

Fortgeschrittene Nuklearsysteme: Was ist zu erwarten?

Wolfgang Liebert¹, Roland Bähr², Alexander Glaser¹, Lothar Hahn², Christoph Pistner¹

Es wird eine Studie vorgestellt, die im Auftrag des Schweizerischen Wissenschaftsrates erstellt wurde. Dabei wurde die existierende Literatur ausgewertet, um eine Beurteilung des Potentials neuer Nuklearsysteme zu ermöglichen.

Die verschiedenen Ansätze für neue Nuklearsysteme werden in sieben Kategorien eingeteilt: evolutionäre Reaktoren, Leicht- und Schwerwasserreaktoren mittlerer Leistung, innovative Reaktoren, flüssigmetallgekühlte Reaktoren, weitere Konzeptvorschläge für Spaltreaktoren, beschleunigergetriebene Reaktoren und Fusion. Diese wurden anhand von elf repräsentativen Systemen näher untersucht. Hierzu wurde ein Betrachtungsraaster eingeführt, das sieben Kategorien umfaßt: Anlagensicherheit, Brennstoffversorgung, Proliferationsrisiken, Ökonomie, Einsatzmöglichkeiten, Nachsorgeerfordernisse und Stand der Entwicklung.

Aufgrund der Betrachtung der repräsentativen Systeme wurden erste Schlußfolgerungen gezogen und Empfehlungen für weitergehende Untersuchungen ausgesprochen. Weiterhin wurden prinzipielle Möglichkeiten für eine weitergehende Betrachtung und Bewertung solcher Entwicklungen im Rahmen einer prospektiven Technikfolgenabschätzung (TA) diskutiert. Hierzu wurde ein Vorschlag für einen Kriterienkatalog erarbeitet, mit dem Ziel, eine Gestaltung der Technik bereits in der Entwicklungsphase zu ermöglichen.

1 Einführung

Während der Ausstieg aus der gegenwärtigen Nuklearenergienutzung in Deutschland organisiert wird, sprechen wir über fortgeschrittene, zukünftige Nuklearsysteme. Wie ist das zu verstehen? Zum einen werden erhebliche öffentliche Mittel für zukünftige Nuklearsysteme verausgabt. Vorrang hat hier zur Zeit die Forschung in Richtung eines Fusionsreaktors. Daneben gibt es weitere Konzepte, für die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten

¹ Interdisziplinäre Arbeitsgruppe Naturwissenschaft, Technik und Sicherheit (IANUS) der Technischen Universität Darmstadt, Hochschulstraße 10, D-64289 Darmstadt.

² Öko-Institut e. V., Elisabethenstr. 55-57, D-64283 Darmstadt.

— auch von der Industrie — finanziert werden, oder für die Ambitionen bestehen, mehr Forschungsressourcen einzusetzen.

Der global eingeforderte Klimaschutz macht energiepolitische und energietechnische Umsteuerungen nötig, die Vorsorge für eine nach-fossile Ära der Energieversorgung treffen. Es ist die Frage, welche Rolle darin fortgeschrittene Nukleartechnologien spielen können. Dazu muß geklärt werden, ob nukleare Zukunftskonzeptionen zu einer Neubewertung nuklearer Energietechnologien führen müssen. Können nukleare Systeme für eine zukünftige Nutzung so gestaltet werden, daß sie gesellschaftlich akzeptabel erscheinen?

Die Ausgangslage in der Schweiz hat seine Besonderheiten, sie ist in manchen Aspekten aber auch exemplarisch: Vier (kleinere) Reaktoren sind am Netz und tragen damit zu etwa 40% der Stromversorgung der Schweiz bei. Seit 1990 existiert ein Moratorium für den Zubau von Kernkraftwerken, das im Jahr 2000 ausläuft. Ein Bundesgesetz vom Oktober 1998 sieht vor, daß ein neues Kernenergiegesetz erarbeitet und ein fakultatives Referendum für neue Kraftwerke eingeführt werden sollen. Neuinvestitionen im Strombereich stehen in etwa 10-20 Jahren an, wenn die alten Kernkraftwerke vom Netz gehen.

Daher sind Informationen über mögliche neue Wege im Nuklearenergiebereich — und natürlich über Möglichkeiten der Energieversorgung der Zukunft insgesamt — nötig, damit eine offene und öffentliche Debatte über eine angemessene Energie-, Forschungs- und Technologiepolitik stattfinden kann, die Zukunftsfähigkeit garantiert. Wir hatten die Möglichkeit, über ein Jahr eine „Review-Studie Fortgeschrittene Nuklearsysteme“ für das TA-Programm des Schweizerischen Wissenschaftsrates zu erstellen, die im Frühjahr 1999 abgeschlossen wurde.³ Auf dieser Basis will das TA-Programm Schweiz evaluieren können, wie sachdienlich eine größere TA-Studie wäre und wie sie mit größerer Spannweite durchgeführt werden könnte: Welche technologischen Entwicklungen verdienen es, genauer untersucht zu werden und wie könnte dies geschehen?

