

BEIRAT FÜR FRAGEN DES KERNENERGIEAUSSTIEGS (BFK)

---

## Konzept

### einer dezentralen Umgangsstrategie für Brennelemente

ENDBERICHT

Februar 1997

Erstellt von Dipl.-Phys. Wolfgang Neumann  
im Rahmen eines Beratungsauftrages des Niedersächsischen Umweltministeriums

## Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	3
1. Einleitung	4
2. Mögliche Entsorgungs- bzw. Umgangsstrategien bis zurendlagerung	5
2.1 Grundkonzepte	5
2.1.1 Gegenwärtig verfolgtes Konzept	5
2.1.2 Alternatives Konzept	6
2.1.3 Endlagerbehälter Pollux	6
2.2 Umsetzungsvarianten für den dezentralen Umgang mit Brennelementen	7
2.2.1 Zwischenlagertechnik	7
2.2.2 Vorkonditionierung	7
2.2.3 Zeitpunkt für die endlagerfähige Konditionierung	8
2.3 Internationaler Vergleich	9
2.4 Stand der Beiratsdiskussion	9
3. Kriterien für die Auswahl des Umgangskonzeptes	12
4. Vergleich von zentralem und dezentralem Umgang	13
4.1 Vorkonditionierung	13
4.2 Gesamtumgangspfade	15
4.2.1 Bewertung bzgl. Lagertechnik	19
4.2.2 Bewertung bzgl. Handhabung Brennelemente/Büchsen	20
4.2.3 Bewertung bzgl. Handhabung Behälter	20
4.2.4 Bewertung bzgl. Transporte	22
4.2.5 Gesamtbeurteilung	23

5. Umsetzung der dezentralen Zwischenlagerung von Brennelementen	27
5.1 Technische Machbarkeit dezentraler Zwischenlagerung	27
5.2 Praktische Umsetzbarkeit dezentraler Zwischenlagerung	29
5.2.1 Anfall von Brennelementen	29
5.2.2 Lagerkapazitäten	30
5.2.3 Umsetzung an den Standorten	31
6. Dezentrale Konditionierung von Brennelementen	34
6.1 Vorliegende Studien zur Brennelementkonditionierung	34
6.2 Machbarkeit dezentraler Konditionierung	38
6.2.1 Nasse Konditionierung	39
6.2.2 Trockene Konditionierung	40
7. Zusammenfassung	42
8. Ausblick für Phase 2	44
Literaturverzeichnis	45
Tabellenverzeichnis	48

## Abkürzungen

Folgende Abkürzungen werden in Text und Tabellen verwendet:

BE	Brennelement
BLG	Brennelementlager-Gesellschaft mbH
BS	Brennstab
BZA	Brennelementzwischenlager Ahaus
DWR	Druckwasserreaktor
EVU	Energieversorgungsunternehmen
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH
KKE	Kernkraftwerk Emsland
KKS	Kernkraftwerk Stade
KKU	Kernkraftwerk Unterweser
KWG	Gemeinschaftskernkraftwerk Grohnde
KWO	Kernkraftwerk Obrigheim
KWW	Kernkraftwerk Würgassen
MOX	Mischoxid (Plutonium und Uran)
NMU	Niedersächsisches Umweltministerium
SWR	Siedewasserreaktor
TBL	Transportbehälterlager Gorleben
tSM	Tonnen Schwermetall (Kernbrennstoff)

## 1. Einleitung

Für die Überlegungen im Niedersächsischen Umweltministerium (NMU) zur bundesweiten Diskussion über sogenannte Entsorgungsanlagen im Rahmen des gültigen Entsorgungskonzeptes der Bundesregierung und möglichen Alternativen hierzu ist es notwendig, eine Vertiefung der Begründung und eine Konkretisierung des Ansatzes "dezentrale Entsorgung" (bezogen auf Zwischenlagerung und Konditionierung) vorzunehmen.

Mit diesem Beratungsauftrag soll das Ziel der Niedersächsischen Landesregierung, Ausstieg aus der Atomenergie, für einen Teilbereich konkretisiert werden. Es geht hier um die Schritte der sogenannten Entsorgung von bestrahlten Brennelementen nach der Entladung aus dem Reaktorkern bis zum letzten Schritt vor der Einlagerung in ein Endlager für hochaktive Abfälle. Zwei realistische Randbedingungen sind dabei zu beachten:

- Erstens steht der Standort für das Endlager bisher nicht fest. Der vorgesehene Standort Gorleben wird hinsichtlich seiner Eignung kontrovers diskutiert.
- Zweitens bleibt die Wiederaufarbeitung auf die Abarbeitung der sogenannten Altverträge beschränkt. Das heißt, die folgenden Konzeptüberlegungen beziehen sich auf die durch diese Altverträge nicht abgedeckten Brennelemente.

Für eine sinnvolle Entsorgungsstrategie ist es weiterhin notwendig, die zu behandelnde Menge der Brennelemente zu kennen. Ihre Größenordnung muß definitiv feststehen, um über die Höhe der einzurichtenden Lagerkapazitäten und - unter Strahlenminimierungsgesichtspunkten - über Lagertechnik und -ort entscheiden zu können. Diese Voraussetzungen werden durch einen festgelegten Ausstieg aus der Atomenergienutzung und damit die Abschaltung aller Reaktoren in bestimmten Zeiträumen am besten erfüllt.

In der hier vorgelegten Phase I des Beratungsauftrages sollen die Vor- und Nachteile des dezentralen Umgangs mit Brennelementen (Zwischenlagerung und Konditionierung) ermittelt sowie die grundsätzliche Möglichkeit der Umsetzung diskutiert werden. Dabei werden die Überlegungen am Beispiel der niedersächsischen Kernkraftwerke dargestellt. In einer zweiten Phase kann dann eine Konkretisierung der notwendigen Maßnahmen an den einzelnen Kraftwerksstandorten erfolgen.

Es handelt sich um eine hauptsächlich konzeptionelle Arbeit. Daher kann die Sicherheit der für die Umgangsschritte notwendigen Anlagen hier nicht detailliert untersucht werden.

## 2. Mögliche Entsorgungs- bzw. Umgangsstrategien bis zur Endlagerung

### 2.1 Grundkonzepte

Prinzipiell stehen sich zwei Ansätze für die Behandlung bestrahlter Brennelemente nach ihrer Entladung aus dem Reaktorkern gegenüber. Es gibt die Möglichkeiten (nach einer gewissen Abklingzeit), Lagerung und Konditionierung an zentralen Standorten stattfinden zu lassen oder sie dezentral an den jeweiligen Kernkraftwerksstandorten durchzuführen.

#### 2.1.1 Gegenwärtig verfolgtes Konzept

Bisher wird von der Bundesregierung und den Betreibern ein zentraler Umgang verfolgt. Dieses Konzept sieht im einzelnen folgendermaßen aus:

Die Brennelemente werden für einige Jahre im Naßlager des Kernkraftwerkes gelagert. Sie werden dann in einen Transport- und Lagerbehälter geladen und zu einem zentralen Zwischenlager (trockene Behälterlagerung) transportiert (z.Z. Ahaus oder Gorleben). Nach einem von verschiedenen Randbedingungen abhängigen Zeitraum wird der beladene Behälter zu einer zentralen Konditionierungsanlage transportiert. Dort werden die BE entladen und für die Endlagerung konditioniert. Nach gegenwärtigem Referenz-Konzept besteht die Konditionierung der Brennelemente in ihrer Zerlegung, der Verdichtung der Brennstäbe, der Kompaktierung der Strukturteile und entweder der gemeinsamen Verpackung in einen POLLUX-Behälter oder der Verpackung der Brennstäbe in einen POLLUX- und die Verpackung der kompaktierten Strukturteile in einen separaten Behälter. Die entstandenen Gebinde erfüllen laut Betreiber die derzeit vorläufigen Endlagerbedingungen. Der POLLUX-Behälter ist allerdings nicht nur für die Endlagerung, sondern auch für den Transport und die Zwischenlagerung ausgelegt. Ob der POLLUX nach Verlassen der Konditionierungsanlage direkt zum Endlager transportiert werden kann, oder zunächst wieder in ein zentrales Zwischenlager und zu einem späteren Zeitpunkt in das Endlager transportiert wird, hängt zum Beispiel davon ab, ob zu diesem Zeitpunkt das Endlager bereits betriebsbereit ist bzw. nach Abschluß der Konditionierung der Endlagergebinde die jeweilige direkte Annahme und Einlagerung im Endlager logistisch möglich ist.

Für die bestrahlten Brennelemente, die auch im Rahmen der bis 1994 grundsätzlich eingesetzten Entsorgungsstrategie mit Wiederaufarbeitung nicht wiederaufgearbeitet werden sollten oder konnten, wurde der direkte Weg aus der Konditionierungsanlage in das Endlager (ohne weitere Zwischenlagerung) vorausgesetzt. Bei der jetzt möglichen Strategie der Direkten Endlagerung aller noch anfallenden Brennelemente wird das Problem der erneuteten Zwischenlagerung in allgemeinen Darstellungen stillschweigend übergangen. Es ist jedoch kein Papier bekannt, in dem die Überflüssigkeit dieser Zwischenlagerung definitiv behauptet wird. Im Gegenteil wird sie von Industrievertretern für ihre Konzeptüberlegungen als möglich benannt [HAWICKHORST 1994]:

„Eine nochmalige Zwischenlagerung der endlagergerecht verpackten Brennelemente zum Abklingen der Wärmeentwicklung der Endlagergebinde kann nach dem Konzept der Behälterlagerung ebenfalls in den für die Zwischenlagerung abgebrannter Brennelemente vorgesehenen Lagerhallen erfolgen.“

In jüngster Zeit ist einigen Publikationen zu entnehmen, daß dieses Konzept durch eine sogenannte Konsolidierung der Brennelemente ergänzt werden könnte [HENSING 1995].

Hierbei sollen nach Abtrennung von Kopf- und Fußteil der Brennelemente die Brennstäbe dichter gepackt werden, vergleichbar mit dem Konditionierungsschritt zur Endlagerung. Dieser Schritt soll erfolgen, wenn die Wärmeentwicklung soweit abgenommen hat, daß die Wärmeabfuhr aus einem Behälter vom Typ CASTOR V/19 für die doppelte Menge Kernbrennstoff möglich ist. Anstatt der ursprünglichen 19 DWR-Brennelemente sollen dann, teilweise zerlegt, 38 Brennelemente in einem Behälter zwischengelagert werden.

### 2.1.2 Alternatives Konzept

Im Gegensatz hierzu steht das dezentrale Konzept. Dieses wird von Atomkraftkritikern im Zusammenhang mit dem Ausstieg aus der Atomenergienutzung zur Stromproduktion (siehe z.B. [NEUMANN 1990], [GP 1992], [GÖK 1993], [HIRSCH 1994]) vorgeschlagen, aber auch in der Atomindustrie intern (mindestens in bezug auf die Zwischenlagerung) nicht ausgeschlossen. Für das letztere gibt es zumindest in Hinblick auf die Zwischenlagerung Hinweise aufgrund persönlicher Gespräche des Autors mit Industrievertretern, der Entwicklung eines neuen Siedewasserreaktors von Siemens mit einer Lagerkapazität von 40 Betriebsjahren [ATW 1994] sowie der gleichberechtigten Behandlung zentraler und dezentraler Konzepte in Berichten der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit [GRS 1992].

Ein dezentrales Umgangskonzept beinhaltet nach einer mehrjährigen Zwischenlagerung im Naßlager des Reaktors die Überführung der BE in ein am Kraftwerksstandort befindliches Zwischenlager. Die Konditionierung in einen Endlagerbehälter soll ebenfalls, vor oder nach Überführung in das Standort-Zwischenlager, am Kraftwerksstandort erfolgen. Das heißt, mehrere Standorte für Atomanlagen (Zwischenlager, Konditionierungsanlage) werden überflüssig und die Zahl der Transporte wird reduziert. Es ist dann nur noch ein Transport in dem zur Einlagerung vorgesehenen Behälter vom Kraftwerksstandort zum betriebsbereiten Endlager erforderlich. Zu den Einzelschritten siehe Kapitel 4.2.

Denkbar ist darüber hinaus ein Konzept, das zwischen dem zentralen (Kapitel 2.1.1) und dem dezentralen Konzept liegt. Also dezentrale Zwischenlagerung und zentrale Konditionierung.

### 2.1.3 Endlagerbehälter Pollux

Für die Endlagerung bestrahlter Brennelemente wurde in der Bundesrepublik das POLLUX-Behältersystem entwickelt. Das System besteht aus drei Teilen:

Einer Stahlbüchse, in die die Brennelemente bzw. nach einer Zerlegung die Brennstäbe eingebracht werden. Die Stahlbüchse wird mit einem Deckel verschlossen.

Einem Innenbehälter, in den die Büchsen eingebracht werden. Er besteht aus Baustahl mit einer Wanddicke von 160 mm. Der Innenbehälter wird zunächst mit einem Primärdeckel verschraubt und anschließend ein Sekundärdeckel aufgeschweißt. Diese Schweißnaht soll die Garantie für eine dichte und dauerhafte Barriere während Transport, Zwischen- und Endlagerung übernehmen. Falls für das endgültige Endlagerkonzept erforderlich, soll der gesamte Innenbehälter mit einer Korrosionsschutzschicht überzogen werden.

Einem Abschirmbehälter, in den der Innenbehälter eingestellt wird. Er besteht aus dem Gußwerkstoff GGG 40 (gleicher Werkstoff wie beim CASTOR) mit einer Wanddicke von 265 mm. In den Wänden befinden sich zwei versetzte Bohrungsreihen, die zur Aufnahme von Absorber-/Moderatormaterial dienen. Der Abschirmbehälter wird mit einem Deckel ohne Dichtfunktion verschraubt. Die Hauptaufgaben des Abschirmbehälters sind die Reduzierung der Gamma- und Neutronendosisleistung und die Abtragung des Gebirgsdruckes bei der Endlagerung.

Nach gegenwärtigem Stand gibt es für den POLLUX drei Beladungskonfigurationen:

- Aufnahme von 10 (30) in Brennstäbe zerlegten DWR-(SWR-)Brennelementen,
- Aufnahme von 8 (24) in Brennstäbe zerlegten DWR-(SWR-)Brennelementen und deren kompaktierte Strukturteile,
- Aufnahme von 4 unzerlegten DWR-Brennelementen.

Von der Industrie favorisiert wird im Moment offenbar die erste Variante [JANBERG 1996].

Für MOX-Brennelemente verringern sich die genannten Zahlen geringfügig.

Der Pollux-Behälter ist konzeptionell sowohl für eine zentrale wie auch für eine dezentrale Entsorgungsstrategie geeignet. Da der Stand der Entwicklung weit voran geschritten ist, wird für die in diesem Beratungsauftrag angestellten Überlegungen der POLLUX als das zu berücksichtigende Endlagerungsbehältersystem vorausgesetzt. Sicherheitstechnische Aussagen zur Konstruktion des Behälters werden hier nicht getroffen.

## 2.2 Umsetzungsvarianten für den dezentralen Umgang mit Brennelementen

Die in diesem Kapitel beschriebenen Umsetzungsvarianten wären zum Teil auch im Rahmen der zentralen Entsorgung umsetzbar.

### 2.2.1 Zwischenlagertechnik

Für die Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente gibt es nach gegenwärtigem Stand drei Lagertechniken:

Naßlager, entsprechend den Abklingbecken bzw. Kompaktlagern am Reaktor. Hier können die Brennelemente entweder direkt oder bereits in Büchsen verpackt eingelagert werden. Die Wärmeabfuhr erfolgt über das Wasser.

Betonblocklager. Hier werden die Brennelemente, einzeln oder mehrere, in Büchsen verschweißt und dann in Lagergestellen oder Einzelbohrungen in Betonblöcken eingebracht. Die Wärmeabfuhr erfolgt über den Luftstrom.

Behälterlager, entsprechend den Transportbehälterlagern Gorleben und Ahaus. Hier können die Brennelemente entweder in Transport- und Lagerbehältern, z.B. vom Typ CASTOR, oder in gleichzeitig für die Endlagerung vorgesehene Behälter, z.B. vom Typ POLLUX, eingelagert werden. Die Wärmeabfuhr erfolgt über den Luftstrom.

Im Rahmen dieses Beratungsauftrages kann nicht untersucht werden, welche der drei Lagertechniken unter Sicherheitsgesichtspunkten die geeignetste ist. Dies muß einer gesonderten Bewertung vorbehalten bleiben. Bei theoretischer Betrachtung von zu stellenden Anforderungen wie zum Beispiel flugzeugabsturzsichere Lagerung, passive Kühlsysteme und in der Umgebung nicht meßbare Freisetzung radioaktiver Stoffe durch den Betrieb ist dies für alle drei Techniken erreichbar. Die praktische Umsetzung dürfte jedoch für die Naß- und Betonblocktechnik schwieriger und wahrscheinlich auch teurer sein. Von Betreiberverseite werden alle drei Lagertechniken als durchführbar angesehen [BANCK 1992]. Im folgenden wird die Eignung hauptsächlich aufgrund konzeptioneller Kriterien betrachtet.

### 2.2.2 Vorkonditionierung

Unter Vorkonditionierung werden hier die Behandlungsschritte für die Brennelemente bis zu ihrer Verpackung in Büchsen verstanden. Das heißt anders gesagt, in welcher Konfiguration sich der Kernbrennstoff bei seiner Einbüchsung befindet. Von den vielen Möglichkeiten der Vorkonditionierung von bestrahlten Brennelementen bzw. von Kernbrennstoff für

die Endlagerung wurden in der Bundesrepublik bereits sehr früh (im Rahmen des BMFT-Projektes "Andere Entsorgungstechniken") drei bevorzugte Möglichkeiten herausgefiltert.

- 1) Verpackung unbearbeiteter Brennelemente, also keine Vorkonditionierungsschritte.
- 2) Zerlegung der Brennelemente in Brennstäbe und Verpackung mit Verdichtung der Brennstäbe sowie Kompaktierung der Strukturteile.
- 3) Wie 2., mit zusätzlicher Zersägung der Brennstäbe in 1 m lange Stücke.

Die letzte Variante wurde inzwischen praktisch aufgegeben, d.h. der Antragsteller hat zunächst sein Bescheidinteresse im Genehmigungsverfahren zurückgestellt. Sie wäre auch die am wenigsten akzeptable Variante, da durch den Integritätsverlust der Brennstäbe Freisetzung und Strahlenbelastung erhöht würden und darüber hinaus größere Mengen an radioaktiven Sekundärabfällen entstehen würden.

Da für 1) keine Vorkonditionierungsschritte notwendig sind, stellt aus heutiger Sicht nur 2) eine realistische Möglichkeit der Vorkonditionierung dar. Diese kann jedoch nur in Zusammenhang mit mindestens dem ersten Schritt zur endlagerfähigen Konditionierung, dem Einbringen in die Büchsen des POLLUX-Systems, erfolgen. Andernfalls müßte für zerlegte Brennelemente eine eigene Lagertechnik entwickelt werden.

