm*, Mitglied des Vorstandes der Gesellschaft für Kernforschung mbH, Kernforschungszentrum, Postfach 3640, D-7500 Karlsruhe.