Wir möchten diese Studie in ihren Ergebnissen, die über die Schweiz hinaus Bedeutung haben, vorstellen. Die Review-Studie nutzte im wesentlichen bereits existierende TA-Studien, weitere offizielle Berichte, Dokumente der Entwickler selbst, Beiträge aus der wissenschaftlichen Literatur zu besonderen Aspekten und in einigen Fällen eingeholte Expertenmeinungen. Es handelt sich nicht um eine umfassende Studie, die alle Fragen klärt, sondern um eine Sondierung im weiten Feld der fortgeschrittenen Nuklearsysteme, sie schafft einen Überblick und wirft gezielt wesentliche Fragen auf.

Berücksichtigt wurde das ganze existente Spektrum nuklearer Systeme: „Evolutionäre“ Leichtwasserreaktoren (LWR) hoher Leistung, fortgeschrittene Leicht- und Schwerwasserreaktoren mittlerer Leistung, „innovative“ Reaktoren, flüssigmetallgekühlte Reaktoren, Heizreaktoren, weitere Konzeptvorschläge für Spaltreaktoren, beschleunigergetriebe-

³ W.Liebert, R.Bähr, A.Glaser, L.Hahn, C.Pistner, *Fortgeschrittene Nuklearsysteme — Review Study, Technology Assessment TA 34/1999*, Schweizerischer Wissenschaftsrat, Bern, April 1999. Die Studie kann angefordert werden beim Schweizerischen Wissenschaftsrat, Programm TA, Inselgasse 1, CH-3003 Bern.

Reaktortyp	Betrachtete Reaktorkonzepte	Denkbarer Realisierungszeitraum
Evolutionäre Leichtwasserreaktoren (LWR) hoher Leistung	Europäischer Druckwasserreaktor EPR (Kooperation von Siemens Deutschland und Framatome Frankreich: NPI)	zirka 5 Jahre
Fortgeschrittene Leicht- und Schwerwasserreaktoren mittlerer Leistung	Advanced Passive Druckwasserreaktor AP 600 (Westinghouse USA)	2 bis 5 Jahre
	CANadian Deuterium Uranium Reaktor CANDU 3 (Atomic Energy of Canada)	über 5 Jahre
Innovative Reaktoren	Process Inherent Ultimate Safe Reaktor PIUS (ABB Atom, Schweden/ United Engineers & Constructors; ORNL)	offen, mehr als 10 Jahre
	Hochtemperatur-Modul HTR-Modul (Siemens/ABB: HTR-GmbH)	offen, mehr als 10 Jahre
Flüssigmetallgekühlte Reaktoren (Liquid Metal Reactor – LMR)	Power Reactor Inherently Safe Modul PRISM (General Electric USA)	offen, mehr als 10 Jahre
Weitere Konzeptvorschläge für Spaltreaktoren	Gasgekühlter HeizReaktor GHR (HTR-GmbH, PSI, u.a. Deutschland/Schweiz)	offen, mehr als 10 Jahre
	Radkowsky-Thorium-Reaktor RTR (USA)	weniger als 5 Jahre
Beschleunigergetriebene Systeme (Hybride Systeme)	Energy Amplifier EA oder Rubbiatron (CERN)	umstritten (15 bis 20 Jahre)
	Accelerator-driven Transmutation of Waste ATW (Los Alamos National Laboratory)	etwa 30 Jahre
Magnetfusionsreaktor	Weg über Internationalen Thermonuklearen Experimentalreaktor ITER	etwa 50 Jahre

Tabelle 1: In der TA-Studie exemplarisch behandelte Reaktorkonzepte.

ne/hybride Systeme (ADS), Fusion. Aus insgesamt etwa 60 in die Untersuchung einbezogenen Reaktorkonzepten wurden Informationen über 11 Systeme detaillierter ausgewertet

(vergl. Tabelle 1). Diese Systeme wurden gemäß der oben beschriebenen Einteilung als repräsentativ angesehen.