### 2.2.3 Zeitpunkt für die endlagerfähige Konditionierung

In der Phase zwischen der Entladung der Brennelemente aus dem Reaktorkern und ihrer Endlagerung können bezüglich der vorzunehmenden Zwischenlagerung in konzeptioneller Hinsicht verschiedene Zeitpunkte für die Konditionierung der Brennelemente in POLLUX-Behälter gewählt werden. Die Möglichkeit hierzu ist abhängig von der Lagertechnik. Randbedingung ist, daß die endgültige Konditionierung in den POLLUX-Behälter wegen dessen Auslegung frühestens nach 10 Jahren Abklingzeit erfolgen kann.

Soll die Konditionierung vollständig in einem Arbeitsablauf erfolgen, gibt es in konzeptioneller Hinsicht zwei sinnvolle Möglichkeiten für den Konditionierungszeitpunkt:

- Nach einer Abklingzeit der Brennelemente von mindestens 10 Jahren im Lagerbecken des Reaktors werden sie direkt in den POLLUX-Behälter konditioniert und dieser in der Lagerhalle am Standort zwischengelagert bis ein Endlager annahmebereit ist.
- Nach einer bestimmten Abklingzeit der Brennelemente im Lagerbecken des Reaktors werden sie in das Zwischenlager am Kraftwerksstandort verbracht und bleiben dort bis ein Endlager annahmebereit ist. Die Konditionierung für die Endlagerung erfolgt dann direkt vor dem Transport ins Endlager am Kraftwerksstandort. Die Art der Zwischenlagertechnik wäre in diesem Fall konzeptionell ohne Bedeutung.

Möglich wäre auch ein Mittelweg:

- Nach einer bestimmten Abklingzeit der Brennelemente im Lagerbecken des Reaktors erfolgt in zerlegtem (Vorkonditionierung) oder unzerlegtem Zustand ihre Einbringung in die zu verschweißenden Endlager-Büchsen des POLLUX-Systems. Die Büchsen werden in das Zwischenlager am Kraftwerksstandort verbracht und bleiben dort bis ein Endlager annahmebereit ist. Die Endkonditionierung, d.h. Einbringen der Büchsen in die POLLUX-Behälter, erfolgt dann am Kraftwerksstandort unmittelbar vor dem Transport ins Endlager. Als Lagertechnik kommen Naß-, Betonblock- und Behälter-(CASTOR-) Lager in Frage.

Die verschiedenen Zeitpunkte für die Konditionierungsschritte haben jeweils Vor- und Nachteile. Sicherheitstechnisch besteht die Gefahr von Korrosion der Brennlement-Hüllrohre oder der Büchsen. Befinden diese sich zu diesem Zeitpunkt noch nicht im Endlager-

behälter, so kann eine Schädigung während der Lagerung zu höheren Freisetzungsraten radioaktiver Stoffe und bei späterer Hantierung zu Störfällen führen, die ebenfalls erhöhte Strahlenbelastungen zur Folge haben. Andererseits können Schäden, die in der Zeit der Brennelementzwischenlagerung entstehen, noch unmittelbar vor ihrerendlagerung durch zusätzliche Konditionierungsmaßnahmen behoben und so die Auslaugresistenz von Radionukliden im Endlager wieder erhöht werden. Ein Nachteil frühzeitiger Endkonditionierung wäre, daß viele Endlagergebinde hergestellt würden, ohne die endgültigen Einlagerungsbedingungen für das Endlager zu kennen. Es könnten also zusätzliche Maßnahmen notwendig werden, um diese einzuhalten.

### 2.3 Internationaler Vergleich

Es werden im folgenden nur Konzepte aufgeführt, in deren Rahmen Wiederaufarbeitung nach gegenwärtigem Stand nicht vorgesehen ist.

Außer in der Bundesrepublik gibt es weltweit zur Zeit 5 Staaten mit größeren Stromerzeugungskapazitäten aus Atomkraft, für die klar ist, daß alle bzw. der größte Teil der bestrahlten Brennelemente direkt endgelagert werden sollen. Es sind dies Finnland, Kanada, Schweden, Spanien und die USA. In Finnland, Kanada, Spanien und den USA ist für die Zwischenlagerung bisher, mit wenigen Ausnahmen, die Naßlagerung am Kraftwerksstandort eingesetzt worden. In Schweden wird seit langer Zeit ein zentrales Naßlager (CLAB) betrieben. Die kanadischen Betreiber wollen in Zukunft auch trockene Behälterlagerung am Standort nutzen [NEI 1994]. Durch die mehrjährige Verzögerung und die auch jetzt noch nicht feststehende Inbetriebnahme eines Endlagers für bestrahlte Brennelemente werden in den USA weitere Kapazitätserhöhungen am Standort und inzwischen ebenfalls zentrale Zwischenlager geplant. Die Kapazitätserweiterungen an den Standorten sollen durch kompaktere Lagerung oder Konsolidierung im Naßlager bzw. durch trockene Behälterlagerung erreicht werden. Bei den zentralen Zwischenlagern handelt es sich sowohl um Betonblocklager wie auch um Behälterlager. Zur Entwicklung des damit zusammenhängenden sogenannten Multi-Purpose-Canister Konzepts siehe [HIRSCH 1994]. In Rußland wird die Naßlagerung am Standort für die Brennelemente aus RBMK-Reaktoren vorgenommen, ohne daß bisher endgültig deren direkte Endlagerung festgelegt ist.

In den USA sind Untersuchungen zur Konsolidierung von Druckwasserreaktor-Brennelementen durchgeführt worden, um die kraftwerkssinternen Lagerkapazitäten zu erhöhen. Von den 8 Versuchsanlagen wurde in 7 Anlagen die Konsolidierung unter Wasser und in einer Anlage die trockene Konsolidierung erprobt [NUKEM 1991, NEI 1993]. Die Brennstäbe wurden dabei in dünnwandige Behälter eingebracht, wobei eine Verdichtung von ca. 2:1 erreicht wurde.

Die Planung in Finnland, Kanada, Schweden, Schweiz (für Brennelemente, die nicht wiederaufgearbeitet werden) und den USA sieht die Endlagerung von unzerlegten Brennelementen in (unterschiedlich ausgelegten) Behältern vor. In den USA gibt es die Option, evtl. später auch Brennelemente zu zerlegen [GRS 1992]. Im Falle der vorherigen Konsolidierung werden die Behälter ohne weitere Bearbeitung in den Endlagerbehälter eingebracht.

### 2.4 Stand der Beiratsdiskussion

In einer Stellungnahme für den Beirat für Fragen des Kernenergieausstiegs (BFK) von 1993 werden bzgl. der Behandlung bestrahlter Brennelemente, die im Rahmen eines festgeleg-

ten Atomenergieausstiegs in der Bundesrepublik noch anfallen, folgende zu beachtende Grundsätze benannt [HIRSCH 1993]:

- Kein Zeitdruck bei der Realisierung der Endlagerung.
- Die notwendige Zwischenlagerkapazität muß durch den beschlossenen Ausstieg aus der Atomenergienutzung definiert sein.
- Die Konditionierung für die Endlagerung soll technisch möglichst einfach sein.
- Zwischenlagerung und Konditionierung sollten am Kernkraftwerksstandort realisiert werden.

Für einen "relativ zügig" abzuwickelnden Ausstiegsfahrplan wurden 1994 weitergehende konzeptionelle Überlegungen angestellt [HIRSCH 1994]. Die oben genannten Grundsätze wurden um konkretere Anforderungen, wie möglichst geringe Strahlenbelastung der Beschäftigten und Minimierung von Unfallrisiken, erweitert. Es blieben zwei Entsorgungskonzepte, die nicht von vornherein den gestellten Anforderungen entgegenstehen:

- A) Lagerung der BE im Naßlager (Abklingbecken) des Kernkraftwerkes - Konditionierung am Standort - Zwischenlagerung am Standort - Transport - zentrale Endlagerung.
- B) Lagerung der BE im Naßlager (Abklingbecken) des Kernkraftwerkes - Transport - Externe Zwischenlagerung - Transport - Konditionierung - Externe Zwischenlagerung - Transport - zentrale Endlagerung.

Der Variantenvergleich erbrachte insgesamt Vorteile für A). Es wurden jedoch weitere Arbeiten für notwendig gehalten, um eine besser abgesicherte Meinung bilden zu können.

Auf der Sitzung des zuständigen Beiratsausschusses im September 1995 wurde das o.g. Ergebnis diskutiert und die Notwendigkeit einer weiteren Konkretisierung festgestellt. In bezug auf den hier bearbeiteten Beratungsauftrag wurden in diesem Zusammenhang außerdem folgende relevanten Probleme benannt [BFK 1995]:

- a) Möglichkeiten der Umwandlung der Wiederaufarbeitungsverträge.
- b) Möglichkeit der dezentralen Zwischenlagerung in Endlagerbehältern.
- c) Genehmigungsrechtliche, technische und räumliche Möglichkeiten einer Konditionierung und Zwischenlagerung an niedersächsischen AKW-Standorten.

Zum Punkt a) ist allgemein bekannt, daß von bundesdeutschen EVU bezüglich der 1990 abgeschlossenen Neuverträge zumindest mit der COGEMA entsprechende Verhandlungen geführt werden. Dem NMU liegen nach eigenen Angaben zu dieser wichtigen Frage keine Informationen vor [NL 1996]. Nach Pressemeldungen wurden in den Verhandlungen neue Klauseln erreicht, die eine Rückholung der Brennelemente aus La Hague unter einfacherer und kostengünstigeren Bedingungen als ursprünglich erlauben [HAZ 1996].

Für diesen Beratungsauftrag standen die für die niedersächsische Kernkraftwerke vertraglich vereinbarten Zahlen für Wiederaufarbeitungsmengen, einschließlich Optionen, nicht zur Verfügung. Es wird daher hier der für die dezentrale Zwischenlagerung konservativste Fall angenommen, daß über die Basismengen der Altverträge hinaus keine Optionen wahrgenommen werden können und alle Brennelemente aus den „Neuverträgen“ in der Bundesrepublik verbleiben.

Der Punkt b) konnte bearbeitet werden (siehe folgende Kapitel). Bezüglich der aufgeworfenen Frage der Eignung des POLLUX für andere Endlagerformationen als Salz, enthalten verschiedene Betreiberveröffentlichungen die Aussage, daß dies durch verschiedene Korrosionsschutzmaßnahmen und ggf. durch eine andere Konstruktion und/oder Werkstoffwahl für den Abschirmbehälter möglich sei.

Trotz nicht einsehbarer Genehmigungsunterlagen (siehe auch [BFK 1995]) konnte für den Punkt c) ein in bezug auf den hier erreichten Detaillierungsgrad aussagekräftiges und belastbares Ergebnis erzielt werden.

Ein Vergleich zentrale/dezentrale Endlagerung wurde in einem Beratungsauftrag im Jahr 1993 bearbeitet [APPEL 1993]. Dezentral wird dort jedoch nicht im Sinne von 'an Kraftwerksstandorten' verstanden, sondern als Differenzierung nach entsprechenden Abfallkategorien. In dieser Studie wird die zentrale Endlagerung (ein Endlager für alles) als bessere Variante angesehen, unter der Voraussetzung, daß ein als geeignet nachgewiesener Endlagerstandort gefunden wird, dessen Kapazität ausreicht.

### 3. Kriterien für die Auswahl des Umgangskonzeptes

Im BFK wurden übergeordnete Randbedingungen bzw. Grundsätze für den Umgang mit Abfällen aus der Atomenergienutzung aufgestellt. Diese müssen bei der Entwicklung eines alternativen Umgangskonzeptes berücksichtigt werden. Sie lauten:

- I. Begrenzung der noch anfallenden bestrahlten Brennelemente und damit der benötigten Lagerkapazität durch Ausstieg aus der Atomenergie.
- II. Der Endlagerstandort steht gegenwärtig nicht fest.
- III. Die Zahl der Standorte für Atomanlagen muß möglichst gering sein.
- IV. Die Techniken für Konditionierung und Zwischenlagerung müssen so unkompliziert wie möglich sein.
- V. Konditionierung und Zwischenlagerung müssen in der Bundesrepublik Deutschland erfolgen.
- VI. Durch das Umgangskonzept für die Brennelemente dürfen die Optionen für Stilllegungskonzepte der Kraftwerke nicht beeinflußt werden.

Die Nummern III, IV und VI finden wie die folgenden Kriterien bei der Bewertung der Umgangspfade direkt Anwendung.

Um die für das Konzept nach Atomgesetz notwendige Vorsorge, z.B. weitgehende Vermeidung von Unfallrisiken sowie die nach Strahlenschutzverordnung vorgeschriebene Minimierung der Strahlenbelastung für Bevölkerung und Personal (§ 28) zu gewährleisten, sind folgende Kriterien zu beachten:

- (1) Die Zahl der Umgangsschritte muß möglichst gering sein. Das beinhaltet eine Minimierung der notwendigen Hantierungen und der durchzuführenden Transporte.
- (2) Die Freisetzung radioaktiver Stoffe muß minimiert sein.
- (3) Die Strahlenbelastung durch Direktstrahlung für Bevölkerung und Personal muß minimiert sein.
- (4) Das Volumen des Atommülls muß in Abwägung von Sicherheitsrisiken gering sein.
- (5) Die Transportstrecken sollen möglichst kurz sein.
- (6) Die Zahl der menschlichen Tätigkeiten für die Überwachung muß möglichst gering sein.
- (7) Die Proliferationssicherheit muß möglichst hoch sein.

Anhand dieser Kriterien wird der in den Kapiteln 4.1 (Vorkonditionierung) und 4.2 (Umgangspfade) beschriebene Umgang mit den Brennelementen bewertet.

## 4. Vergleich von zentralem und dezentralem Umgang

Zunächst eine grundsätzliche Bemerkung: Werden die in Kapitel 3 genannten Grundsätze für den Vergleich herangezogen, so ist, wie bereits in [HIRSCH 1994] dargelegt, eine zentrale Entsorgungsstrategie nicht sinnvoll umsetzbar, da der Endlagerstandort für die Bundesrepublik vorläufig nicht festgelegt werden kann und damit auch die Anforderung nach den gering zu haltenden Zahlen für Standorte von Atomanlagen und Transporte nicht erfüllbar ist. Selbst wenn Gorleben als Endlagerstandort zur Verfügung stehen sollte, wären die Anforderungen aufgrund des Standortes von einem der zentralen Zwischenlager (Ahaus) nicht erfüllt. Dies gilt erst recht beim Bau weiterer "zentraler" Zwischenlager, wie sie derzeit diskutiert werden.

Im folgenden sollen die Umgangsstrategien und die dafür notwendigen einzelnen Handhabungsschritte anhand der in Kapitel 3 benannten Kriterien geprüft werden. Bewertungen sind jeweils kursiv gedruckt. Als erstes wird die Frage der Vorkonditionierung diskutiert.

### 4.1 Vorkonditionierung

Die Frage der Art der Vorkonditionierung ist in ihrer isolierten Bewertung unabhängig von den weiteren Umgangspfaden zu betrachten, da prinzipiell die gleiche Vorkonditionierung für alle Pfade möglich ist. Eine Zerlegung der Brennelemente würde auch in bezug auf ihre Handhabungen in den verschiedenen Pfaden für alle Pfade gleichermaßen betreffen. Reduzierend würde sich die Zerlegung allerdings auf die Zahl der Behälterhandhabungen und der Transporte auswirken. Es wären auf der einen Seite nur halb so viele (POLLUX 8) bzw. knapp halb so viele (POLLUX 10) Transporte zum Endlager notwendig. Dafür wären andererseits zusätzlich Handhabungen und Transporte der durch Zerlegung zusätzlich anfallenden Sekundärabfälle zu berücksichtigen.

Entsprechend den Ausführungen in Kapitel 2.2.3 reduziert sich die Frage zur Vorkonditionierung darauf, ob die Brennelemente (BE) in Brennstäbe (BS) zerlegt werden sollen oder nicht. Diese beiden Varianten, Variante 1 (unzerlegte Brennelemente) und Variante 2 (Brennelemente zerlegt in Brennstäbe), wären grundsätzlich sowohl in einer zentralen Anlage, wie auch dezentral an den Kraftwerksstandorten durchführbar.

In Tabelle 1 sind die für die Vorkonditionierung notwendigen Handhabungsschritte angegeben. Unabhängig davon, ob die Vorkonditionierung unter Wasser oder in einer Heißen Zelle vorgenommen wird, zeigt bereits diese einfache Gegenüberstellung offensichtliche Vorteile für die Variante ohne Zerlegung. Allerdings sind hierbei die unterschiedlichen Zwischenlagerkapazitäten für die beiden Varianten sowie die integralen Kosten nicht berücksichtigt.

Prüfung anhand der Kriterien aus Kapitel 3:

- (1) Die Zahl der Hantierungen ist für die Variante 1 (unzerlegte Brennelemente) deutlich kleiner. Die Zahl der Transporte ist für die Variante 2 (Brennelemente zerlegt in Brennstäbe) um den Faktor 0,5 bzw. 0,4 kleiner, da anstatt 4 dann 8 bzw. 10 Brennelemente in einen Endlagerbehälter passen.

- (2) Die Gefahr zusätzlicher Freisetzung radioaktiver Stoffe ist durch den Zerlegevorgang bei Variante 2 gegeben. Darüber hinaus gibt es zusätzliche Freisetzung beim Komprimieren des Brennelementskeletts und der Konditionierung der entstehenden Sekundärabfälle.
- (3) Die Strahlenbelastung durch Direktstrahlung wird aufgrund der Handhabung unter Wasser bzw. in einer heißen Zelle bei beiden Varianten relativ gering sein. Es ist dennoch festzustellen, daß sie in bezug auf die Vorkonditionierung für Variante 1 wegen der kürzeren Handhabungszeiten geringer ist. Die höhere Strahlenbelastung durch die größere Zahl der zu handhabenden Behälter bei Variante 1 wird bei den anderen zu vergleichenden Entsorgungsschritten berücksichtigt.
- (4) Das endzulagernde Volumen in bezug auf Brennelemente ist für Variante 1 um den Faktor 2 (POLLUX 8) bzw. 2,5 (POLLUX 10) größer, die Sicherheitsrisiken bei der Konditionierung aber entschieden kleiner. Für Variante 2 kommt noch benötigtes Endlagervolumen für die Sekundärabfälle und bei Verwendung von POLLUX 10 zusätzlich für die kompaktierten Strukturteile dazu. Das Volumen anfallender Stillegungsabfälle ist für Variante 2 durch die zusätzlich benötigten Komponenten und Werkzeuge erheblich größer.
- (5) Ist hier nicht relevant.
- (6) Die Überwachung ist für Variante 2 aufwendiger, da zusätzliche Kontrollen bzgl. Aktivitätsfreisetzung, Funktionsfähigkeit von Komponenten und Proliferation notwendig sind.
- (7) Die Proliferationssicherheit ist für Variante 1 deutlich höher, da nur die Möglichkeit besteht, das ganze Brennelement zu unterschlagen. Bei Variante B wird die eindeutige Zuordnung des Kernbrennstoffes zur Buchführung (durch Nummer im Brennelementkopf) durch die Zerlegung aufgehoben. Dadurch entstehen bessere Möglichkeiten zur Abzweigung, insbesondere wenn es zu Beschädigungen der Hüllrohre kommen sollte.