2 Betrachtungsraster

Die Beschreibung der ausgewählten Systeme erfolgte anhand eines Betrachtungsrasters, das einen groben Vergleich der Systeme anhand einiger wesentlicher Aspekte ermöglichen sollte:

1. Anlagensicherheit

Angaben zur erwarteten Anlagensicherheit sind von entscheidender Bedeutung. Akzeptanzprobleme der gegenwärtigen Kernenergienutzung sind insbesondere mit diesem Aspekt verbunden. Bei bisher in Betrieb befindlichen Reaktoren ist die Möglichkeit der Kernschmelze und massiver radioaktiver Freisetzungen nicht ausgeschlossen. Interessant sind daher Angaben über die erwartbaren radiologischen Belastungen im Normalbetrieb, das radioaktive Inventar, maximale Freisetzungen und zur Häufigkeit schwerer Unfälle. Eine wesentliche Frage ist, ob massive Radioaktivitätsfreisetzungen (hier spielen insbesondere kurzlebige, flüchtige Radionuklide und längerlebige Nuklide, die den Menschen über die Nahrungskette erreichen können, eine wichtige Rolle) deterministisch ausgeschlossen werden können bzw. welche festgelegte Nachweisgrenze durch probabilistische Sicherheitsuntersuchungen unterschritten werden kann.

Das Deutsche Atomgesetz fordert in seiner 1994 revidierten Fassung die „Katastrophenfreiheit“ als Voraussetzung für die Genehmigungsfähigkeit von Neuanlagen. Dies ist nicht gleichbedeutet mit Unfallfreiheit, sondern fordert eine Auslegung der Systeme, so daß die Folgen aller möglichen Unfälle soweit begrenzt sind, daß sie nicht zur Evakuierung von Menschen außerhalb des Anlagengeländes führen müssen. Die Empfehlungen einer Expertenkommission der Internationalen Atomenergieorganisation (IAEO), die in den Jahren 1991-1994 erarbeitet wurden, gehen in die gleiche Richtung.

2. Brennstoffwahl

Angaben zur Brennstoffwahl sind von Interesse, da die wirtschaftlich ausbeutbaren Reserven an Uran, das für die gegenwärtig genutzten Kernkraftwerke benötigt wird, real begrenzt sind.

3. Proliferationsrisiken

Die Gefahr der Weiterverbreitung von Kernwaffen ist insbesondere durch die Produktion von Stoffen, die für den Atomwaffenbau geeignet sind, und die Ermöglichung eines direkten Zugriffs auf diese bestimmt. Im heute eingesetzten schwach

angereicherten Uranbrennstoff entsteht während des Abbrands im Reaktor für Waffen verwendbares Plutonium (etwa 250-300 kg/GWe). Dieses bleibt zunächst eingebettet in radioaktive Spaltprodukte und in weitere entstandene Aktiniden. Durch die Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennstoffe wird der Zugriff auf Plutonium möglich. Somit steht die Frage des Umgangs mit Plutonium im Zentrum des Interesses. Daneben spielt die notwendige Anreicherung des Brennstoffs eine Rolle, da mit den Anreicherungstechnologien auch hochangereichertes, waffentaugliches Uran produziert werden könnte. Auch alternative Brennstoffkonzepte können problematisch sein, wie solche auf Thoriumbasis, da in diesen Uran-233 entsteht, das ebenfalls waffentauglich ist. Entscheidend ist also die Frage nach der Produktion und dem Umgang mit waffentauglichen Materialien und den zugehörigen Technologien. Weiterhin müssen die Zusammenhänge wissenschaftlicher und technologischer Projekte mit dem Know-how für Kernwaffen in den Blick genommen werden. Dies ist auch wesentlich für die Abschätzung der Risiken der vertikalen Proliferation, also der Gefahr der Weiterentwicklung von Atomwaffen.

4. Wirtschaftlichkeit

Die ökonomische Attraktivität zukünftiger nuklearer Systeme ist wegen der zu erwartenden Konkurrenz mit nicht-nuklearen Energietechnologien ein wesentlicher Gesichtspunkt. Erwartete Investitions- und Stromgestehungskosten sind wichtige Parameter für die Einschätzung der Wettbewerbsfähigkeit. Dies darf aber nicht überwertet werden, da Zukunftsprognosen auf diesem Sektor keine ausreichende Exaktheit aufweisen und ein rein ökonomischer Vergleich mit Energietechnologien auf fossiler Basis angesichts der drohenden Klimaveränderungen problematisch wäre.

5. Einsatzmöglichkeiten

Eine mögliche Nutzung über die Stromproduktion hinaus (Wärmemarkt, Prozeßwärme, Transmutation, etc.) ist von Bedeutung.