*Mit Ausnahme des Kriteriums (4), für das in bezug auf die Brennelemente eine tiefergehende Bewertung nötig wäre, ergeben sich mehr oder weniger deutliche Vorteile für Variante 1.*

Handhabungsschritte	Variante 1	Variante 2
Annahme der BE zur Vorkonditionierung	x	x
Entfernung von Kopf- und Fußstück		x
BS ziehen		x
Strukturteile kompaktieren		x
BS verdichten		x
in Endlagerbüchse einbringen	x	x
Endlagerbüchse verschließen	x	x
Büchse in Endlagerbehälter einbringen	x	x
Konditionierung von Sekundärabfällen*		x

\*Durch die Zerlegung in BS zusätzlich entstehende Abfälle sind u.a. Filter, Dekontaminationsflüssigkeiten sowie bei Reparatur bzw. Stillegung anfallende Komponenten und Stoffe.

**Tabelle 1: Erforderliche Handhabungsschritte bei der Vorkonditionierung für unzerlegte (Variante 1) und zerlegte (Variante 2) Brennelemente.**

Dieses Ergebnis wird unterstützt durch die Bewertungen in [KfK 1981]. In der dort durchgeführten Untersuchung, unter Berücksichtigung der Entsorgungsschritte Konditionierung undendlagerung, wurden die Kriterien Aufwendigkeit der Verfahrenstechnik, Sicherheitstechnik, F+E Aufwand, Kosten, Kernmaterialüberwachungsaufwand und technische Realisierbarkeit herangezogen. Bezogen auf die hier zu betrachtenden Varianten 1 und 2 sind diese Kriterien, evtl. mit Ausnahme der Kosten, in keinen wesentlichen Punkten zu aktualisieren.

Wesentliche Faktoren für die benötigte Endlagerkapazität sind die Gesamtmenge der Brennelemente und der durch sie bewirkte Wärmeeintrag in die geologische Formation. Da diese Faktoren unabhängig von der Vorkonditionierung sind, ergibt sich unter diesen Gesichtspunkten prinzipiell kein unterschiedlicher Endlagerkapazitätsbedarf. Für Variante 1 kann sich jedoch ein höherer Endlagerkapazitätsbedarf ergeben, wenn ein Einlagerungskonzept mit sehr langen Abklingzeiten für die Brennelemente gewählt wird. Bei längerer Abklingzeit, daß heißt weniger Wärmeeintrag, können die POLLUX-Behälter in den Einlagerungsstrecken dichter hintereinander gestellt werden. In diesem Fall würde sich die etwa doppelt so hohe Zahl von Behältern durch eine Verlängerung der Einlagerungsstrecken und damit Erhöhung des benötigten Endlagerhohlraumes auswirken. Dies gilt allerdings nicht für Hochabbrand- und MOX-Brennelemente. Es müßten im Falle der Zerlegung auch Endlagerkapazitäten für die Sekundärabfälle zur Verfügung gestellt werden. Der eventuelle Vorteil der geringeren Endlagerkapazität im Vergleich zerlegte/unzerlegte Brennelemente für die Zerlegungsvariante würde durch die Sekundärabfälle also z.T. kompensiert. Außerdem wird der Nachteil durch die Randbedingung des Ausstiegs aus der Atomenergie begrenzt.

Die Zerlegung der Brennelemente hat unter Sicherheits- und Strahlenschutzgesichtspunkten insgesamt Nachteile und wird hier nicht weiter in Erwägung gezogen. Dies entspricht auch dem Grundsatz IV. der weitgehenden Unkompliziertheit (siehe Kapitel 3), der vom BFK gefordert worden ist sowie dem Minimierungsgebot der Strahlenschutzverordnung.

## 4.2 Gesamtumgangspfade

Unter Gesamtumgangspfad werden hier die kurz- bzw. mittelfristig realisierbaren Entsorgungsschritte Zwischenlagerung und Konditionierung, also ohne Endlagerung, verstanden. Mit Konditionierung wird hier die Verpackung der unzerlegten Brennelemente in die Endlagerbehälter bezeichnet. Dies stellt bei einem Vergleich der Umgangsmöglichkeiten für alle anfallenden Brennelemente die ungünstigste Variante für die dezentrale Lösung bzgl. der Zahl der Behälterhandhabungen und Transporte dar. Dieses Vorgehen ermöglicht jedoch den direkten Vergleich und ist durch die Ergebnisse in Kapitel 4.1 auch sinnvoll. Überlegungen zu den Auswirkungen einer Zerlegung auf die zentralen und dezentralen Pfade müßten nur angestellt werden, wenn sich Probleme mit der Zwischenlager- oder Endlagerkapazität ergeben würden (siehe hierzu Kapitel 5).

Es sollen hier die Gesamtumgangspfade

- zentrale Zwischenlagerung - zentrale Konditionierung (Pfad A)
- dezentrale Zwischenlagerung - zentrale Konditionierung (Pfad B)
- dezentrale Zwischenlagerung - dezentrale Konditionierung (Pfad C)

gegenübergestellt werden. Die Abläufe der einzelnen Pfade werden im folgenden kurz beschrieben.

Der "zentrale" Pfad A orientiert sich an den gegenwärtigen Planungen und beinhaltet die trockene Zwischenlagerung in CASTOR-Behältern an zwei oder drei Standorten sowie die Konditionierung in einer Heißen Zelle an einem Standort. Eine Zwischenlagerung wird hier sowohl vor als auch nach der Konditionierung unterstellt. In Kapitel 2.1.1 wurde bereits dargestellt, daß bezüglich einer erneuten Zwischenlagerung nach der endlagergerechten Konditionierung Unklarheiten bestehen. Offensichtlich gibt es hierzu noch kein feststehendes Konzept der Industrie und keine Vorgaben durch die Bundesregierung. Eine logistische Abstimmung zwischen einer kommerziell betriebenen Konditionierungsanlage und einem Endlager, die nach der Konditionierung eine direkte Abnahme und Einlagerung des Endlagergebinde im Endlager gewährleistet, dürfte schwierig sein. Mindestens Pufferkapazitäten müßten vorhanden sein. Solche Pufferkapazitäten für Endlagergebinde sind jedoch in der einzigen von der Industrie geplanten Konditionierungsanlage (die in Bau befindliche Pilot-Konditionierungsanlage in Gorleben soll später kommerziell genutzt werden) nicht vorgesehen. Aus den hier genannten Gründen und in Fortsetzung des bisherigen Diskussionsstandes im Beirat [HIRSCH 1994] wird als Referenzfall von einer zweiten Zwischenlagerphase ausgegangen. In den bewertenden Kapiteln wird jeweils auf die Auswirkung des Wegfalls dieser Zwischenlagerung eingegangen.

Für die gemischten Pfade werden die Zwischenlagertechniken Naßlager (Pfad B1) und CASTOR-Behälter (Pfad B2) betrachtet. Die Lagerung in Betonblöcken scheidet hierfür aus, da dadurch ein Teil der zentralen Konditionierung überflüssig würde. Die Lagerung in POLLUX-Behältern scheidet aus, da eine zentrale Konditionierung dann ganz überflüssig wäre. Die zentrale Konditionierung bei den gemischten Pfaden wird in einer Heißen Zelle vorgenommen. Bezüglich einer Zwischenlagerungsphase nach der Konditionierung gilt das oben gesagte.

Für die "dezentralen" Pfade wird die Zwischenlagerung in Naßlager (Pfad C1), Betonblocklager (Pfad C2), CASTOR-Behältern (Pfad C3) bzw. POLLUX-Behältern (Pfad C4) betrachtet. Alle vier Zwischenlagerungstechniken werden von der Betreiberseite als sicherheitstechnisch durchführbar angesehen. Die Konditionierung erfolgt entweder unter Wasser oder in einer Heißen Zelle.

Umgangsabläufe in Stichworten:

#### Pfad A

Bestrahlte Brennelemente aus Reaktorlagerbecken in CASTOR - CASTOR-Transport vom Kraftwerksstandort zum zentralen Zwischenlager - Zwischenlagerung im CASTOR - CASTOR-Transport vom zentralen Zwischenlager zur zentralen Konditionierungsanlage - Brennelemente aus CASTOR in Büchsen - Büchsen in POLLUX - POLLUX-Transport in zentrales Zwischenlager - Pufferlagerung im POLLUX - POLLUX-Transport in zentrales Endlager - Einlagerung ins Endlager.

#### Pfad B1

Bestrahlte Brennelemente aus Reaktorlagerbecken in Abschirmbehälter - Transport zum Naßlager am Standort - Brennelemente aus Abschirmbehälter in Lagerbecken - Zwischenlagerung im Naßlager - Brennelemente aus Naßlager in CASTOR - CASTOR-Transport vom dezentralen Zwischenlager zur zentralen Konditionierungsanlage - Brennelemente aus CASTOR in Büchsen - Büchsen in POLLUX - POLLUX-Transport in zentrales Zwischenlager - Pufferlagerung im POLLUX - POLLUX-Transport in Endlager - Einlagerung ins Endlager.

**Pfad B2**

Bestrahlte Brennelemente aus Reaktorlagerbecken in CASTOR - CASTOR-Transport zur Zwischenlagerhalle am Standort - Zwischenlagerung im CASTOR - CASTOR-Transport vom dezentralen Zwischenlager zur zentralen Konditionierungsanlage - Brennelemente aus CASTOR in Büchsen - Büchsen in POLLUX - POLLUX-Transport in zentrales Zwischenlager - Pufferlagerung im POLLUX - POLLUX-Transport in zentrales Endlager - Einlagerung ins Endlager.

**Pfad C1**

Bestrahlte Brennelemente aus Reaktorlagerbecken in Abschirmbehälter - Transport zum Naßlager am Standort - Brennelemente aus Abschirmbehälter in Lagerbecken - Zwischenlagerung im Naßlager - Brennelemente aus Naßlager in Büchse - Büchse in POLLUX - POLLUX-Transport in zentrales Endlager - Einlagerung ins Endlager.

**Pfad C2**

Bestrahlte Brennelemente im Reaktorlagerbecken in Büchse - Büchse aus Reaktorlagerbecken in Abschirmbehälter - Transport zum Betonblocklager am Standort - Büchse aus Abschirmbehälter in Zwischenlager - Zwischenlagerung im Betonblocklager - Büchse in POLLUX - POLLUX-Transport in zentrales Endlager - Einlagerung ins Endlager.

**Pfad C3**

Bestrahlte Brennelemente aus Reaktorlagerbecken in CASTOR - CASTOR-Transport zur Zwischenlagerhalle am Standort - Zwischenlagerung im CASTOR - Brennelemente aus CASTOR in Büchse - Büchse in POLLUX - POLLUX-Transport in zentrales Endlager - Einlagerung ins Endlager.

**Pfad C4**

Bestrahlte Brennelemente im Reaktorbecken in Büchse - Büchse aus Reaktorlagerbecken in POLLUX - POLLUX-Transport zur Zwischenlagerhalle am Standort - Zwischenlagerung im POLLUX - POLLUX-Transport in zentrales Endlager - Einlagerung ins Endlager.

In Tabelle 2 ist die Anzahl der notwendigen Handhabungen und Transporte für die betrachteten Pfade, bezogen auf den Umgangsablauf mit einem Brennelement, gegenübergestellt.

Tätigkeiten	Umgangspfad			C			
	A	B	C	C 1	C 2	C 3	C 4
BE	Lagerb. -> Büchse/Beh.	x	x x	x x	x	x	x
	Absch.beh. -> Lagerb.	-	x	-	x	-	-
	Behälter -> Büchse	x	x	-	-	x	-
	Lagerb. -> Behälter	-	-	x	x	-	x
Büchse	Absch.beh. -> Betonbl.	-	-	-	x	-	-
	Anlage -> POLLUX	x	x	-	x	x	-
Zwischensumme	3	5	3	4	4	3	2
Handhabung	Abschirm-behälter	im Containment	-	x	-	x	-
		im dezentr. Zwischenl.	-	x	-	x	-
	CASTOR-Behälter	im Containment	x	-	x	x	-
		im dezentr. Zwischenl.	-	x	x x	-	x x
		im zentr. Zwischenlager	x x	-	-	-	-
		in zentr. Kond.anlage	x	x	-	-	-
		im Containment	-	-	-	-	x
		im dezentr. Zwischenl.	-	-	x	x	x x
	POLLUX	im zentr. Zwischenlager	x x	x x	-	-	-
		in zentr. Kond.anlage	x	x	-	-	-
	im Endlager	x	x	x	x	x	x
Zwischensumme	8	8	8	4	4	5	4
Gesamtsumme	Handhabungen	11	13	11	8	8	6
Transport	intern	Abschirmbehälter	-	x	x	-	-
		CASTOR	-	x	-	x	-
		POLLUX	-	-	-	-	x
Gesamtsumme	Transporte	extern (öffentl.)	CASTOR	x x	x	-	-
			POLLUX	x x	x x	x	x
			4	4	4	2	2

Tabelle 2: Zahl der Handhabungen und Transporte für verschiedene Umgangspfade. (Erleuterung siehe Text)

#### 4.2.1 Bewertung bzgl. Lagertechnik

Die Pfade werden zunächst ausschließlich in bezug auf die Lagertechnik (Naß-, Betonblock- und Behälter-Lagerung), ohne Berücksichtigung des sonstigen Umgangs, anhand der Kriterien aus Kapitel 3 überprüft:

- (1) Ist nicht relevant.
- (2) Unter der Voraussetzung, daß die Brennstabhüllrohre bei jeder Lagertechnik die gleiche Rückhaltefähigkeit behalten, würden sich die Freisetzung aus den Brennelementen in ein Außenmedium nur durch ihren zeitlichen Verlauf (mit Ausnahme einer geringeren Freisetzungsmöglichkeit bei frühzeitiger Einbüchung der Brennelemente bei C2 und C4), nicht aber durch ihren absoluten Gesamtwert unterscheiden. Die Rückhaltemöglichkeiten für gasförmige Freisetzung in bezug auf die Umgebung der Anlage sind für die Behälterlagerung am besten einzuschätzen, da die radioaktiven Stoffe bei Öffnung der Behälter gezielt aufgefangen werden können. Bei einer Freisetzung in das Wasser des Lagerbeckens ist dies nicht so gezielt möglich. Eine Erhöhung der Freisetzung kann bei der Naßlagerung durch Korrosion der Hüllrohre und bei Trockenlagerung durch den Wechsel der Beanspruchungen (Druckgradient, Temperatur) erfolgen. Freisetzung durch Störfälle sind bei Unterstellung des Versagens der Hauptbarriere (z.B. durch Flugzeugabsturz) für die Lagerung in CASTOR-Behältern als am geringsten einzuschätzen, da sich der Barrierenverlust auf die Brennelemente in einem Behälter begrenzt, während er im Naßlager für alle und im Betonlager für viele eingelagerten Brennelementen wirksam wäre.
- (3) Ein Unterschied bei der Strahlenbelastung durch Direktstrahlung kann für die Bevölkerung vernachlässigt werden. Für das Personal ist sie bei der Trockenlagerung in Behältern am höchsten und bei der Naßlagerung am geringsten einzuschätzen.
- (4) Die durch Dekontaminations- und bei Wartungsmaßnahmen anfallenden radioaktiven Abfallvolumina werden in grober Abschätzung als gleich angesehen. In den Naßlagern fallen allerdings zusätzliche Abfälle durch das notwendige Reinigungssystem für das Beckenwasser an. Das Volumen der bei Stilllegung und Abriß des Lagers anfallenden und endzulagernden radioaktiven Abfälle ist für ein Naßlager aufgrund der Kontamination der Betonstrukturen am größten und für ein Behälterlager am geringsten. Bei einem CASTOR-Lager (C3) wären dagegen nach Abschluß der Zwischenlagerung die Behälter zu entsorgen. Dies wird aber teilweise dadurch kompensiert, daß keine Abschirm- oder Transportbehälter benötigt werden. Die wenigsten Stilllegungsabfälle fallen beim Pfad C4 an, da hier die Zwischenlager- gleichzeitig die Endlagerbehälter sind.
- (5) Ist nicht relevant.
- (6) Die Überwachungsaufgaben sind für die Naßlagerung am größten und für die Behälterlagerung am geringsten. Dies ergibt sich unter anderem durch die Notwendigkeit unterschiedlicher Maßnahmen für die Abgaben radioaktiver Stoffe über Luft und Abwasser sowie die Wartung der aktiven Lüftungssysteme.
- (7) Hier ist höchstens die Möglichkeit von Innentätern zu betrachten. Für diese ist die Entfernung von Brennelementen einfacher, wenn sie sich bereits in Behältern befinden.

Eine abschließende Bewertung der Lagertechnik setzt eine Sicherheitsanalyse der möglichen Techniken voraus. Dies kann hier nicht geleistet werden. Wird die allgemeine Kompliziertheit der Lagertechnik als Indikator hierfür herangezogen, muß bezüglich Unfallrisiko und Freisetzungsmöglichkeiten die Naßlagerung (aktives Kühlungssystem, Reinigungssystem, Unterdruckstaffelung, Filtersysteme, Abluftüberwachungssystem) gegenüber der Behälterlagerung (Behälterdichtheits- und Betontemperaturüberwachung) deutlich negativer bewertet werden.

Auf Grundlage der Überlegungen ergeben sich Vorteile für die trockene Behälterlagerung der Pfade A, B2, C3 und C4, insbesondere bezüglich möglicher Auswirkungen auf die Bevölkerung. Für den Pfad C4 könnten sich zusätzliche Vorteile in bezug auf Freisetzung im Normalbetrieb ergeben, da dieser Behälter nach der Zwischenlagerung nicht wieder geöffnet werden muß. Dieser Vorteil gegenüber der CASTOR-Lagerung wird z.T. wieder aufgehoben durch die wahrscheinlich geringere Widerstandskraft gegen schwere Unfälle wie Flugzeugabsturz. Für einen abschließenden Vergleich der Pfade C3 und C4 ist eine detaillierte Bewertung der Bedeutung einer frühzeitigen Verpackung der Brennelemente in Bezug auf dieendlagerung notwendig.

#### 4.2.2 Bewertung bzgl. Handhabung Brennelemente/Büchsen

Zunächst soll die Zahl der Handhabungen eines einzelnen Brennelementes bzw. einer Büchse für die jeweiligen Pfade ermittelt werden. Da sich nach den in dieser Arbeit gewählten Randbedingungen in einer Büchse immer 1 Brennelement befindet und das relativ dünne Stahlblech die Gamma- und Neutronenstrahlung kaum schwächt, können diese beiden Varianten zusammen behandelt werden.