6. Erfordernisse für die Nachsorge

Ein wesentlicher Aspekt bei der Betrachtung und Bewertung von Nuklearsystemen sind Unterschiede bei den erforderlichen Schutzmaßnahmen und dem Aufwand bei der Behandlung der erzeugten radioaktiven Abfälle. Ein großes Problem der gegenwärtigen Nuklearenergienutzung ist das Entstehen größerer Mengen langlebiger Aktiniden (insbesondere Np-137, Pu-Isotope, Am-243, u.a.), langlebiger Spaltprodukte (Zr-93, Tc-99, Pd-107, J-129, Cs-135 u.a.) und weiterer in den Reaktoren erzeugter Nuklide, die für die Langfristnachsorge entscheidend sind. Für eine Einschätzung der notwendigen Schutzmaßnahmen sind Informationen über anfallende Mengen und radiotoxische Potentiale ebenso notwendig wie Angaben zu element- und isotopenspezifischen Lebensdauern, Migrationsverhalten und Einflußeigenschaften in Endlagerumgebungen. Welche Nachsorgeerfordernisse entstehen?

Besteht eine sichere Lagerungsnotwendigkeit auf geologischen Zeitskalen (Jahrzehntausende bis Jahrtausenden), für mehrere Jahrhunderte oder ist eine oberflächennahe Lagerung für mehrere Jahrzehnte ausreichend?

7. Stand der Konzeptrealisierung

Angaben zum Stand der Konzeptrealisierung, zum notwendigen Zeitraum bis zur Realisierung und zu ersichtlichen oder erwarteten Hindernissen auf dem Weg zum Entwicklungsziel sind für eine Einschätzung unverzichtbar.

Zur Vereinfachung des Vergleichs wurden die Eigenschaften heute im Einsatz befindlicher Druckwasserreaktoren (DWR) großer Leistung als Vergleichsmaßstab herangezogen. Dieser Reaktortyp ist dazu geeignet, da er weltweit am häufigsten von allen bekannten Systemen eingesetzt wird und durch langjährige Betriebserfahrungen und entsprechende Risikostudien als gut bekannt gelten kann.

3 Betrachtung fortgeschrittener Nuklearsysteme

Die in der Studie vorgenommene Betrachtung von 11 repräsentativen in Entwicklung befindlichen Systemen kann hier nur in knappen Andeutungen dargestellt werden.

3.1 „Evolutionäre“ Leichtwasserreaktoren (LWR) hoher Leistung (≥ 1000 MW)

„Evolutionäre“ Reaktoren basieren in ihrer grundlegenden technischen Auslegung auf bekannten LWR-Konzepten. Zusätzlich werden sicherheitstechnische Verbesserungen eingeführt, ohne daß dabei tiefgreifende Veränderungen an der LWR-Konzeption vorgenommen werden. Das Ziel ist eine Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit im Vergleich mit anderen Kraftwerken und die Erhöhung der Sicherheit durch Reduzierung der Möglichkeiten für eine massive Radionuklidfreisetzung im Falle eines größeren Unfalls. Kernschmelzen werden nicht prinzipiell ausgeschlossen, sollen aber beherrschbar gemacht werden. Ein typisches Beispiel ist der zur Zeit in deutsch-französischer Kooperation in Entwicklung befindliche Europäische Druckwasserreaktor (EPR). Der EPR ist eine Fortentwicklung bekannter deutscher und französischer Druckwasserreaktorlinien (Konvoi und N4). Damit bleiben die Sicherheitsprobleme des DWR prinzipiell gegeben (z.B. Hochdruckpfad). Aber die Unfallhäufigkeit wird durch zusätzliche Maßnahmen reduziert. Die Folgen einer möglichen Kernschmelze sollen aufgefangen werden. Allerdings wird der Einfluß dieser zusätzlichen Maßnahmen auf das Sicherheitsverhalten heftig diskutiert. Insbesondere steht die Garantierbarkeit der „Katastrophenfreiheit“ in Frage. Die Investitionskosten sollen durch eine sehr hohe installierte Reaktorleistung so weit gedrückt werden, daß er im Wettbewerb

mit anderen Energietechnologien mithalten kann. Der Vergleich mit dem Referenz-DWR zeigt hinsichtlich des Betrachtungsrasters in weiten Bereichen Übereinstimmungen (vergl. Tab.2 am Ende des Textes). Der EPR steht vor der Realisierung, die innerhalb weniger Jahre möglich ist.