Die Überprüfung anhand der Kriterien ergibt:

- (1) Der Tabelle 2 ist zu entnehmen, daß die geringste Handhabungszahl der Pfad C4 verzeichnet. Die Pfade A, B2 und C3 haben je drei Handhabungsschritte und die anderen 4 bzw. 5.
- (2) Die Möglichkeiten für Freisetzung im bestimmungsgemäßen Betrieb sowie für Unfälle steigen mit der Zahl der Handhabungen. Dies gilt auch für die Freisetzungsmengen. (Siehe hierzu Kriterium (1)).
- (3) Die Höhe der Ortsdosisleistungen durch Direktstrahlung kann durch bauliche Abschirmmaßnahmen für nasse und trockene Handhabungen gleich gehalten werden. Sie ist vor allem für das Personal relevant und ist proportional zur Zahl der Handhabungsschritte (siehe hierzu Kriterium (1)).
- (4) Die anfallenden Sekundärabfälle werden als gleich angenommen. Zu den Stilllegungs- und Abrißabfällen durch zentrale oder dezentrale Handhabung siehe Kapitel 4.2.5.
- (5) Hier nicht relevant.
- (6) Die Überwachungstätigkeit ist proportional zur Zahl der Handhabungsschritte (siehe hierzu Kriterium (1)).
- (7) Die Proliferationssicherheit ist proportional zur Zahl der Handhabungsschritte (siehe hierzu Kriterium (1)) und dabei für nicht eingebüchste Brennelemente einfacher.

In bezug auf die Handhabungen mit den eigentlichen Strahlenquellen und damit bezüglich aller Kriterien ist der Pfad C4 (POLLUX-Lagerung) zu bevorzugen. An zweiter Stelle liegen die Pfade A, B2 und C3 mit der CASTOR-Lagerung.

#### 4.2.3 Bewertung bzgl. Handhabung Behälter

Die Zahl der Behälterhandhabungen muß zunächst auf Grundlage der allgemeinen Abläufe für die einzelnen Pfade ermittelt werden. Diese Abläufe und Zahlen sind dem Kapitel 4.2 bzw. der Tabelle 2 zu entnehmen. Zu beachten ist dann allerdings die unterschiedliche Kapazität der Behälter. Für den POLLUX-Behälter wird hier die Beladung mit unzerlegten Brennelementen in Büchsen zugrundegelegt. Seine Kapazität beträgt damit 4 Brennelemente. Beim Einsatz von CASTOR-Behältern für die Zwischenlagerung und den Transport werden nicht alle Brennelemente in gleiche CASTOR-Typen geladen. In 8 der 21 bundesdeutschen Reaktoren, in denen sich zu behandelnde Brennelemente befinden, gibt es nicht die direkte Möglichkeit der Beladung der neuen Großbehälter (CASTOR-Serien V/19, V/21

und V/52). Ein Umladen von den kleineren in größere CASTOR-Behälter sollte vermieden werden, da dies wieder zusätzliche Handhabungen zur Folge hat. Von den 14 DWR, dieser Reaktortyp stellt hier die Referenz für die Betrachtungen, betrifft dies drei Reaktoren. Von den anderen Reaktoren ist für 10 der V/19 und einen der V/21 vorgesehen. Daraus ist jedoch nicht notwendigerweise zu schließen, daß in diesen Kraftwerken alle Brennelemente in die Großbehälter geladen werden. Es ist vielmehr zu erwarten, daß ein Teil auch in die kleineren Behälter geladen wird, z.B. wenn sie bereits gekauft sind. Insgesamt wird hier für die Bestimmung der Transportzahlen von einer plausiblen Durchschnittszahl pro CASTOR von 16 Brennelementen ausgegangen. Bei den für die Pfade B1, C1 und C2 benötigten Abschirmbehälter wird eine Kapazität von 8 Brennelementen angesetzt. Es existieren viele Transportbehälter unterschiedlicher Typen, die zwischen 7 und 9 Brennelemente aufnehmen können. Daher erscheint diese Zahl ebenfalls plausibel. Entsprechend dieser Festlegungen wird eine CASTOR-Handhabung mit dem Faktor 1, eine Abschirmbehälter-Handhabung mit dem Faktor 2 und eine POLLUX-Handhabung mit dem Faktor 4 belegt. Damit sind die Behälterhandhabungen für alle Pfade auf die gleiche Zahl von Brennelementen normiert. Die auf dieser Grundlage ermittelten Handhabungszahlen sind der Tabelle 3 zu entnehmen.

Die Anwendung der Kriterien aus Kapitel 3 führt zu folgenden Ergebnissen:

- (1) Je nach Pfad müssen POLLUX-, CASTOR- und/oder Abschirmbehälter gehandhabt werden. Für alle Pfade ist der POLLUX-Behälter relevant, da er die jeweilige Vorstufe zur Endlagerung ist. In den Pfaden A, B1, B2 und C4 muß er einschließlich Einlagerung ins Endlager 4 mal, in den Pfaden C1, C2 und C3 jeweils 2 mal gehandhabt werden (siehe Tabelle 2). Da dies der Behälter mit der kleinsten Beladekapazität ist, das heißt derjenige, der bezogen auf die insgesamt anfallenden Brennelemente am meisten auftritt, kann hieraus ein Vorteil für diese drei dezentralen Strategien mit einer Konditionierung unmittelbar vor Abtransport in ein Endlager abgeleitet werden. Dieser Vorteil wird nur beim Pfad C4 wieder aufgehoben, da hier keine Handhabungen mit anderen Behältern notwendig sind. Bei den übrigen Pfaden ist dies zusätzlich der Fall. Bemerkenswert ist, daß bei den drei Pfaden, die einen CASTOR benötigen (A, B2 und C3), der Pfad C3 (vollständig dezentrale Strategie) mit einer Handhabung weniger auskommt (siehe Tabelle 2). Insgesamt ist der Tabelle 2 zu entnehmen, daß alle vollständig dezentralen Lösungen deutlich weniger Behälterhandhabungen benötigen. Der Vorteil der dezentralen Pfade bleibt auch erhalten, wenn die unterschiedlichen Beladekapazitäten der Behälter (siehe oben) berücksichtigt werden. Allerdings verschieben sich dann die Verhältnisse der dezentralen Pfade untereinander. C3 besitzt dann die größten und C4 die kleinsten Vorteile (siehe Tabelle 3).
- (2) Die Möglichkeiten für Freisetzung im bestimmungsgemäßen Betrieb sowie für Unfälle steigen mit der Zahl der Handhabungen. Dies gilt auch für die Freisetzungsmengen. Daher schneidet C3 am besten ab.
- (3) Nach gegenwärtiger Praxis wird die Höhe der Oberflächenortsdosiseistung für die jeweiligen Behälter "optimiert", sie wird hier daher für alle Behälter gleich angesetzt. Die Höhe der Belastung durch Direktstrahlung ist damit proportional zur Zahl der Behälter-Handhabungen. Bei detaillierterer Betrachtung ist zu vermuten, daß die Ortsdosiseistung des POLLUX geringer ist, da er weniger Brennelemente mit längerer Abklingzeit enthält.
- (4) Das Volumen der anfallenden Abfälle ist proportional zur Zahl der Handhabungen.
- (5) Hier nicht relevant.
- (6) Die Überwachungstätigkeit ist proportional zur Zahl der Handhabungsschritte.
- (7) Die Proliferationssicherheit ist proportional zur Zahl der Handhabungsschritte.

Es ergibt sich bezüglich der Behälterhandhabungen eine Gleichwertigkeit der Pfade A (zentral) und B2 (teilzentral). Insgesamt ergeben sich aus der Anwendung der für die Behälterhandhabung relevanten Kriterien bei Bezug auf die gleiche Zahl zu hantierender Brennelemente klare Vorteile für die dezentralen Pfade C1 bis C4 (siehe Tabelle 3), mit wiederum leichten Vorteilen für C3 und den geringsten Vorteilen für C4.

Diese Beurteilung würde sich ändern, wenn der Zwischenstopp der erneuten Zwischenlagerung nach der Konditionierung und vor der Endlagerung bei den Pfaden A, B1 und B2 wegfallen würde (siehe hierzu Kapitel 2.2.1). Da bei diesem Schritt POLLUX-Behälter gehandhabt werden müssen, wird der Vorteil aufgehoben (siehe Zahlen in Klammern in Tabelle 3). Damit hätte nur der Pfad C3 noch einen Vorteil bei der Zahl der Behälterhandhabungen. Im Pfad C4 wären dann mehr Handhabungen notwendig als beim zentralen Pfad und den teilzentralen Pfaden.

#### 4.2.4 Bewertung bzgl. Transporte

Bei der Feststellung der Transportzahlen müssen, nach der für die einzelnen Umgangspfade spezifischen Zahlen (siehe Tabelle 2), wie in Kapitel 4.2.3 die unterschiedlichen Kapazitäten der Behältertypen berücksichtigt werden (siehe hierzu Kapitel 4.2.3). Entsprechend wird ein CASTOR-Transport mit dem Faktor 1, ein Abschirmbehälter-Transport mit dem Faktor 2 und ein POLLUX-Transport mit dem Faktor 4 belegt. Die daraus resultierenden Zahlen sind der Tabelle 3 zu entnehmen.

Die Anwendung der Kriterien aus Kapitel 3 ergibt mit diesen Randbedingungen:

- (1) In Tabelle 2 ist für die einzelnen Pfade die bezüglich der Beladekapazität unkorrigierte Zahl der Transporte, aufgeteilt in internen und externen (über öffentliche Verkehrswege) Verkehr, und in Tabelle 3 mit den obigen Kapazitätsannahmen gewichtet angegeben. Für die Transporte ergibt sich bei den vollständig dezentralen Strategien eine deutlich geringere Zahl externer Transporte. Den größten Vorteil hat die CASTOR-Zwischenlagerung (C3) und den geringsten Vorteil die POLLUX-Zwischenlagerung (C4).
- (2) Die Möglichkeiten für und damit auch die Höhe von Freisetzung in bestimmungsgemäßem Betrieb sowie für Unfälle steigen mit der Zahl der Transporte.
- (3) Nach gegenwärtiger Praxis wird die Höhe der Oberflächenortsdosleistung für die jeweiligen Behälter "optimiert". Sie wird hier in erster Näherung daher für alle Behälter gleich angesetzt. Die Höhe der Belastung durch Direktstrahlung ist damit für das Betriebspersonal proportional zur Zahl der Transporte. Für eventuelles Bewachungspersonal und die Bevölkerung sind bezüglich der Direktstrahlung allerdings hauptsächlich die externen Transporte relevant. Hierfür ist festzustellen, daß die dezentralen Pfade einen eindeutigen Vorteil gegenüber den anderen Pfaden besitzen.
- (4) Das Volumen der anfallenden Sekundärabfälle wird vor allem durch den Aufwand für die Ein- und Ausgangskontrollen der Behälter bestimmt. Es ist davon auszugehen, daß der Kontrollaufwand für externe Transporte deutlich höher ist. Damit ergeben sich Vorteile für die dezentralen Pfade, wobei sie für den Pfad C4 geringer sind, als für die anderen C-Pfade.
- (5) Interner Verkehr hat deutlich weniger Transportstrecke zurückzulegen als externer. Dies ergibt Vorteile für die dezentralen Pfade. Darüber hinaus ist der Weg eines externen Transportes, der direkt vom Kraftwerksstandort zum Endlager führt, kürzer, als wenn zunächst in ein externes Zwischenlager, von dort in eine externe Konditionierungsanlage und von dort in ein anderes Zwischenlager oder in das Endlager transportiert wird. Dieses Kriterium ergibt sehr große Vorteile für die dezentralen Pfade C1 bis C4.

- (6) Die Überwachungstätigkeit ist proportional zur Zahl der Transporte. Auch hier sind die externen Transporte deutlich höher zu gewichten als die internen. Dies ergibt Vorteile für die dezentralen Pfade.
- (7) Die Proliferationssicherheit ist proportional zur Zahl der Transporte. Auch hier sind die externen Transporte höher zu gewichten als die internen. Dies ergibt Vorteile für die dezentralen Pfade.

*Bezogen auf die Transporte sind die dezentralen Pfade C1 bis C4 gegenüber den Pfaden A, B1 und B2 eindeutig im Vorteil. Die Vorteile von C4 sind dabei als etwas geringer zu beurteilen als die von C1 bis C3 (siehe Tabelle 3).*

*Sollte der Zwischenschritt der erneuten Zwischenlagerung nach der Konditionierung und vor derendlagerung wegfallen (siehe hierzu Kapitel 2.1.1) verringern sich die Vorteile der dezentralen Pfade. Gegenüber den teilzentralen Pfaden B1 und B2 würde dann jedoch immer noch ein und gegenüber dem zentralen Pfad A zwei externe CASTOR-Transporte eingespart (siehe Klammerzahlen in Tabelle 3).*

#### 4.2.5 Gesamtbeurteilung

In Tabelle 3 sind die Zahlen für die Gesamtbeurteilung zusammengestellt. In der oberen Hälfte der Tabelle ist das Ergebnis für die logistischen Kriterien wie Zahl der Standorte (BFK-Randbedingung III.) und die Zahl der Umgangsschritte (Kriterium (1) aus Kapitel 3) dargestellt. Die untere Hälfte der Tabelle zeigt die Bewertung der Pfade nach den technischen und sicherheitsrelevanten Kriterien aus Kapitel 3. Die quantitativen und relativen Bewertungen sind dabei auf eine bestimmte, für alle Pfade gleiche Zahl von Brennelementen bezogen.

Nicht enthalten ist in der Tabelle 3 eine eigene explizite Bewertung für die Unfallrisiken. Sie sind zum Teil implizit in den Beurteilungen der Handhabungs- und Transportzahlen sowie qualitativ in den Freisetzungsbetrachtungen enthalten. Eine detaillierte Sicherheitsanalyse würde den konzeptionellen Anspruch dieses Beratungsauftrages sprengen. Nach den hier erzielten Ergebnissen wird die Möglichkeit, daß eine detaillierte Sicherheitsanalyse ein grundsätzlich anderes Bild ergeben würde, aber für unwahrscheinlich gehalten.

Die bei Stillegung und Abriß anfallenden radioaktiven Abfälle wurden in der bisherigen Bewertung und damit auch in der Tabelle 3 nur für den Vergleich zerlegte/unzerlegte Brennelemente (Vorkonditionierung, Kapitel 4.1) und die Lagertechnik (Kapitel 4.1.2) berücksichtigt. Für die Frage trockene Zwischenlagerung zentral oder dezentral haben die Stillegungsabfälle nur untergeordnete Bedeutung, da bei Behälterlagerung die baulichen Strukturen des Lagers (Stahl, Beton) nach den geltenden Vorschriften konventionell besiegelt werden können [BLG 1992]. Eine Beurteilung des Volumenunterschiedes für radioaktive Abfälle aus dem Abriß der Konditionierungszellen in den dezentralen Zwischenlagern oder anderen Gebäuden des Kraftwerkes und dem Abriß einer zentralen Konditionierungsanlage ist beim gegenwärtigen Stand der Arbeiten spekulativ. Es wäre zum Beispiel auch zu prüfen, inwieweit Komponenten, Werkzeuge und andere Einrichtungen bei der dezentralen Lösung aus den Kraftwerken übernommen werden können. Dies kann jedoch erst bei detaillierterer Betrachtung der Einbindung der Konditionierungszellen in die Gesamtanlage geschehen (siehe Kapitel 8). Es wird hier davon ausgegangen, daß die Stillegungsabfälle insgesamt keinen wesentlichen Einfluß auf die Wahl eines Umgangspfades besitzen. Dies dürfte insbesondere bei einer Verpackung unzerlegter Brennelemente zutreffend sein.

In der oberen Hälfte der Tabelle 3 sind die Zahlen der benötigten Standorte und der Umgangsschritte für die einzelnen Pfade angegeben. Bei den Standorten wird das dezentrale Zwischenlager bzw. die dezentrale Konditionierungseinrichtung zum Standort des Kraftwerkes gezählt. Zentrales Zwischenlager und zentrale Konditionierungsanlage werden jeweils als ein Standort gewertet. Dies trifft auch den gegenwärtigen Stand der Betreiberplanungen, da nur das Transportbehälterlager Gorleben am Standort der Konditionierungsanlage liegt. Das Brennelement-Zwischenlager Ahaus und ggf. ein weiteres zentrales Zwischenlager sind eigene Standorte. Berücksichtigt bei der Zahlenangabe ist auch ein Standort für das Endlager.

Zur qualitativen Bewertung der Umgangspfade in technischer und sicherheitstechnischer Hinsicht werden diese in einem zweiten Schritt - wie in konzeptionellen Arbeiten üblich (siehe z.B. [KfK 1981] und [NUKEM/DWK 1983]) - mit einer vereinfachenden Methodik zueinander in Bezug gesetzt. In der unteren Hälfte der Tabelle 3 ist das Ergebnis aus einem relativen Vergleich der in den Unterkapiteln 4.2.1 bis 4.2.4 stehenden Aussagen zu den Kriterien, die nicht durch Zahlen der oberen Hälfte der Tabelle abgedeckt sind, aufgeführt. Der am besten bewertete Pfad erhielt einen Punkt und die anderen in der Reihenfolge der negativer werdenden Bewertung aufsteigend zusätzliche Punkte. In die Tabelle ist auch der Grundsatz IV aus Kapitel 3 bezüglich der Kompliziertheit der Technik einbezogen.

Pfad Kriterien	A	B		C			
		B 1	B 2	C 1	C 2	C 3	C 4
Standorte	4	3	3	2	2	2	2
Handhabungen BE/Büchse	3	5	3	4	4	3	2
Handhabungen Behälter	20 (12)	22 (14)	20 (12)	12	12	11	16
Transporte intern	0	2	1	2	2	1	4
Transporte extern	10 (6)	9 (5)	9 (5)	4	4	4	4
Kompliziertheit d. Lagertechnik	1	3	1	3	2	1	1
Minimierung Freisetzungen	16 (13)	29 (27)	15 (12)	20 (21)	16 (17)	9 (9)	11 (16)
Minimierung Direktstrahlung	15 (12)	18 (15)	15 (12)	9 (9)	10 (10)	8 (8)	12 (16)
Sekundärabfallvolumen	12 (9)	17 (14)	11 (8)	10 (10)	8 (8)	5 (5)	8 (12)
Überwachung und Proliferation	14 (13)	18 (17)	15 (14)	11 (11)	12 (12)	10 (10)	10 (12)
	58 (48)	85 (76)	56 (47)	53 (54)	48 (49)	33 (33)	42 (57)

**Tabelle 3:** Gesamtbeurteilung der Umgangspfade (normiert auf jeweils die gleiche Zahl von Brennelementen für die einzelnen Pfade). Größere Zahlen zeigen negativere Bewertung an. Die Zahlen in Klammern zeigen die Umgangsschritte im Falle der Vermeidung eines Zwischenlagerschrittes vor der Endlagerung an.

Die Gesamtauswertung ergibt folgendes Ergebnis:

- Bei isolierter Betrachtung der Zwischenlagertechnik ergeben sich Vorteile für die trockene Behälterlagerung.
- Der Pfad B1, dezentrale Naßlagerung am Kraftwerksstandort/zentrale Konditionierung, ist der eindeutig am schlechtesten zu bewertende Pfad.
- Die Pfade A, zentrale CASTOR-Lagerung/zentrale Konditionierung, und B2, dezentrale CASTOR-Lagerung/zentrale Konditionierung, sind in vielen Punkten konzeptionell gleich zu bewerten. Neben leichten Vorteilen bzgl. Freisetzungen und Abfallvolumen sind zwei Vorteile von Pfad B2 gegenüber Pfad A von entscheidender Bedeutung: Ein eingesparter Anlagenstandort sowie ein externer CASTOR-Transport weniger.
- Insgesamt besitzen alle vier rein dezentralen Pfade klare Vorteile (C1 mit leichten Abstrichen) gegenüber den Pfaden A, B1 und B2.
- Der Pfad C3 mit dezentraler CASTOR-Lagerung und dezentraler Konditionierung ist nach gegenwärtigem Untersuchungsstand am besten zu bewerten.