3.2 Fortgeschrittene Leicht- und Schwerwasserreaktoren mittlerer Leistung (100-600 MW)

Diese Konzeptionen basieren ebenfalls auf der grundlegenden technischen Ausführung bereits in Betrieb befindlicher Anlagen. Aufgrund der geringeren Gesamtleistung werden sowohl geringere Energiedichten als auch die Bereitstellung größerer Kühlkapazitätsreserven realisierbar. Mit dem verstärkten Einsatz passiver Systeme und einer deutlichen Reduktion anfälliger sicherheitsrelevanter Anlagenteile (Ventile, Pumpen, Rohrleitungen, Kühlleitungen, Kabel, etc.) werden verbesserte Sicherheitseigenschaften angestrebt. Bekannte Unfallursachen werden nicht eliminiert, sondern in ihrer Eintretenshäufigkeit reduziert. Ein typisches Beispiel ist der von der US-Firma Westinghouse entwickelte „Advanced Passive“ Druckwasserreaktor AP 600. Die Störfallauslegung ist so konzipiert, daß Bedieneingriffe erst 3 Tage nach einem schweren Unfall nötig werden. Der AP 600 erhielt 1998 eine erste Konzeptgenehmigung durch die U.S. Nuclear Regulatory Commission, die allerdings nur für den etwaigen Export von Anlagen dienlich ist. Die Zeit bis zu einer Realisierung könnte im Falle des AP 600 weniger als fünf Jahre betragen. Andere Systeme dieser Gruppe benötigen für ihre Entwicklung noch mehr als fünf Jahre.

3.3 „Innovative“ Reaktoren

Mit der Entwicklung innovativer Reaktorkonzepte wird das Ziel des „inhärent sicheren“ Reaktors angestrebt. Radikale konzeptionelle Veränderungen gegenüber bislang realisierten LWR sind dazu notwendig. Kein Unfallablauf soll identifizierbar sein, der zu einem Kernschmelzen führen könnte. Unfälle mit massiven radioaktiven Freisetzungen, wie sie bei den bisher realisierten Leichtwasserreaktoren nicht ausgeschlossen sind, sollen bereits aus physikalischen oder technischen Gründen nicht auftreten können. Passive Wirkmechanismen im sicherheitsrelevanten Bereich spielen eine entscheidende Rolle, und durch große Kühlkapazitäten sowie eine größere Trägheit des Systems bei denkbaren Störfällen sollen vergleichsweise große Karenzzeiten für die Einleitung von Notfallmaßnahmen erreicht werden. Typische Beispiele sind die Konzepte des PIUS (Process Inherent Ultimate Safe) Reaktors und des Hochtemperaturreaktor-Moduls, die in den siebziger und achtziger Jahren in Schweden bzw. Deutschland verfolgt wurden.

Beim HTR-Modul soll die sonst übliche primäre Wasserkühlung durch eine Helium-Gaskühlung ersetzt werden. Das Moderatormaterial ist Graphit. Es können weit höhere Kühlmitteltemperaturen als bei LWR erreicht werden. Damit kann auch Prozeßwärme

für industrielle Zwecke zur Verfügung gestellt werden. Das leistungsbezogene radioaktive Inventar eines HTR-Modul ist vergleichbar mit demjenigen des Referenz-DWR. Die Kernkühlung soll selbsttätig ausgelegt werden. Eine gute Nachwärmeabfuhr wird garantiert, wenn die Kerngeometrie erhalten bleibt. Überzeugende Nachweise für das angestrebte Ziel der Katastrophenfreiheit stehen beim HTR-Modul noch aus. Viele denkbare Störfallabläufe sind bereits identifiziert und analysiert, aber es werden Zweifel geäußert, ob es nicht doch realistische Unfallabläufe geben kann, die zu einem Versagen des Reaktorcontainments führen könnten (Reaktivitätsstörfall durch Wassereintritt, Graphitkorrosion und Bildung von explosivem Wasserstoffgemisch, Graphitbrände). Beim HTR werden neben Sicherheitsvorteilen auch gewisse Vorteile bei der Abfallbehandlung und bei der Reduktion von Proliferationsgefahren reklamiert. Zur Zeit ist eine Realisierung solcher Systeme insbesondere in Europa als offen anzusehen. Der Einbruch bei den Entwicklungsanstrengungen (die HTR-Entwicklung wurde in Deutschland 1991 eingefroren) führt zu der Einschätzung, daß der mögliche Start einer Realisierung jenseits der nächsten zehn Jahre liegen würde.⁴ (Zum Vergleich mit dem Referenz-DWR siehe Tabelle 2.)

3.4 Flüssigmetallgekühlte Reaktoren (Liquid Metal Reactor - LMR)

In den vergangenen Jahrzehnten wurden in einigen Ländern Entwicklungen für einen schnellen, flüssigmetallgekühlten Brutreaktor durchgeführt. Wegen technischer Realisierungsprobleme wurden einige dieser Projekte allerdings abgebrochen, andere befinden sich durch Störfälle in einem ungeklärten Zustand. Keines der aufwendigen Großprojekte hat bislang zu einem Konzept geführt, das sowohl technisch ausgereift als auch sicherheitstechnisch und wirtschaftlich attraktiv wäre. Gleichwohl liegen Konzepte für „innovative“ LMR-Reaktoren vor, die als Kühlmittel eine Natrium- oder eine Blei/Wismuth-Schmelze vorsehen. Sowohl die Kühlung als auch die Reaktivitätskontrolle sollen auf passiven Mechanismen basieren. LMR-Reaktoren sollen neben der Stromerzeugung auch als Brutreaktoren für nuklearen Spaltstoff oder zur Konversion von Aktiniden-Abfällen eingesetzt werden. Als Beispiel kann das General Electric Konzept des „Advanced Liquid Metal Reactors“ (ALMR), der auch als PRISM (Power Reactor Inherently Safe Modul) bezeichnet wird, genannt werden. Ob eine Realisierung neuartiger „Brutreaktoren“ gelingen kann, muß heute als offen angesehen werden. Mehr als 10 Jahre sind sicher anzusetzen.

3.5 Weitere Konzeptvorschläge für Spaltreaktoren

In diese Gruppe gehören Heizreaktoren, die ausschließlich zur Wärmeerzeugung dienen sollen und in der Regel auf dem HTR-Prinzip basieren. Ein völlig anderes Reaktorkonzept

⁴ Ob „innovative“ Systeme wie beispielsweise der HTR wieder interessant werden könnten, bleibt abzuwarten. Wesentlich wäre zu sehen, ob Projekte, die zur Zeit in Südafrika, Japan, USA und China verfolgt werden, zu einer Demonstration der angestrebten „Katastrophenfreiheit“ führen können oder nicht.

als die bisher behandelten wurde mit einem Salzschnmelze-Reaktor (Molten Salt Reactor) vorgeschlagen. Hier wird von einem festen zu einem flüssigem Brennstoff übergegangen, der aus Fluoridsalzen besteht, in die Spaltstoffe enthaltendes Uranfluorid eingebracht ist. Neues Interesse an Salzschnmelze-Technologien ist durch die Konzeptionen hybrider Reaktoren (s.u.) aufgekommen, die zum Teil von der Verwendung eines flüssigen Brennstoffs ausgehen. Weitere Konzeptideen, die keiner spezifischen Reaktorkategorie ohne weiteres zugerechnet werden können, betreffen die Nutzung neuer Brennstoffe. Ein Beispiel ist der Radkowsky-Thorium-Reaktor (RTR). Hier wird für heute gängige Leichtwasserreaktoren ein thoriumhaltiger Brennstoff entworfen, der den bislang üblichen Uran- oder Uran-Plutonium- durch einen Thorium-Uran-Brennstoff ersetzen soll. Das Ziel der Entwicklung ist die Bereitstellung eines Brennstoffkonzeptes, das zur Schonung der Uranreserven beiträgt und eine proliferationsicherere Variante für den weltweiten Brennstoffbedarf anbieten kann. Noch weiter gehen bei der letzteren Perspektive die Entwickler von sogenannten „inerten“ Brennstoffen: die Uranmatrix wird durch Materialien ersetzt, die kaum aktivierbar sind und somit insbesondere im Reaktor die Plutoniumentstehung aus Uran-238 unterbinden. Neue Brennstoffe könnten innerhalb der nächsten fünf Jahre realisierungsreif sein.

3.6 Beschleunigergetriebene Systeme (Hybride Systeme)

Das Konzept beschleunigergetriebener Spaltreaktoren setzt auf die Idee, ein Reaktortarget — ähnlich wie von Leichtwasserreaktoren oder schnellen Reaktoren bekannt — mit einer starken Spallationsneutronenquelle zu koppeln und hierbei entweder thermische oder schnelle Neutronen zu nutzen. Man spricht auch von beschleunigergetriebenen Systemen (Accelerator Driven Systems, ADS) oder hybriden Reaktoren. Durch die Zuführung von Neutronen von außen wird ein unterkritischer Betrieb des Reaktors ermöglicht, da die nukleare Kettenreaktion im Reaktor nicht mehr allein aufgrund der dort ständig durch Kernspaltung erzeugten Neutronen aufrechterhalten werden muß. Die Hoffnung besteht, ein mögliches Überkritischwerden des Reaktors, das zum gefürchteten Kritikalitätsunfall führen könnte, auszuschließen. Neben dem Anstreben von Sicherheitsvorteilen soll auch die Entsorgungsproblematik konstruktiv angegangen werden. Im Neutronenfluß des Reaktors können auch Kernumwandlungen für radioökologisch besonders problematische Spaltprodukte und Aktiniden durchgeführt werden, die zu stabilen oder radiotoxisch weniger problematischen Nukliden führen sollen (Transmutation). Weiterhin bestehen Überlegungen zur Reduktion des Proliferationsrisikos durch einen Umgang mit genutzten oder erzeugten Spaltstoffen, die einen direkten Zugriff darauf weitgehend vermeiden sollen. Was den Realisierungszeitraum angeht, schwanken die Angaben zwischen 15 und 30 Jahren.