Diskussion des Ergebnisses:

Der Vorsprung der rein dezentralen Pfade ist, mit einzelnen Ausnahmen beim Pfad C1, in allen Belangen relativ groß. Es ist unter konzeptionellen Gesichtspunkten daher dringend zu raten, die Dezentralität von Zwischenlagerung und Konditionierung in Konsensgespräche, aber auch in die allgemeine politische Diskussion einzubringen.

Der Pfad C4 mit der frühzeitigen Konditionierung der Brennelemente in die POLLUX-Behälter schneidet nach der reinen Zahlenauswertung der Tabelle 3 unter den dezentralen Pfelden nicht wesentlich besser als die Pfade C1 und C2 ab. Der Grund hierfür liegt in der geringen Kapazität des Behälters und der dadurch bedingten höheren Zahl von Behälterhandhabungen (bezogen auf den Umgang mit einer gleichen Zahl von Brennelementen). Würden zur Bewertung hauptsächlich Sicherheits-, Proliferations- und Freisetzungskriterien für die Handhabung der Brennelemente und die Zwischenlagerung herangezogen, ergäbe sich ein klarer Vorteil für die POLLUX-Lagerung. In diesem Zusammenhang ist insbesondere ein wichtiger Vorteil der POLLUX-Lagerung in den obigen Betrachtungen nur z.T. berücksichtigt: Mögliche Schädigungen der Hüllstabrohre während der Zwischenlagerung sind hier vernachlässigbar (bei Unterstellung einer hohen Qualität der Schweißnaht), da die Brennelemente zu einem relativ frühen Zeitpunkt in Büchsen eingeschweißt und in den Endlagerbehälter eingebracht werden. Insgesamt ist der Pfad C4 gegenüber C1 und C2 unter stärkerer Gewichtung von sicherheitstechnischen Gesichtspunkten als der bessere einzustufen.

Im Vergleich zwischen POLLUX- (C4) und CASTOR-Lagerung (C3) besitzt C3 hauptsächlich durch die viermal größere Brennelementkapazität des CASTOR Vorteile. Durch die geringere Zahl von Handhabungen und Transporten ist diesbezüglich für C3 das Unfallrisiko und die auftretende Strahlenbelastung durch Direktstrahlung geringer.

Ein Vorteil des Pfeldes C4 liegt in der - hier vorbehaltlich weiterer Untersuchungen angenommenen - Vernachlässigbarkeit der Unwägbarkeiten bezüglich der Hantierung von Brennelementen nach 40 jähriger Zwischenlagerung.

In bezug auf radioaktive Freisetzungen besitzt der POLLUX durchgängig mindestens zwei Barrieren (Büchse und Endlagerbehälter; in bestimmtem Umfang könnte der Abschirmbehälter als dritte Barriere angesehen werden), der CASTOR dagegen mit Ausnahme des Deckelbereiches nur eine Barriere (dickwandiger Behälterkörper). Im Deckelbereich stehen sich zwei Deckel mit jeweils einer Metalldichtung für den CASTOR und ein Deckel mit einer Metalldichtung und eine Schweißnaht für den POLLUX gegenüber. Der Schweißnaht ist über die gesamte Lagerzeit allgemein eine höhere Dichtwirkung zu unterstellen. Eine definitive

Aussage bedarf jedoch eingehenderer Analysen. Ein Vorteil der CASTOR-Lagerung ist die ständige Überwachung der Dichtheit des Behälters, die für den POLLUX nicht vorgesehen ist.

Trotz der hier diskutierten Argumente ergeben sich nach gegenwärtigem Untersuchungsstand insgesamt Vorteile für den Pfad C3. Es wird jedoch für sinnvoll gehalten, beide Varianten detaillierter zu untersuchen.

In der Gesamtbeurteilung bisher nicht berücksichtigt ist der theoretische Fall der nach endlagergerechter Verpackung direkt vorgenommenen Einlagerung von Brennelementen in das Endlager (siehe Klammerzahlen in Tabelle 3). In den Kapiteln 2.1.1 und 4.2 wurde darauf hingewiesen, daß dieser Fall nach gegenwärtiger Situation nicht als wahrscheinlich angesehen werden kann. In den Kapiteln 4.2.3 und 4.2.4 wurde dennoch auf entsprechende Veränderungen bei der Beurteilung hingewiesen und an dieser Stelle auch die Auswirkungen auf die Gesamtbeurteilung unter Berücksichtigung der Kriterien kurz beschrieben. Beim Wegfall der Lagerphase zwischen Konditionierung und Endlagerung bei den Pfaden A, B1 und B2, verringern sich für diese die Umgangsschritte. Im Vergleich ist dadurch vor allem der dezentrale Pfad C4 betroffen, dessen Beurteilung in der unteren Hälfte der Tabelle 3 deutlich schlechter wird. Dies liegt zum Teil an der vereinfachenden Methodik, die keine Wichtung der Kriterien enthält. Daher kommen die gegenüber den Pfaden A,B1 und B2 eingesparten CASTOR-Transporte hier nicht so zum tragen. Nichts ändert sich dagegen an der eindeutig besten Bewertung für den Pfad C3.

Aufgrund der in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnisse und deren Diskussion werden für die weiteren Betrachtungen nur die dezentralen Pfade C3 und C4 berücksichtigt. In den Kapiteln 5. und 6. werden in dem hier möglichen Umfang die realen technischen Umsetzungsmöglichkeiten eines dezentralen Konzeptes für diese Pfade untersucht.

## 5. Umsetzung der dezentralen Zwischenlagerung von Brennelementen

In diesem Kapitel werden ausschließlich Brennelemente aus Leichtwasserreaktoren in den alten Bundesländern betrachtet, da nur diese für Überlegungen zu einem zukünftigen Entsorgungskonzept relevant sind. Die sicherheitstechnischen Bewertungen werden hier, so weit überhaupt, aus dem Blickwinkel des konzeptionellen Ansatzes und dessen Umsetzbarkeit unter gegenwärtigen Bedingungen vorgenommen.

### 5.1 Technische Machbarkeit dezentraler Zwischenlagerung

Die Machbarkeit dezentraler Zwischenlagerung an den Reaktorstandorten ist auch in der Atomenergieindustrie umstritten. Die Möglichkeit der Errichtung von Zwischenlagern am Standort wird beispielsweise in [GRS 1992] gleichberechtigt zur zentralen Strategie genannt. In einer Veröffentlichung des Deutschen Atomforums, [BAUMGÄRTEL 1995], heißt es bezüglich der Behälterlagerung, daß

„die entladenen Brennelemente ... einschließlich starkwandiger Behälter über lange Zeit auch sicher an den Reaktorstandorten gelagert werden können.“

Es gab und gibt darüber hinaus an einzelnen Kernkraftwerksstandorten in der Bundesrepublik konkrete Ansätze für die Bereitstellung eigener Zwischenlagerkapazitäten außerhalb des Reaktor-Containments. Zu Beginn der 80er Jahre wurden für KKS und KWW Anträge zur Errichtung von Behälterzwischenlagern gestellt. Für das KWO läuft zur Zeit ein Genehmigungsverfahren für den Betrieb des bereits fertiggestellten Lagerbeckens im dortigen Notstandsgebäude. Der bei der Firma Siemens in Entwicklung befindliche Siedewasserreaktor SWR 1000 soll eine Lagerkapazität für alle in 40 Betriebsjahren anfallenden Brennelemente bekommen [ATW 1994].

Wichtige Kriterien für die Machbarkeit der Lagerung bestrahlter Brennelemente am Kraftwerkstandort sind die Störfall-/Unfallsicherheit, die Einordnung in Logistik und Infrastruktur und die räumlichen Möglichkeiten. Unabhängig von der gewählten Lagertechnik wird hier davon ausgegangen, daß die dezentrale Zwischenlagerung außerhalb des Reaktors in einem anderen Gebäude am Standort erfolgt. Demzufolge stellt sich die Frage der Störfallsicherheit in bezug auf die Lagertechnik für die dezentrale Zwischenlagerung im gleichen Umfang wie für die zentrale Zwischenlagerung und wird hier nicht über die Betrachtungen in Kapitel 4 hinaus behandelt. Entsprechend des Gesamtergebnisses des Kapitels 4 wird hier von der Behälterlagerung ausgegangen.

#### Sicherheitstechnik

Sicherheitstechnisch bedeutsam kann die Tatsache sein, daß die Einführung eines dezentralen Konzeptes zu einer längeren Ausnutzung der Kapazitäten der Lagerbecken im Containment des Reaktors führen wird. Für beide Pfade (C3 und C4) ist das der Fall, da für Genehmigung und Bau des Standortzwischenlagers Zeit benötigt wird. Diese Zeit ist durch zwei Faktoren im Vergleich zu heutigen Genehmigungsverfahren reduzierbar. Erstens handelt es sich für alle Standorte um die gleiche Technik, so daß bei den einzelnen Genehmigungsverfahren nur die jeweils standortspezifischen Punkte und Wechselwirkungen eingehender zu prüfen sind. Zum zweiten können auf Grundlage eines breiten gesellschaftlichen Ausstiegskonsenses Klageverfahren gegen die Genehmigungen mindestens reduziert, wenn

nicht sogar ganz vermieden werden. Für den Pfad C4 ist darüber hinaus die längere Ausnutzung der Lagerkapazität im Containment notwendig, da mit der Verpackung in POLLUX-Behälter aufgrund der geringeren Wärmeabfuhrfähigkeit im Vergleich zum CASTOR länger gewartet werden muß.

Problematisch an einer längeren Lagerung im Reaktorbecken ist vor allem die Vermaschung der Kühlkreisläufe von Reaktor und Becken. Bei einer Bewertung ist jedoch die Randbedingung des mehr oder weniger kurzfristigen Ausstiegs aus der Atomenergie zu beachten, die eine längere Lagerung im Lagerbecken des Reaktors als verantwortbar erscheinen läßt.

Im übrigen wird für die Beurteilung der technischen Machbarkeit auf die beiden o.g. Genehmigungsanträge verwiesen, ohne daß hier eine Bewertung von Einzelfragen vorgenommen wird. Die dort vorgesehenen Behälterlagerhallen sind bezüglich der Technik vergleichbar mit dem in Gorleben betriebenen Transportbehälterlager. Für die Siedewasserreaktorkennellemente des KWW war eine Abklingzeit von mindestens 1 Jahr [PREAG 1980] und für die Druckwassereaktorkennellemente des KKS von mindestens 0,8 Jahren [NWK 1980] vorgesehen, bevor sie in CASTOR Ic bzw. CASTOR Ib gelagert werden sollten. Die beantragten Kapazitäten betrugen ca. 110 tSM (KWW) bzw. 120 tSM (KKS). Für das KKS enthielt eine 1982 erfolgte Modifizierung des Antrages die zusätzliche Einlagerung von CASTOR IIa (von anderen Reaktorstandorten) und CASTOR IIb sowie die Erhöhung der Einlagerungskapazität auf 240 tSM [NMU 1996].

### Logistik und Infrastruktur

Die Einordnung in Logistik und Infrastruktur des Kernkraftwerkbetriebes dürfte kein Problem darstellen, da das externe Zwischenlager am Standort autonom versorgt werden kann und sich die Arbeitsabläufe im Kraftwerk für eine CASTOR-Lagerung (Pfad C3) gar nicht und für eine POLLUX-Lagerung (Pfad C4) bezüglich der grundsätzlichen Behälterhandhabung (zur Konditionierung siehe Kapitel 6) wenig von denen bei zentraler Zwischenlagerung unterscheiden. Nach [NMU 1996] könnte sich für die CASTOR-Beladung sogar eine Beschleunigung des Betriebsflusses im Containment ergeben, da bestimmte Tätigkeiten am Deckel auch bei der Annahme im standorteigenen Lager verrichtet werden könnten.

### Raumbedarf

Das Behälterzwischenlager muß in einem eigenen, neu zu bauenden Gebäude am Standort untergebracht werden. Eine Integration in ein bestehendes Gebäude wäre, sofern Fläche vorhanden ist, nur bei Verzicht auf die Naturzugkühlung möglich. Es ergibt sich also die Frage, ob auf dem Gelände des Kernkraftwerkes genügend Fläche vorhanden ist. Grundsätzlich heißt es dazu in [BAUMGÄRTEL 1995]:

„Ein alle Brennelemente bei einer Gesamtbetriebsdauer von 40 Jahren aufnehmendes, entsprechend gesichertes Gebäude erreicht kaum ein Zehntel des Volumens der Turbinenhalle eines entsprechenden Kernkraftwerkes.“

Die Grundflächen der früher vorgesehenen Lagerhallen betrugen 36 m x 19,4 m für 40 Stellplätze im KWW [PREAG 1980] und 100 m x 34 m für 104 Stellplätze im KKS [NWK 1980]. Das Transportbehälterlager in Gorleben hat eine Grundfläche von 182 m x 38 m für 420 Stellplätze.

## 5.2 Praktische Umsetzbarkeit dezentraler Zwischenlagerung

### 5.2.1 Anfall von Brennelementen

Die Zahl der anfallenden bestrahlten Brennelemente bzw. die Menge des Kernbrennstoffes in Tonnen Schwermetall (tSM) hängt von der Beladungsstrategie in den einzelnen Kraftwerken ab. In [GRS 1996] werden Angaben zur mittleren Wechselmenge für den Reaktorkern gemacht. Ein Vergleich mit Angaben in einer Strategiebetrachtung der Betreiber [VDEW 1989] legt die Vermutung nahe, daß in den GRS-Angaben die zukünftigen Erhöhungen der Regelabbrände bis zu 55 GWd/tSM in den meisten bundesdeutschen Kraftwerken nicht in vollem Umfang berücksichtigt sind. Für eine Extrapolation in die Zukunft wären die GRS-Zahlen also eher zu hoch. Der Frage kann hier jedoch nicht weiter nachgegangen werden. Im Sinne einer konservativen Betrachtung wird hier also mit Zahlen für anfallende Brennelemente gerechnet, die eher an der Obergrenze liegen.

Die detaillierteren Betrachtungen zur Realisierbarkeit eines dezentralen Konzeptes beschränken sich in dieser ersten Phase des Beratungsauftrages auf Niedersachsen. Der Brennelementanfall in Niedersachsen wird in den nächsten Jahren rückläufig sein, da auch hier Brennelemente mit höherer Anfangsanreicherung, die eine längere Standzeit im Reaktorkern erlaubt, eingesetzt werden sollen. Im KWG wird der Abbrand bereits seit längerer Zeit erhöht. Im KKU soll dies ab Mitte 1996 geschehen und im KKE wird mit der bereits genehmigten Erhöhung des Abbrandes 1997 begonnen [NMU 1996]. Für das KKS ist keine Abbranderhöhung vorgesehen.

In Tabelle 4 werden die zukünftig zu erwartenden Brennelementmengen genannt. Zum Vergleich und zur Beurteilung der Auswirkungen bei verschiedenen Zukunftsoptionen werden drei Szenarien unterschieden:

- Szenario 1. Betrieb der Kernkraftwerke bis zu einer angenommenen Lebensdauer von 35 Betriebsjahren. (35 Betriebsjahre werden bei konzeptionellen Betrachtungen auch von den Betreibern unterstellt, siehe z.B. [VDEW 1989] und [GNS 1993])
- Szenario 2. Ausstieg aus der Atomenergie bis zum Jahr 2005 (entsprechend dem prognostizierten Szenario für Niedersachsen).
- Szenario 3. Sofortausstieg (Abschaltung der Kernkraftwerke 1997).

Die Stilllegungszeitpunkte für die Niedersächsischen Kernkraftwerke nach Szenario 1 liegen, bezogen auf die kommerzielle Inbetriebnahme [IK 1992], in den Jahren 2007 für das KKS, 2012 für das KKU, 2019 für das KWG und 2023 für das KKE.

	KKS	KKU	KWG	KKE
Szenario 1	232	552	702	913
Szenario 2	200	356	338	373
Szenario 3	72	132	130	133

**Tabelle 4: Gesamtanfall bestrahlter Brennelemente ab 1996 in niedersächsischen Kernkraftwerken für drei Szenarien.**  
(Angaben in tSM)

## 5.2.2 Lagerkapazitäten

Der Lagerkapazitätsbedarf und dessen Realisierbarkeit an den Standorten soll hier für die niedersächsischen Kraftwerke untersucht werden. In Tabelle 5 sind die dafür benötigten Grunddaten aufgeführt. Aus diesen Grunddaten lassen sich für die drei oben festgelegten Szenarien die benötigten Lagerkapazitäten für die zur Zeit im Reaktorlagerbecken vorhandenen und ggf. noch anfallenden Brennelemente berechnen. Es wird davon ausgegangen, daß die sogenannten Alt-Wiederaufarbeitungsverträge vollständig abgearbeitet werden. Die Neu-Verträge werden hier, entsprechend Grundsatz V (nationale Lösungen) aus Kapitel 3, nicht berücksichtigt. PreussenElektra führt zur Zeit Umwandlungsverhandlungen zu diesen Verträgen. Eine Inanspruchnahme der Neu-Verträge, in welcher Form auch immer, würde zu einer Verringerung der benötigten Lagerkapazitäten an den einzelnen Standorten führen. Insofern ist eine Nichtberücksichtigung im Rahmen der Abschätzung der Lagerkapazitäten konservativ.

Aus den Spalten 6 und 7 der Tabelle 5 sind die der Literatur [VDEW 1989, WISE 1995] zu entnehmenden Mengen aufgeführt, die im Rahmen der sogenannten Altverträge zur Wiederaufarbeitung von niedersächsischen Kernbrennstoffen in La Hague und Sellafield kontrahiert und bereits abgeliefert sind. Mit Ausnahme des KKU wurden für die anderen Kernkraftwerke bisher bereits mehr Brennelemente abgeliefert, als nach diesen Zahlen vertraglich vereinbart. Der Grund dafür kann hier leider nicht geklärt werden, da die konkreten Zahlen der vertraglich vereinbarten Wiederaufarbeitungsmengen nicht zur Verfügung gestellt wurden. Es können hier nur Gründe für die Zahlendifferenzen vermutet werden: Bei den überschüssigen Brennelementen handelt es sich um Lieferungen

- im Rahmen der Neu-Verträge,
- aufgrund von Vertragsmengenverschiebungen einzelner Kernkraftwerke untereinander,
- aufgrund von Zusatzoptionen im Rahmen der Alt-Verträge oder
- im Rahmen der von bundesdeutschen EVU übernommenen schwedischen Wiederaufarbeitungskontingente.

Trifft eine der drei letzten Vermutungen zu, so kann bei Kenntnis des Vertragsstandes die entsprechende Kapazität von den in Tabelle 6 aufgeführten Kapazitäten abgezogen werden.

1	2	3	4	5	6	7	8
Kraftwerk	Core-Inhalt	jährliche Entlademenge	genehm. Lagerkapazität	Lagerbest. 31.12.1995	WA-Verträge (alt)	an WAA abgeliefert 31.12.1995	Behälterkapazität
KKS	56	16	85	8,6	357	363,4	2,86(?)
KKU	104	28	330	108,4	686,6	355,5	10,2(2,15)
KWG	104	26	412	187,2	133	139,4	10,2(2,15)
KKE	103	30	409	213,7	0	19,2	10,2(2,15)

**Tabelle 5: Grunddaten der niedersächsischen Kernkraftwerke.**  
(Alle Angaben in tSM, Quelle für Spalten 2-5,7: [GRS 1996])

In Spalte 8 der Tabelle 5 sind die Kapazitäten der größten für das jeweilige Kraftwerk zugelassenen Transport- und Lagerbehälter sowie in Klammern des POLLUX 4DWR aufgeführt. Beim KKS ist für den POLLUX keine Kapazität angegeben, da aufgrund der geringeren Abmaße der Brennelemente dieses Reaktors eventuell mehr unzerlegte Brennelemente von

einem POLLUX-Behälter aufgenommen werden können. Trotzdem wird für die Abschätzungen hier von 4 Brennelementen für alle Kernkraftwerke ausgegangen.

In Tabelle 6 sind die benötigten Zwischenlagerkapazitäten für die einzelnen Kernkraftwerksstandorte aufgeführt. Darin sind sämtliche im Rahmen der drei Szenarien aus Kapitel 5.2.1 anfallenden Brennelemente (einschl. des gegenwärtigen Lagerbestandes) minus der noch zur Verfügung stehenden Wiederaufarbeitungsmengen nach Altverträgen enthalten. Die Kapazität des Lagerbeckens am Reaktor darf hier wegen des Grundsatzes VI aus Kapitel 3 (keine Einschränkung der Stilllegungsoptionen) nicht für die langfristige Zwischenlagerung in Anspruch genommen werden. Außerdem sind in Tabelle 6 die benötigten Stellplätze für CASTOR- und POLLUX-Behälter in einer Zwischenlagerhalle angegeben.

	benötigte Kapazität in tSM			benötigte Stellplätze		
				CASTOR		POLLUX
Szenario	1	2	3	1	2	3
KKS	240,6	208,6	80,6	85	73	29
KKU	301,3	105,3	0	30	11	0
KWG	889,2	525,2	317,2	88	52	32
KKE	1126,7	586,7	346,7	111	58	34

**Tabelle 6: Benötigte Lagerkapazitäten für die Zwischenlagerung an den Kraftwerksstandorten.**

### 5.2.3 Umsetzung an den Standorten

Die Auswertung zur Umsetzbarkeit der dezentralen Pfade C3 und C4 wird zunächst für die einzelnen Kraftwerke getrennt und anschließend insgesamt vorgenommen.

#### KKS

Die errechneten Zahlen für benötigte Stellplätze in Tabelle 6 zeigen, daß es für beide Behältervarianten, CASTOR IIb und POLLUX, möglich ist, eine entsprechende Lagerhalle zu bauen. Selbst für das Szenario 1, mit den meisten anfallenden Brennelementen, bleibt die benötigte Stellplatzzahl für die CASTOR-Variante deutlich unterhalb der in den 80er Jahren beantragten Stellplatzzahl und überschreitet für die POLLUX-Variante diese Zahl nur knapp. Hierbei ist noch zu berücksichtigen, daß sich die Zahl der POLLUX-Stellplätze verringern könnte, wenn im Falle der KKS-Brennelemente mehr als 4 unzerlegt in einen Behälter eingebracht werden könnten.

Die Angaben in Tabelle 5 zeigen für das KKS, daß kaum Kapazitäten zur Zwischenlagerung von Brennelementen am Standort zur Verfügung stehen. Hier müßte also bis zur Inbetriebnahme eines neuen Behälterlagers am Standort eine Zwischenlösung gefunden werden. Eine externe Zwischenlagerung in einem der zentralen Lagern ist gegenwärtig nur in dem Transport- und Lagerbehälter CASTOR Ib möglich. Dieser besitzt mit 4 Brennelementen aber eine sehr geringe Kapazität. Sofern es im Rahmen der Altverträge keine Optionen gibt, die durch das KKS genutzt werden können, wäre ein möglicher Ausweg die Nutzung von Wiederaufarbeitungsvertragsmengen anderer Kraftwerke der PreussenElektra. Siehe hierzu auch Kapitel 5.2.2.

Soweit bekannt, besteht zwischen den Kraftwerksbetreibern und der BLG ein Vertrag über die Nutzung von 20 Stellplätzen im TBL. Diese werden zum Teil für die HAW-Abfälle benötigt. Selbst bei Nutzung aller Stellplätze mit Behältern für Brennelemente ist diese Kapazität äußerst begrenzt. Nur im Falle eines Sofortausstieges und bei Einsatz von CASTOR V/19 (ein Umladen in diesen Behälter ist allerdings zur Zeit mangels genehmigter Anlage hierfür nicht möglich), wäre die Kapazität ausreichend.

#### KKU

Die für eine außerordentlich große Menge von Brennelementen abgeschlossenen Alt-Wiederaufarbeitsverträge ergeben für das KKU einen relativ geringen Bedarf für Lagerkapazitäten am Standort. Bei einem Sofortausstieg (Szenario 3) gibt es sogar überhaupt keinen Lagerkapazitätsbedarf. Die Fläche für eine Halle mit der benötigten Stellplatzkapazität nach den beiden anderen Szenarien ist für die POLLUX-Variante und erst recht für die CASTOR V/19-Variante auf dem Kraftwerksgelände vorhanden.

Das Lagerbecken des KKU besitzt eine genehmigte Kapazität von 330 tSM. Selbst bei unterstelltem Szenario 1 würde dies, bei Nutzung der Wiederaufarbeitungsaltverträge, für alle Brennelemente ausreichen. Es bestünde kein Zeitdruck für die Errichtung der neuen Lagerhalle.

Seitens des Fachreferates im NMU wurde darauf hingewiesen, daß für das KKU eine Genehmigungsauffrage existiert, die den Vorrang für eine externe Entsorgung der Brennelemente festlegt [NMU 1996]. Da sich dieser Vorrang mindestens überwiegend auf die Wiederaufarbeitung beziehen muß, ist die Existenz dieser Auflage zum gegenwärtigen Zeitpunkt überraschend. Soweit dies ohne weitere Kenntnis der Einzelheiten beurteilbar ist, widerspricht dies der erklärten Absicht der Niedersächsischen Landesregierung, die Wiederaufarbeitung nicht als geeignete Entsorgung anzusehen. Demzufolge hätte diese Auflage längst zurückgezogen werden müssen, um zumindest für über die Alt-Verträge hinausgehende Brennlementmengen den Betreiber von seiner Pflicht zu entbinden.

Das KKU könnte aufgrund der sehr hohen Wiederaufarbeitungskapazität ein Kandidat für die Abgabe bestimmter Mengen an andere Kraftwerke der PreussenElektra AG sein, sofern dies überhaupt notwendig sein sollte.

#### KWG

Die in Tabelle 6 angegebenen Zahlen für die benötigten Stellplätze zeigen, daß der Bau einer Halle am Standort mit entsprechender Kapazität keine Probleme aufwerfen würde. Für die POLLUX-Variante könnte die Hallengrundfläche noch kleiner als die in Gorleben sein. Für den Standort waren ursprünglich zwei Reaktorblöcke geplant, so daß Fläche ausreichend zur Verfügung steht.

Soweit bekannt, besteht zwischen den Kraftwerksbetreibern und der BLG ein Vertrag über die Nutzung von 22 Stellplätzen im TBL. Diese werden zum Teil durch HAW-Abfälle belegt. Die Zahlen für die CASTOR V/19-Variante zeigen, daß unter der Randbedingung "keine Nutzung von Wiederaufarbeitungsneuverträgen" für das KWG auf jeden Fall neue Lagerkapazitäten geschaffen werden müssen.

Das KWG hatte Anfang dieses Jahres im Lagerbecken noch eine freie Kapazität für viereinhalb jährliche Entlademengen. Angesichts des nach den hier vorliegenden Zahlen ausgeschöpften Wiederaufarbeitungskontingentes und bei Vermeidung externer Zwischenlagerung müßte also spätestens Anfang des Jahres 2000 das Behälterlager am Standort ver-

fügbar sein, wenn die Szenarien 1 oder 2 relevant wären. Bei Unterstellung des Szenario 3 trifft dies nicht zu, da die Kapazität des Lagerbeckens für alle Brennelemente ausreichen würde.

### KKE

Auch für das KKE stellen die benötigten Stellplatzzahlen kein Problem dar. Bei einer CASTOR V/19-Lagerung wäre selbst für das Szenario 1 nur eine Lagerhalle von etwa der ehemals für das KKS beantragten Größe notwendig. Die Zahl der POLLUX-Stellplätze für das Szenario 1 ist mit 524 zwar sehr hoch, aber selbst für eine Halle mit dieser Zahl von Stellplätzen wäre östlich der bisherigen Anlage auf dem Kraftwerksgelände Platz.

Das KKE hatte Anfang diesen Jahres im Lagerbecken noch eine freie Kapazität für drei jährliche Entlademengen. Angesichts der nach den hier vorliegenden Zahlen nicht vorhandenen Alt-Wiederaufarbeitungsverträge und bei Vermeidung externer Zwischenlagerung (KKE hat Verträge für die Nutzung von jeweils ca. 50 Stellplätzen in Gorleben und Ahaus) müßte daher spätestens zu Anfang des Jahres 1999 das Behälterlager am Standort verfügbar sein. Dies gilt nicht für den Fall eines Sofortausstieges (Szenario 3).

### Gesamt

Es ist ersichtlich, daß die dezentrale Lagerung in Behältern bezüglich des Platzbedarfes und der technischen Randbedingungen möglich ist. Für drei der vier niedersächsischen Kernkraftwerke besteht ein gewisser Zeitdruck für die Umsetzung des Konzeptes, wenn nicht ein Sofortausstieg aus der Atomenergienutzung unterstellt wird. Da für das KKS aufgrund der geringen Lagerkapazität im Abklingbecken ohnehin Zwischenlösungen gefunden werden müßten, betrüge der zur Verfügung stehende Zeitraum bzgl. KKE 2,5 und bzgl. KWG 3,5 Jahre. Dieser Zeitrahmen erscheint - wenn überhaupt - nur einhaltbar, wenn es einen breiten gesellschaftlichen Konsens über die weitere Nutzung der Atomenergie gibt. Der Druck für die Umsetzung eines neuen Umgangskonzeptes für bestrahlte Brennelemente wäre bei Unterstellung des Szenarios 2 bedeutend geringer und bei einem Ausstieg (Szenario 3) nicht vorhanden.

Der Einwand seitens des Fachreferates [NMU 1996], daß sich die Betreiberseite bisher gegen eine stärkere Zwischenlagerung am Kraftwerksstandort ausgesprochen hat, ist nicht von schwerwiegender Bedeutung, da vermutlich die Zwischenlagerung in den Lagerbecken gemeint ist und ein Vorgehen, wie es in diesem Beratungsauftrag vorgeschlagen wird, nur im Konsens mit den Betreibern umgesetzt werden kann. Dieser Konsens sollte aber unter Berücksichtigung des in den letzten Jahren dringend geäußerten Wunsches der Betreiber nach einem Gesamtkonsens über die Nutzung der Atomenergie erreichbar sein.

## 6. Dezentrale Konditionierung von Brennelementen

Die Entscheidung für zentrale oder dezentrale Konditionierung ist nur für eine zentrale Zwischenlagerung von vornherein festgelegt. In diesem Fall kommt nur die zentrale Konditionierung in Frage. Für den Fall dezentraler Zwischenlagerung ist sowohl eine zentrale wie auch eine dezentrale Konditionierung der Brennelemente möglich. Aus den in Kapitel 4 erarbeiteten Ergebnissen zeigt sich jedoch, daß eine dezentrale Konditionierung deutliche Vorteile hat.

Nicht berücksichtigt wird bei den weiteren Betrachtungen zur Konditionierung die Möglichkeit der Zerkleinerung von Brennstäben, wie es in früheren Jahren als Rückfallstrategie vorgesehen war. Seit dem Nachweis der Förderbarkeit von Massen bis zu 80 t in einem Endlager wird diese Option jedoch auch von Betreiberverseite nicht mehr intensiv weiter verfolgt. So wurde das Interesse an der Genehmigung einer entsprechenden Zerkleinerungs-technik im Rahmen des Verfahrens zur Pilotkonditionierungsanlage seitens des Antragstellers zurückgestellt.

In diesem Kapitel sollen zunächst in der Vergangenheit durchgeführte Studien zur Brennelementkonditionierung analysiert und bewertet werden. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse werden dann eigene Überlegungen zur Machbarkeit dezentraler Konditionierung angestellt.

### 6.1 Vorliegende Studien zur Brennelementkonditionierung

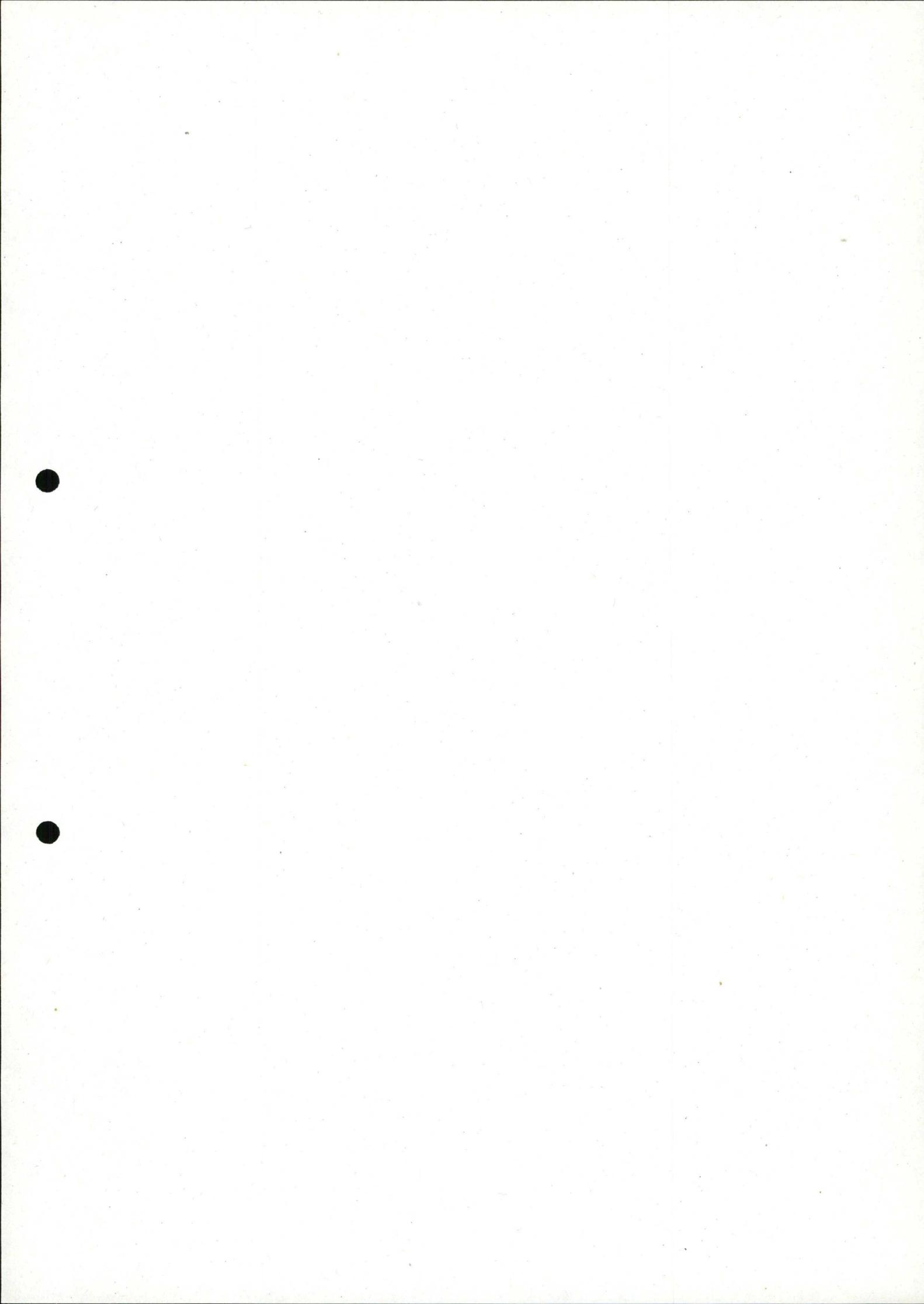
Bisher veröffentlichte Studien zur Konditionierung von Brennelementen in der Bundesrepublik, die für die Bearbeitung dieses Beratungsauftrages relevant sind, werden im folgenden kurz analysiert und in ihrer Aussagekraft bewertet. Diese Studien stellen zum Teil Zusammenfassungen einzelner Fachberichte dar, die nicht veröffentlicht wurden. Einzelne Ausführungen in den Studien sind durch die Nichtveröffentlichung der Fachberichte nicht immer nachvollziehbar. Der kurzen Beschreibung und dem Ergebnis der Studien wird im folgenden eine Bewertung (*kursiv*) hinsichtlich der hier angestellten Konzeptüberlegungen angehängt.

#### PAE 1981

Im Rahmen des Projektes "Andere Entsorgungstechniken" (PAE) wurden zu Beginn der 80er Jahre Plausibilitätsuntersuchungen zu verschiedenen Möglichkeiten der Brennelementkonditionierung durchgeführt [KfK 1981]. Dabei wurden nur die beiden Entsorgungsschritte Konditionierung und Endlagerung berücksichtigt.

Das vorgeschlagene Prinzip bestand in der Vorkonditionierung der Brennelemente in eine gasdichte Trockenlagerbüchse, deren Zwischenlagerung und, unmittelbar vor der Endlagerung, der Verpackung der Büchsen in korrosions- und gebirgsdruckbeständige Endlagerbehälter. Die Vorkonditionierung beinhaltete drei Varianten: Unzerlegte Brennelemente, in Brennstäbe zerlegte Brennelemente und zerkleinerte Brennstäbe.

Die Autoren betonen, daß unter den von ihnen vorgeschlagenen Vorkonditionierungsme-thoden im Rahmen ihrer Untersuchung keine Prioritäten festgelegt werden sollen. Der dort angelegte Maßstab ergibt bei Nichtberücksichtigung der Zerkleinerung jedoch klare Vor-



teile für unzerlegte Brennelemente bei der Vorkonditionierung und geringe Vorteile für die Brennelementzerlegung bei derendlagerung. Insgesamt hat der Pfad ohne Zerlegung deutliche Vorteile. Dieser Gesamtvorteil vergrößert sich noch, je höher sicherheitstechnische Kriterien gewichtet werden.