Heute konzipierte beschleunigergetriebene Systeme bestehen zumeist in der Kopplung eines speziellen flüssigmetallgekühlten schnellen Reaktors mit einem Beschleuniger, der als „externe“ Neutronenquelle wirksam wird. Die meiste Beachtung hat die Konzeption des

Energy Amplifiers (EA), die von einer Gruppe um Carlo Rubbia vorangetrieben wird, und das Projekt Accelerator Transmutation of Waste (ATW) des Los Alamos National Laboratory gefunden. Während beim EA die Stromproduktion auf der Basis eines Thoriumbrennstoffs eine wichtige Rolle spielen soll, konzentriert sich das ATW-Konzept ganz auf die Behandlung nuklearer Abfälle. Es liegen bereits einige unabhängige Untersuchungen zu ADS-Systemen vor, die insbesondere einige wesentliche Aspekte des EA kritisch reflektieren.

Die unterkritische Betriebsweise und die passive Auslegung wesentlicher Sicherheitssysteme fallen zunächst positiv ins Gewicht. Aber die typische Nachteile schneller Reaktoren bleiben erhalten: bei Kerndeformationen infolge von Kernschmelzen können positive Reaktivitätskoeffizienten wirksam werden. Bislang ist kein Kontrollsystem vorgesehen, das spontanen Reaktivitätsänderungen entgegenwirkt. Ob eine Kernschmelze wirklich ausgeschlossen werden kann wird bezweifelt. Da die Möglichkeit zur Schnellabschaltung des Beschleunigerstroms erforderlich ist, muß auch von einer schnellen Aktivierbarkeit des Beschleunigers ausgegangen werden, was zu entsprechenden Konsequenzen führen kann, da die Kühlsysteme mit weit größerer Trägheit auf eine Aktivierung ansprechen. Einem Sicherheitstechnisch erwünschten Wert des Neutronenmultiplikationsfaktor k möglichst weit unterhalb von 1 (etwa $k=0,95$) steht das ökonomische Erfordernis entgegen, die Anlage mit einem k -Wert möglichst nahe an 1 zu betreiben. Hier gibt es offene Fragen, welches Maß der Unterkritikalität als ausreichend und überzeugend angesehen werden kann. Es wird sogar in Zweifel gezogen, ob der unterkritische Betrieb überhaupt einen Schutz gegen denkbare Leistungsexkursionen garantieren kann. Ebenso werden erhebliche Probleme bei der Realisierbarkeit eines primären Kühlkreislaufs auf der Basis flüssigen Bleis bzw. von Blei-Wismuth gesehen. So gibt es Stimmen, die die Sicherheitseigenschaften des EA zwar besser als die eines Natrium-gekühlten Brutreaktors einschätzen, aber schlechter als diejenigen eines HTR.

Für den EA wird Thorium als wesentlicher Bestandteil des Brennstoffs vorgesehen. Das darin erbrütete Uran-233 soll nach Wiederaufarbeitung des abgebrannten Brennstoffs als Spaltstoff genutzt werden. Uran-233 ist aber auch ein gut geeigneter Spaltstoff für die Konstruktion von Kernwaffen. Ob es tatsächlich ein überzeugendes Argument ist, daß die parallele Erzeugung des harten Gammastrahlers Thallium-208 einen intrinsischen Schutz gegen die Nutzung als Waffenstoff darstelle, steht in Frage. Eine intrinsische Proliferationsresistenz des EA wird jedenfalls bezweifelt. Dies ist auch damit begründet, daß für ADS-Konzepte vorgesehene Beschleuniger prinzipiell sehr gut für eine effiziente Produktion kernwaffenfähiger Materialien geeignet sind.

Um bei der Abfall-Nachsorge zu einschneidenden Fortschritten zu kommen, ist eine Abtrennung der verschiedenen problematischen Elemente vom Nuklearabfall notwendig. (Eigentlich wäre in einigen Fällen sogar eine zusätzliche Isotopentrennung erforderlich, was als äußerst unrealistisch erscheinen muß.) Rubbia gibt an, daß die Radiotoxizität der verbleibenden nuklearen Abfälle des EA nach 700 Jahren um den Faktor 20.000 unter derjenigen des typischen DWR-Abfalls liegen werde. Darin geht die Annahme der Er-

reichbarkeit einer Wiederaufarbeitungseffizienz für die Abtrennung von Aktiniden von 1:10.000 ein. Inwieweit solche gegenüber heutiger Praxis extremen Trenngenaugigkeiten in großtechnisch betriebenen Anlagen realisierbar werden könnten, steht in Frage. Aufgrund seiner Annahmen glaubt Rubbia, die geologische Endlagerung von Abfällen vermeiden zu können. Demgegenüber wird eingewandt, daß auch der EA auf ein geologisches Endlager angewiesen bleiben werde und daß die Entsorgung der in 10.000 Tonnen Blei gelösten Spallationsprodukte noch geklärt werden müsse.