*Das Ergebnis deckt sich im wesentlichen mit den Ausführungen in Kapitel 4.1 und muß daher nicht weiter bewertet werden.*

### PAE 1983

Die erste Studie für die Bundesrepublik zur Frage, ob die Konditionierung der BE dezentral (Kraftwerksstandorte) oder zentral (Konditionierungsanlage) vorgenommen werden sollte, wurde 1983 ebenfalls im Rahmen von PAE durchgeführt [NUKEM/DWK 1983]. Die Ergebnisse werden von den Autoren als "Abschätzungen" betrachtet. In der Studie wird davon ausgegangen, daß die Brennelemente zunächst in eine Edelstahlbüchse kommen, diese mit einem Deckel verschweißt wird und die verschweißte Büchse in einen Endlagerbehälter (der nicht zwischenlager- und transportfähig ist) eingebracht wird.

Für die Konditionierung der Brennelemente am Kraftwerksstandort werden drei Möglichkeiten betrachtet: Sie könnte vollständig unter Wasser im Brennelementlagerbecken (Variante A), vollständig in einer Heißen Zelle im Bereich des Lagerbeckens (B) oder zum Teil unter Wasser und zum anderen Teil in einer kleineren, beweglichen Heißen Zelle in der Nähe des Lagerbeckens (C) durchgeführt werden. Diese drei Varianten werden hinsichtlich bestimmter Kriterien überprüft.

Platzbedarf. Der erforderliche Platz für die Einrichtungen zum Verschließen und Prüfen der Behälter ist bei Variante A "evtl. mit geringer Auswirkung" auf die Brennelementlagerkapazität vorhanden. Die Errichtung einer ortsfesten Heißen Zelle im Containment (B) wird für ausgeschlossen, die Variante C wird für realisierbar gehalten.

Kraftwerksbetrieb. Für die Konditionierung wird ein Zeitbedarf von mindestens 60 Arbeitstagen angenommen und von daher eine Auswirkung auf den Betrieb gesehen. Aus technischen Gründen (mögliche Beeinflussung der Reaktorsteuerung) wird es für erforderlich gehalten, die Schweißarbeiten nur bei abgeschaltetem Reaktor vorzunehmen. Daraus könnte sich eine Einschränkung der Verfügbarkeit des Reaktors ergeben.

*Die oben betrachteten Punkte sind für die zentrale Konditionierung von Brennelementen irrelevant und sind daher im Vergleich zentral/dezentral als Nachteile der dezentralen Lösung anzusehen. Die Errichtung einer heißen Zelle im Containment erscheint in der Tat als nicht realisierbar. Ob auch mit heutiger Technik noch ein gravierender Einfluß der Schweißarbeiten auf die sichere Betriebsführung des Reaktors zu erwarten ist, müßte an anderer Stelle (z.B. zweite Phase des Beratungsauftrages) geprüft werden.*

Die weiteren Vergleiche ergaben:

Dosisbelastung. Durch den veranschlagten größeren Zeitaufwand bei einer Konditionierung unter Wasser und die bessere Abschirmung einer Heißen Zelle gegenüber dem Bekkenwasser wird die Belastung bei zentraler Konditionierung für geringer gehalten.

Qualitätssicherung. Es werden Vorteile bei der zentralen Konditionierung gesehen, da die Verfahren unter Wasser noch nicht erprobt sind.

*Der Unterschied für die Strahlenbelastungen ist für den in der Studie gewählten Weg des relativen Vergleiches nicht sehr hoch. Die Frage ist, wie entwickelt sich der Unterschied, wenn tatsächliche Dosis/Zeit-Betrachtungen durchgeführt und nicht relative Niveaus verglichen werden. Die Zahl von Einzelschritten, die Auswirkungen auf die Strahlenbelastung*

haben, ist bei dem heute umsetzbaren Vorgehen für eine zentrale Lösung größer als in der Studie angenommen. Eine Erprobung der Konditionierung mit bestrahlten Brennelementen liegt weder für einen zentralen, noch für einen dezentralen Pfad im nennenswerten Umfang vor.

In der Gesamtbewertung der Autoren heißt es: "... aufgrund des unterschiedlichen Entwicklungsstandes ist zur Zeit eine zentrale Heiß-Zellen-Konditionierungsstation der Unter-Wasser-Technik vorzuziehen".

Dieser Schlußfolgerung ist aus heutiger Sicht nicht ohne weiteres zu folgen (siehe unten). Ein direkter Bezug auf die heutige Situation ist auch schwierig, da in der Studie davon ausgegangen wurde, daß der Endlagerbehälter zusätzlich in einen Transportbehälter eingesetzt werden muß, was beim POLLUX wegfällt. Proliferationsgesichtspunkte wurden nicht berücksichtigt.

## PTE 1992

Im Auftrag des Kernforschungszentrum Karlsruhe, Projektträgerschaft Entsorgung (PTE), wurde im Rahmen der Arbeiten zur Direkten Endlagerung eine vergleichende Untersuchung zur zentralen und dezentralen Konditionierung abgebrannter Brennelemente durchgeführt [EWI 1992]. Bezuglich der notwendigen Abklingzeit der Brennelemente bis zur Endlagerung wurden als Randbedingungen eine 10-jährige Zwischenlagerung in den Lagerbecken der Kraftwerke und eine anschließende 20-jährige Lagerzeit im Zwischenlager festgelegt. Es wurden drei Varianten untersucht:

- A) Nach 10-jähriger Lagerung im Kraftwerks-Lagerbecken werden je 21 Brennelemente in Transport- und Lagerbehältern zu einem zentralen Zwischenlager transportiert und dort 20 Jahre gelagert. Sie werden dann in einer zentralen Anlage konditioniert und in POLLUX-Behältern in das Endlager gebracht.
- B) Nach 10-jähriger Lagerung im Kraftwerks-Lagerbecken werden je 4 Brennelemente im Kraftwerk unzerlegt in einen POLLUX-Behälter verpackt und in ein zentrales Zwischenlager transportiert. Nach 20 Jahren erfolgt dann der Transport in das Endlager.
- C) Nach 10-jähriger Lagerung im Kraftwerks-Lagerbecken werden je 8 Brennelemente im Kraftwerk zerlegt und in einen POLLUX-Behälter verpackt. Es folgt der Transport in ein zentrales Zwischenlager. Nach 20 Jahren erfolgt dann der Transport in das Endlager.

Diese drei Varianten wurden hinsichtlich verschiedener Kriterien verglichen.

Platzbedarf. Die Beladung des POLLUX-Behälters im Containment erfordert für die Varianten B) und C) zusätzliche Einrichtungen. Der Platzbedarf für die Schweißstation und die Hefüllanlage wird mit 20 m<sup>2</sup> geschätzt. Dieser Platz ist nach EWI in vielen Kraftwerken schwer oder möglicherweise gar nicht bereitzustellen. Für die Variante C) werden zusätzliche Platzprobleme im Lagerbecken, insbesondere bei älteren Reaktoren gesehen, da hier die Einrichtungen für die Zerlegung der Brennelemente und die Kompaktierung der Strukturteile erfolgen muß.

Der Umfang des benannten Platzbedarfs ist in Frage zu stellen. Die Autoren gehen offenbar fälschlicherweise davon aus, daß eine He-Befüllung nur für den POLLUX-Behälter benötigt wird. Dagegen werden fast alle trocken durchgeföhrte Transporte und auf jeden Fall die Zwischenlagerung mit He-gefüllten Behältern durchgefördert. Ein gekapselter Schweißstand ist nur unter der Voraussetzung, daß nach wie vor das Problem der elektromagnetischen Beeinflussung des Reaktorschutzsystems besteht, notwendig. Die Schweißung des Sekundärdeckels des Endlagerbehälters im Containment ist nur bei sofortigem Abtransport des Behälters erforderlich. Bezuglich der Zerlegung der Brennelemente ist darauf zu ver-

weisen, daß entsprechende Einrichtungen für den Fall von Brennstabhüllrohrsäden bereits in allen Kraftwerken existieren. Zu berücksichtigen ist, daß diese Einrichtungen bisher nicht regelmäßig im Einsatz sind und keine Kompaktierungsmöglichkeit beinhalten.

Kraftwerksbetrieb. Für die Variante C) wird durch die Zerlegung der Brennelemente im Lagerbecken ein gravierender Eingriff in den Kraftwerksbetrieb gesehen. Auf der Grundlage eines Wochenzyklus für den An- und Abtransport eines Behälters wird aufgrund der Logistik im Kraftwerk (3 Monate stehen die Hantierungseinrichtungen für die Abfertigung zur Verfügung) die Variant B) für gerade noch machbar und die Variante C) nur noch mit Einschränkungen für den Reaktorbetrieb machbar angesehen.

*Ohne die Fixierung auf den Wochenzyklus ergibt sich ein anderes Bild. Selbst bei zusätzlicher Berücksichtigung einer 30%igen Pufferzeit können die Varianten B) und C) innerhalb der drei Monate absolviert werden.*

Zwischenlagerbedarf. Die Zahl der notwendigen Stellplätze in den zentralen Zwischenlagern ist für die Varianten B) und C) deutlich höher als für A).

*Der insgesamt höhere Zwischenlagerbedarf ist unbestreitbar. Es wird jedoch nicht berücksichtigt, daß zwischen einer zentralen Konditionierung und der Endlagerung mindestens Pufferlagerkapazität, möglicherweise sogar ein richtiges Zwischenlager benötigt wird. Dies verringert den Vorteil der Variante A). Außerdem ist für die Varianten A) und C) zusätzlicher Zwischenlagerbedarf für Sekundärabfälle zu berücksichtigen.*

Transporte. Die Zahl der Transporte zwischen den verschiedenen Einrichtungen ist für Variante B) am größten (ungefähr doppelt so hoch).

*Es wird nicht berücksichtigt, daß bei Variante B) keine Sekundärabfälle aus der Konditionierung transportiert werden müssen und die Zahl dieser Transporte für Variante A) höher sein dürfte als für Variante C). Weiteres zu Transportzahlen siehe in der Gesamtbewertung.*

Konditionierungseinrichtungen. Für die Variante A) wird der Bedarf von 3 Konditionierungseinrichtungen an möglichst einem Standort gesehen. Bei Variante C) müßte jeweils eine an jedem Kraftwerksstandort eingerichtet werden.

*Hieraus ist ein eindeutiger Vorteil für Variante B) zu erkennen. Eine Zerlegeeinrichtung existiert bereits in jedem Reaktorlagerbecken für den Fall von Hüllrohrsäden.*

Strahlenbelastung. Die Strahlenbelastung für das Personal wird stark vereinfacht aus den Hantierungszeiten abgeleitet. Es wird in erster Näherung von einer deutlich geringeren Strahlenbelastung für die Variante A) und der höchsten für die Variante B) ausgegangen. Aufgrund der ermittelten Transportzahlen wird davon ausgegangen, daß die Strahlenbelastung für die Bevölkerung bei Variante A) voraussichtlich am niedrigsten ist. Die Ortsdosisleistung der Behälter wird für alle gleich angenommen.

*Die zeitproportionale Ableitung berücksichtigt nicht, daß einzelne Schritte bei der Hantierung fernbedient durchgeführt werden. Bei der Zeitermittlung wurde darüber hinaus die höhere Zahl der Hantierungen und Transporte für die Sekundärabfälle bei A) und C) nicht berücksichtigt.*

*Überhaupt nicht berücksichtigt ist die mögliche Erhöhung der Strahlenbelastung durch Freisetzung bei der Zerlegung.*

Sekundärabfälle. Trotzdem für Variante A) die mit Abstand höchste Sekundärabfallmenge ermittelt wurde, wollen die Autoren keine Vorteile für eine der anderen Varianten ableiten.

Eine Gesamtabwägung unter Berücksichtigung aller Aspekte ist in der Studie nicht enthalten. In der Kurzfassung wird lediglich auf Probleme mit der Hantierungszeit und dem Platzbedarf sowie mögliche Einflüsse der Schweißtechnik hingewiesen und deshalb die dezentrale Lösung für nicht sinnvoll gehalten. Bei der Bewertung fanden Proliferation und Unfallrisiko (in einem Nebensatz wird nur für die Transportzahl darauf hingewiesen) keine Berücksichtigung.

*Randbedingung für die Bewertungen in [EWI 1992] ist eine zentrale Zwischenlagerung. Dadurch ist ein hoher Handhabungsaufwand, insbesondere in bezug auf die POLLUX-Behälter bedingt. Die Vorteile der dezentralen Konditionierung durch Minimierung der Transporte und Hantierungsschritte in Verbindung mit der dezentralen Zwischenlagerung bleiben damit unberücksichtigt. Außerdem gelten die Aussagen der Studie insbesondere dann, wenn die Nutzung der Atomenergie unbegrenzt weiter erfolgt und damit bestimmte Flexibilitäten in einer zentralen Konditionierungsanlage leichter zu gewährleisten sind. Als Transport- und Lagerbehälter wurde der CASTOR V/21 ausgewählt. Dieser Behälter hat eine Kapazität von 21 DWR-Brennelementen. Damit kann dieser Behälter mehr Brennelemente als jeder andere zur Zeit bekannte aufnehmen. Der Einsatz dieses Behälters ist in der Bundesrepublik allerdings - wenn überhaupt - nur für 2 der in Betrieb befindlichen Kraftwerke vorgesehen. Es existiert weder eine Genehmigung für die Lagerung von Brennelementen in diesem Behälter, noch ein Genehmigungsantrag. Durch die höhere Kapazität wird der benötigte Lagerraum und die Zahl der notwendigen Hantierungen und Transporte für die zentrale Konditionierung zu gering angesetzt. Die Hantierungszeit für A) erhöht sich zusätzlich, wenn berücksichtigt wird, daß in älteren Kraftwerken nur kleinere Behälter handhabbar sind. Darüber hinaus muß bei gegenwärtiger Situation berücksichtigt werden, daß durch die Lage von zentralem Zwischenlager und zentraler Konditionierungsanlage in Gorleben Umladevorgänge auf dem Verladebahnhof in Dannenberg notwendig sind. Insgesamt bedeutet dies eine deutliche Relativierung der positiven Bewertung der zentralen Konditionierung in [EWI 1992].*

## 6.2 Machbarkeit dezentraler Konditionierung

Für die Frage der Machbarkeit dezentraler Konditionierung ist zunächst die Unterscheidung zwischen zerlegter und unzerlegter Verpackung der Brennelemente inendlagerbehälter relevant. Aufgrund der zusätzlich notwendigen Handhabung war bereits die bisherige Position des zuständigen Beiratausschusses, daß die Zerlegung als mögliche Konditionierungsvariante nicht weiter verfolgt werden sollte. Dies ist auch das Ergebnis vertiefender Betrachtungen in dieser Arbeit (siehe Kapitel 4).

Die Variante der unzerlegten Konditionierung hat den Vorteil, daß vor der POLLUX-Beladung eine kürzere Abklingzeit erforderlich ist, um die Wärmeabfuhrleistung beim POLLUX einzuhalten. Dies sichert eine bessere Flexibilität bei der logistischen Planung der Einlagerung ins Endlager.

Der notwendige Konditionierungsvorgang würde sich für die unzerlegte Variante auf die Verpackung in die POLLUX-Behälter beschränken. Im folgenden wird eine Einschätzung der Machbarkeit für die nasse und trockene Konditionierung gegeben.

### 6.2.1 Nasse Konditionierung

Die Konditionierung der Brennelemente in POLLUX-Behältern unter Wasser ist nur für den Pfad C4 aus Kapitel 4.2 relevant. Es ist bei der Diskussion zu berücksichtigen, daß ein grosser Teil der Brennelemente aufgrund der in diesem Beratungsauftrag unterstellten Randbedingungen erst nach Abschaltung des Reaktorbetriebes erfolgt. Insofern sind Betriebs-einschränkungen durch die Konditionierung, sofern sie auftreten, nicht so problematisch wie bei einem unbegrenzten Weiterbetrieb der Anlagen.

Der Konditionierungsvorgang wäre wie folgt:

- Einbringen eines Brennelementes in eine Büchse
- Verschweißen (oder bzgl. Gewährleistung von Langzeitdichtheit vergleichbares Verfahren) der Büchse
- Einstellen der Büchsen in POLLUX-Behälter und Aufsetzen des Primärdeckels des Endlagerbehälters
- Verschrauben des Primärdeckels
- Trocknung und Evakuierung des Endlagerbehälters
- Befüllung mit Inertgas
- Verschweißen des Sekundärdeckels des Endlagerbehälters sowie Verschrauben des Abschirmbehälterdeckels.
- Trocknung des Zwischenraumes Endlager-/Abschirmbehälter des POLLUX

Es sind für die Umsetzbarkeit zwei Hauptprobleme zu berücksichtigen:

1) Der notwendige Platz im Lagerbecken der Reaktoren

2) Einsetzbarkeit der notwendigen Techniken.

Hierfür soll im folgenden eine erste Einschätzung gegeben werden.

zu 1) Platz im Lagerbecken

Die Behälterabstellposition im Lagerbecken kann für einen POLLUX-Behälter kleiner sein als für einen CASTOR. Der äußere Durchmesser des CASTOR beträgt knapp 2,5 m, der des POLLUX 1,6 m [BLG 1992]. Dementsprechend ist der Flächenbedarf für den CASTOR mindestens  $4,9 \text{ m}^2$  und für den POLLUX mindestens  $2 \text{ m}^2$ .

Um einen Anhaltspunkt zu gewinnen, wie groß der Platzbedarf für die Einbringung der Brennelemente in Büchsen ist, werden hier Aussagen zu Untersuchungen zur Brennelementkonsolidierung herangezogen. Die Konsolidierung (Verdichtung von Brennelementen durch Zerlegung und Einbringen der Brennstäbe in Büchsen) wurde an mehreren Standorten in den USA und an einem Standort in der BRD untersucht. Die Untersuchungen zur Lizenzierung in den USA wurden im Lagerbecken des Reaktors Millstone 2 durchgeführt [NEI 1991]. Die meisten anderen Versuchsanlagen befanden sich ebenfalls in einem Reaktorlagerbecken. Die benötigte Grundfläche für die Anlage betrug knapp  $2,5 \text{ m}^2$  [Maillet 1989]. In der BRD wurden Ende der 80er Jahre ebenfalls Untersuchungen zur Konsolidierung von Brennelementen in Reaktorlagerbecken durchgeführt [PEEHS 1988]. Über Ergebnisse sind in der einschlägigen Fachliteratur leider keine Veröffentlichungen erschienen. Bei dem konkreten Projektstand ist jedoch davon auszugehen, daß die prinzipielle Machbarkeit der Konsolidierung in Reaktorlagerbecken in bezug auf den Platz vorher geprüft wurde. Dies sollte zumindest für alle Reaktoren der Konvoi- und Nachkonvoilinie gelten. Auf jeden Fall war für die Konsolidierung in der BRD die dichte Verschließung der Büchse Randbedingung. Allerdings liegen keine Informationen über die vorgesehene Verschließtechnik vor.

Möglicherweise benötigt die Schweißtechnik für Büchse und Endlagerbehälter mehr Platz als die Verschließtechnik für die Konsolidierung. Der Platzbedarf für die Konditionierung kann sich im Vergleich zu dem oben angegebenen also durch die Schweißeinrichtung erhöhen. Andererseits würde er sich auch ein wenig verringern, da anstatt der dortigen drei Positionen in den Abmessungen eines Brennelementes hier nur zwei notwendig wären und das Kompaktierungsmodul für die Strukturteile wegfallen könnte.

Platzreduzierend würde sich wahrscheinlich auswirken, wenn statt der Schweißtechnik eine andere Verschlußtechnik eingesetzt werden könnte. Außerdem muß der Sekundärdeckel des Behälters nicht im Lagerbecken verschweißt werden. Im Falle der dezentralen Zwischenlagerung kann dies, wie auch weitere der oben benannten Handhabungen, auch in der Zwischenlagerhalle am Standort geschehen.

Insgesamt wird hier aus den obigen Vergleichen die vorhandene Fläche in den Lagerbecken als ausreichend für die notwendigen Konditionierungsschritte eingeschätzt.

#### zu 2) Einsetzbarkeit der notwendigen Techniken

Es ist zu prüfen, ob es Probleme hinsichtlich des Verschweißens von Büchse und Sekundärdeckel des POLLUX im Lagerbecken sowie der Trocknung des POLLUX-Behälters gibt. Eine nasse Beladung des POLLUX ist bisher nicht vorgesehen und demzufolge der Behälter hierfür auch nicht optimiert. Können die angesprochenen Probleme überwunden werden, spricht allerdings nichts grundsätzlich dagegen.

Für die Beurteilung der Schweißtechnik für Büchse und Behälter sowie deren Einfluß auf die Reaktorsteuerung ist eine weitergehende Prüfung notwendig, die nicht im Rahmen dieser konzeptionellen Überlegungen geleistet werden kann. Die Verschweißung des Sekundärdeckels muß, wie bereits ausgeführt, nicht im Lagerbecken erfolgen.

Das größte Problem bei der Trocknung dürfte die mit dem Brennelement beladene Büchse unter Wasser aufwerfen. Eine Realisierung erscheint nicht unmöglich, müßte jedoch intensiv geprüft werden. Die Trocknung des Endlagerbehälterinnenraumes dürfte einfacher als beim CASTOR sein, da sich die Brennelemente bereits in Büchsen befinden. Auch die Trocknung des Raumes zwischen Endlager- und Abschirmbehälter dürfte technisch ebenfalls kein unüberwindbares Problem darstellen. Eine Beeinträchtigung der Barrierenfunktionen durch ungenügende Trocknung für die Endlagerung muß ausgeschlossen werden.

Eine endgültige Aussage der Machbarkeit der Konditionierung direkt vom Lagerbecken des Reaktors in den POLLUX kann hier nicht getroffen werden. Dazu müßten einige technische Fragen detailliert untersucht werden, was nicht Aufgabe in dieser Arbeit sein kann. Unter diesem Vorbehalt wird die Technik jedoch grundsätzlich für machbar gehalten.

#### 6.2.2 Trockene Konditionierung

Die trockene Konditionierung ist das bisher als Referenzverfahren in der BRD verfolgte Konzept. Die Variante mit unzerlegten Brennelementen entspricht dem Pfad C3 aus Kapitel 4.2. Da diese Konditionierung vollständig außerhalb des Containment erfolgt, können sich durch die Konditionierung auch keine Betriebseinschränkungen für den Reaktorbetrieb ergeben.

Der Konditionierungsvorgang wäre wie folgt:

- Entnahme eines Brennelementes aus dem CASTOR und Einbringen in eine Büchse
- Verschweißen der Büchse

- Einstellen der Büchse in einen POLLUX-Behälter und Aufsetzen und Verschrauben des Primärdeckels des Endlagerbehälters
- Evakuierung des Endlagerbehälters und Befüllung mit Inertgas
- Verschweißen des Sekundärdeckels des Endlagerbehälters sowie Verschrauben des Abschirmbehälterdeckels.

Da diese Konditionierung eine vereinfachte Variante der in der PKA vorgesehenen Konditionierung darstellt, müssen in diesem Rahmen keine Überlegungen zur technischen Machbarkeit angestellt werden. So stellt sich nur die Frage nach dem Platzbedarf.

In der im Genehmigungsverfahren befindlichen Pilotkonditionierungsanlage beträgt das Volumen der heißen Zelle  $3.750 \text{ m}^3$  [STERNER 1992]. Daraus kann ein Flächenbedarf für die Heiße Zelle von ca.  $350 \text{ m}^2$  insgesamt abgeschätzt werden. Diese Anlage ist jedoch für einen kommerziellen Durchsatz von 450 bis 500 tSM/a (siehe z.B. [HENSING 1995]) sowie zur Zerlegung in und Zerschneidung von Brennstäben konzipiert. Außerdem sind zwei Pufferlager vorgesehen. Für den hier vorzusehenden reinen Einbüchsvorgang für die am Standort angefallenen Brennelemente kann ein Großteil der für die PKA vorgesehenen Einrichtungen, einschließlich Pufferlager wegfallen. Daher dürfte der Platzbedarf erheblich geringer sein. Eine Heiße Zelle, z.B. mit einer Grundfläche von ca.  $150 \text{ m}^2$ , sollte an die Transportbehälterlagerhalle angliederbar sein.

Die Machbarkeit der dezentralen trockenen Konditionierung ist gegeben.

## 7. Zusammenfassung

In der Bundesrepublik Deutschland wird gegenwärtig für den Umgang mit Brennelementen zwischen ihrer Entladung aus dem Reaktor-Lagerbecken und der Endlagerung ein zentrales Umgangskonzept verfolgt. In der politischen und fachlichen Diskussion nimmt jedoch die Forderung nach einem dezentralen Konzept zu. Durch den vorliegenden Beratungsauftrag werden die Machbarkeit und die Vorteile der dezentralen Zwischenlagerung und Konditionierung, das heißt Umgang mit Brennelementen am Standort des Kernkraftwerkes bis unmittelbar vor Abtransport zur Einlagerung in ein Endlager, im Rahmen eines Ausstieges aus der Atomenergienutzung zur Stromproduktion aufgezeigt.

Die dezentrale Zwischenlagerung wird in vielen Staaten, allerdings mit unterschiedlicher Lagertechnik, verfolgt. Die Konditionierung der Brennelemente beschränkt sich in diesen Staaten entweder auf das Verpacken in den Endlagerbehälter, z.B. in Schweden, oder es ist wie in den USA noch nicht endgültig darüber entschieden.

In der Bundesrepublik sind Untersuchungen, in denen ein detaillierter sicherheitstechnischer Vergleich zwischen zentralem und dezentralem Umgang durchgeführt wird, nicht veröffentlicht. Die drei diesbezüglichen im Rahmen von F + E Programmen angefertigten Studien wurden hier, soweit möglich, analysiert. Unter den heute gegebenen Ausgangsvoraussetzungen können sie nicht als Beweis für die Bevorzugung des zentralen Konzeptes herangezogen werden. Der Zweifel am Vorteil einer dezentralen Konditionierung sowie der auftretenden Probleme in der EWI-Studie von 1992 liegt in den vorgegebenen Randbedingungen begründet. Dort wird nur die Dezentralisierung der Konditionierung und nicht der Zwischenlagerung und darüber hinaus eine zu große Kapazität für den Zwischenlagerbehälter unterstellt. Sie beziehen sich außerdem hauptsächlich auf eine Zerlegung der Brennelemente im Reaktorbecken.

Die verschiedenen Umgangspfade der zentralen und dezentralen Behandlung von Brennelementen wurde anhand von Kriterien bewertet, die hauptsächlich an der Minimierung der potentiellen Strahlenbelastung aller beteiligten Personen orientiert sind. Darüber hinaus wurden übergeordnete Randbedingungen und Grundsätze (auch politischer Art) berücksichtigt. Dabei ergaben sich insgesamt aufgrund der geringeren Anzahl von Handhabungen, Transporten und benötigten Standorten für Atomanlagen klare Vorteile für die dezentrale Konditionierung und die dezentrale Zwischenlagerung in CASTOR- oder POLLUX-Behältern. Zur endgültigen Entscheidung zwischen diesen beiden Zwischenlagertechniken müssen noch vertiefende Untersuchungen durchgeführt werden. Der Auftrag für die vorliegende Arbeit beinhaltete die konzeptionelle Ausführung des dezentralen Ansatzes und eine grundsätzliche Beurteilung der Umsetzbarkeit.

Für die Umsetzbarkeit der dezentralen Zwischenlagerung in Behältern ergaben sich unter Berücksichtigung der hier zugrundegelegten Zahlen für den Anfall bestrahlter Brennelemente in Niedersachsen keine Probleme. Grundsätzlich ist die dezentrale Zwischenlagerung auch an allen anderen Kernkraftwerksstandorten in der Bundesrepublik möglich. Eine zahlenmäßige Bewertung steht hierfür allerdings noch aus.

Für die Umsetzbarkeit der dezentralen Konditionierung werden für den Fall, daß sie in einer Heißen Zelle außerhalb des Reaktor-Containments (bspw. im Behälterlager) erfolgt, ebenfalls keine Probleme identifiziert. Bei einer Konditionierung ganz oder teilweise im Lagerbecken des Reaktors treten (insbesondere bei einer Zerlegung der Brennelemente) Pro-

bleme auf, die aber als grundsätzlich lösbar eingeschätzt werden. Diese Einschätzung gilt für die niedersächsischen Kernkraftwerke und die übrigen DWR im Bundesgebiet. Für SWR müssen hier eigene Untersuchungen durchgeführt werden.

Die Realisierungsmöglichkeit eines dezentralen Konzeptes hängt eng mit einem breiten gesellschaftlichen Konsens zum Ausstieg aus der Atomenergie zusammen. Relevant sind dabei vor allem die Punkte Höhe der notwendigen Zwischenlagerkapazität, Wechselwirkungen zwischen Reaktorbetrieb und dezentralem Umgang mit den Brennelementen sowie die Dauer der Genehmigungsverfahren. Je schneller der Ausstieg erfolgt, um so geringer sind die Probleme, die in technischer, logistischer, rechtlicher und politischer Hinsicht auftreten können.

## 8. Ausblick für Phase 2

Der Beratungsauftrag ist in zwei Phasen geplant. Nach den Ergebnissen der hier vorliegenden Phase 1 kann der Inhalt für die Phase 2 konkreter festgelegt werden. Aus Sicht des Autors wären folgende Themen vorrangig zu bearbeiten:

- Detailliertere Feststellung der an den Standorten notwendigen Einrichtungen und deren sicherheitstechnische Betrachtung.
- Detaillierung des Vergleiches der Pfade C3 (Zwischenlagerung in CASTOR-Behältern und anschließende Konditionierung unmittelbar vor dem Abtransport ins Endlager) und C4 (Konditionierung und anschließende Zwischenlagerung in POLLUX-Behältern) unter verstärkter Einbeziehung der Endlagerproblematik.
- Vertiefende Betrachtungen der Verschlußtechnik für die Büchsen und die Trocknungs-technik.
- Untersuchung des Einflusses der für die Umgangspfade in unterschiedlicher Höhe anfallenden Sekundärabfälle auf das Ergebnis (Strahlenbelastung, Zwischen- und Endlager-kapazität, usw.).
- Überprüfung der Gültigkeit der Ergebnisse für Siedewassere reaktoren.
- Übertragung des Ansatzes auf die gesamte Bundesrepublik.

## Literaturverzeichnis

- APPEL 1993 D. Appel: Vor- und Nachteile zentraler und dezentraler Endlagerung; Beratungsauftrag im Rahmen des Beirat für Fragen des Kernenergieausstiegs (BFK), März 1993
- ATW 1994 atomwirtschaft/atomtechnik, 39 Jg. Heft 11, Seite 738, November 1994
- BANCK 1992 J. Banck und M. Peehs: Langfristige Zwischenlagerung abgebrannter Brennelemente; Deutsches Atomforum, 14. - 15. September 1992
- BAUMGÄRTEL 1995 G. Baumgärtel et al.: "Lagerung von abgebrannten Brennelementen"; Deutsches Atomforum e.V., Aktueller Sonderdruck 1995
- BFK 1995 Protokoll der Sitzung des Ausschusses Kriterien und methodische Vorgaben für Entsorgungskonzepte, Beirat für Fragen des Kernenergieausstiegs (BFK), am 25.09.1995
- BLG 1992 Brennelementlager Gorleben GmbH: Transportbehälterlager Gorleben, Sicherheitsbericht; BLG/TF4/F/1010/HA/003/02, Gorleben, Dezember 1992
- EWI 1992 K. Scheffler und C. Tepel: Vergleichende Untersuchung zur zentralen und dezentralen Konditionierung abgebrannter Brennelemente für die Direkte Endlagerung; Elektrowatt Ingenieurunternehmung GmbH - Projektträgerschafft Entsorgung, KfK 5107, Dezember 1992
- GNS 1993 Gesellschaft für Nuklear-Service mbH: Strategische Überlegungen zur Zwischen- und Endlagerung.- Bericht-Nr. GNS TE B 06/93, Essen Juni 1993.
- GP 1992 Greenpeace e.V.: Konzept zum Ausstieg aus der Atomenergie bis zum Jahr 2000; erstellt im Rahmen der Konsensgespräche 1992/93; Dezember 1992.
- GRS 1992 W. Mester: Daten zu kerntechnischen Anlagen und Verfahren des Brennstoffkreislaufs und der Entsorgung - Fortschreibung des Berichts GRS-A-1259 - , Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, BMU-1992-358, Juli 1992
- GRS 1996 Entsorgung abgebrannter Brennelemente aus den Kernkraftwerken in der Bundesrepublik Deutschland, Ergebnisse von der Länderumfrage zum 31.12.1995; Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, März 1996
- GÖK 1993 W. Neumann und U. Fink von Rabenhorst: Transport radioaktiver Stoffe in Niedersachsen - Phase I -; Gutachterliche Stellungnahme der Gruppe Ökologie im Auftrag des Niedersächsischen Umweltministeriums; Hannover, November 1993

- HAWICKHORST 1994 W. Hawickhorst: Ist die Entsorgung technisch sichergestellt ?; Fachsitzung auf der Jahrestagung Kerntechnik '94, Stuttgart, 17. - 19. Mai 1994.
- HAZ 1996 Hannoversche Allgemeine Zeitung: Kein Bedarf für neue Atomlager; 6.12.1996
- HENSING 1995 I. Hensing und W. Schulz: Wirtschaftlichkeitsvergleich verschiedener Entsorgungspfade von Kernkraftwerken; Schriften des Energiewirtschaftlichen Instituts an der Universität Köln, Band 45, Oldenbourg Verlag München, 1995
- HIRSCH 1993 H. Hirsch: Entsorgungskonzepte; Beratungsauftrag im Rahmen des Beirat für Fragen des Kernenergieausstiegs (BFK), März 1993
- HIRSCH 1994 H. Hirsch: Konzeption Kernenergieabwicklung 1995-2000; Beratungsauftrag im Rahmen des Beirat für Fragen des Kernenergieausstiegs (BFK), Oktober 1994
- JANBERG 1996 K. Janberg und H. Spilker: Stand der Endlagerbehälterentwicklung und Perspektiven; Direkte Endlagerung, Wissenschaftliche Berichte FZKA-PTE Nr. 2, Februar 1996
- KfK 1981 H.-J. Engelmann et al.: Vorauswahl von Konditionierungsverfahren aufgrund von Plausibilitätsbetrachtungen; Kernforschungszentrum Karlsruhe - Projektgruppe Andere Entsorgungstechniken, AE Nr. 4, Dezember 1981
- IK 1992 Informationskreis Kernenergie: Kernenergiestandorte; Informationsmaterial, Oktober 1992
- Maillet 1989 J. Maillet: Recent Advances in Spent Fuel Consolidation Concepts; IAEA Technical Committee Meeting on Methods for Expanding Spent Fuel Storage Facilities, Wien, 12.-15. Juni 1989
- NEI 1991 EPRI helps utilities solve spent fuel storage problems; Nuclear Engineering International, Volume 36 No 447, Seite 16, Oktober 1991
- NEI 1993 Spent fuel management and transport; Supplement to Nuclear Engineering International, Volume 38 No 447, Seite 2, März 1993
- NEI 1994 Spent fuel management and transport; Supplement to Nuclear Engineering International, Volume 39 No 447, Seite 2, Dezember 1994
- NEUMANN 1990 W. Neumann: "Entsorgung" nach Abschalten aller AKW's; Ökologische Fachinformationen für Politik, Wirtschaft und Verwaltung, Ökologische Briefe Nr. 2, Seite 19, Januar 1990
- NL 1996 Antwort auf eine mündliche Anfrage der Abgeordneten Harms (Bündnis 90/Die Grünen), Drucksache 13/1782, Protokoll des Niedersächsischen Landtages am 6. März 1996, Frage 7

- NMU 1996 Schriftliche Mitteilungen an das Referat 401 von den Referaten 402 (21.02.) und 404 (13.02.) sowie mündliche Auskünfte; Niedersächsisches Umweltministerium, Februar-Juli 1996
- NUKEM 1991 O.Mehling et al.: Internationale Erfahrungen zur Konditionierung abgebrannter Brennelemente; NUKEM GmbH, FuE-91004; Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, BMU-1991-319, April 1991
- NUKEM/DWK 1983 H. Lahr et al.: Überlegungen zur Konditionierung abgebrannter Brennelemente am Reaktor; NUKEM GmbH und DWK GmbH; AE Nr. 12, Juli 1983
- NWK 1980 Nordwestdeutsche Kraftwerke AG: Antrag und Kurzbeschreibung des Lagers für abgebrannte Brennelemente im Kernkraftwerk Stade, Hannover, 20.02.1980
- PEEHS 1988 M. Peehs et al.: 2:1 Verdichtung von abgebrannten LWR-Brennelementen; Tagungsbericht der Jahrestagung Kerntechnik 1988, Seite 305, Travemünde, 17.-19.05.1988
- PREAG 1980 PreussenElektra AG: Kurzbeschreibung Brennelementezwischenlagerung in Transportbehältern auf dem Gelände des Kernkraftwerkes Würgassen, Hannover, Februar 1980
- STERNER 1992 H. Sterner et al.: Testing of techniques for the conditioning of fuel elements in view of direct disposal; Nuclear Engeneering and Design 137 (1992) 139-146
- VDEW 1989 Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke: Strategieüberlegungen zur Brennelemententsorgung und Verwertung von Plutonium und wie-deraufgearbeiteten Uran; Frankfurt/M, September 1989
- WISE 1995 world information service on energy: German Reprocessing Wastes in La Hague, Paris, Januar 1995

**Tabellenverzeichnis**

	Seite
Tabelle 1: Erforderliche Handhabungsschritte bei der Vorkonditionierung für unzerlegte (Variante A) und zerlegte (Variante B) Brennelemente.	14
Tabelle 2: Zahl der Handhabungen und Transporte für verschiedene Umgangspfade.	18
Tabelle 3: Gesamtbeurteilung der Umgangspfade.	24
Tabelle 4: Gesamtanfall bestrahlter Brennelemente in niedersächsischen Kernkraftwerken für drei Szenarien.	29
Tabelle 5: Grunddaten der niedersächsischen Kernkraftwerke.	30
Tabelle 6: Benötigte Lagerkapazitäten für die Zwischenlagerung an den Kraftwerksstandorten.	31