In den letzten etwa 8 Jahren haben sich in einigen Ländern sehr verschiedene Transmutationskonzepte herauskristallisiert, die knapp folgendermaßen charakterisiert werden können:

- Frankreich und Japan:
Festhalten an der Brüterstrategie und Wiederaufarbeitung verbunden mit einer Plutonium-Nutzung; Abfall-Transmutation für Teile der übrigen Aktiniden und einiger Spaltprodukte
- CERN-Projekt (Rubbia mit Ziel Europa):
Aufbau eines Thorium-Brennstoff-Zyklus mit Wiederaufarbeitung; Nutzung von vorhandenem Plutonium oder vorhandenen Nuklearabfällen; Transmutation der übrigen Aktinide und Spaltprodukte in mehrfachen Reaktor-Zyklen
- USA:
keine Nutzung von Plutonium und anderen erbrüteten Spaltstoffen; quantitative Beseitigung von Plutonium, wesentlicher weiterer Aktiniden, J-129, Tc-99; damit Reduktion der Endlagererfordernisse für behandelten LWR-Abfall.

Eine Fülle wesentlicher technologischer Herausforderungen sind noch zu bewältigen, wenn die technische Reife von ADS-Systemen realisiert werden soll. Dazu gehört

- das Erreichen einer befriedigenden Verfügbarkeit von Beschleunigern im Dauerbetrieb bei minimalem Teilchenverlust (u.a. durch Raumladeeffekte des primär erzeugten Protonenstrahls)
- die Demonstration der sicheren Funktion des Kühlmittels flüssiges Blei bzw. Blei-Wismuth
- technische Auslegungen für die Realisierung des Spallationsprozesses (hier insbesondere für das flüssige Spallationstarget und das „Fenster“ zwischen Target und Beschleuniger, das unter Höchstbelastung durch den Teilchenbeschuß steht)
- die erheblich erweiterte Wiederaufarbeitung der Brennstoffe (hier insbesondere die technisch realisierbare Trennschärfe der Separation).

Das US-Konzept der beschleuniger-getriebenen Abfall-Transmutation (Accelerator-driven Transmutation of Waste, ATW) tritt mit einer reduzierten Zielsetzung und vorsichtigeren Zeitplanung an als das Rubbia-Projekt. Wesentlich ist hier das Potential für eine Reduktion der Nachsorgeerfordernisse für existierende radioaktiven Abfälle. Eine quantitative Reduktion auf 1/10 wird angepeilt und eine Toxizitätsreduktion der Abfälle um den Faktor 100 wird für machbar gehalten.⁵ Es ist nicht die Rede davon, ein auf geologischen Zeitskalen sicheres Endlager werde damit überflüssig. Die angestrebte drastische Reduktion der Aktiniden (insbesondere des Plutoniums) ist unter dem Proliferationsgesichtspunkt sehr attraktiv, aber bis mindestens 2001 wird ein militärisches Parallelprojekt verfolgt, daß die Möglichkeit einer beschleunigergetriebenen Tritiumproduktion für das US-Atomwaffen-Programm erforscht.

Für die Entwicklung der ATW-Technologie werden etwa 30 Jahre veranschlagt. Die Kosten werden mit etwa 11 Milliarden abgeschätzt. Das Transmutationsprogramm für existierende Abfälle soll 90 Jahre laufen mit hochgerechneten Kosten von 280 Milliarden Dollar.

3.7 Fusion

In Fusionsreaktoren soll die Verschmelzung von leichten Atomkernen wie Deuterium und Tritium realisiert werden, die in großtechnischem Maßstab bislang nur unkontrolliert in den Versuchsexplosionen thermonuklearer Waffen durchgeführt wurde. Damit eine Fusionsreaktion stattfinden kann, muß zunächst die elektrische Abstoßung der Kerne überwunden werden. Temperaturen von über 100 Millionen Grad sind dafür notwendig. Für das Erreichen der Fusion muß neben einer enormen initialen Energiezufuhr das Produkt aus Teilchendichte und (Energie-)Einschlußzeit einen reaktionsspezifischen Wert überschreiten. Daraus ergeben sich zwei von einander sehr unterschiedliche Konzepte zur Realisierung der Fusion, die heute intensiv verfolgt werden. Bei der Trägheits(einschluß)fusion wird mit Drücken gearbeitet, die bis zum tausendfachen des Normaldrucks reichen, allerdings nur für Zeiträume von einer milliardstel Sekunde oder weniger. Der technische Weg zur Trägheitsfusion beruht vornehmlich auf dem Beschuß eines mit Deuterium und Tritium gefüllten Mikrokügelchens (Durchmesser: wenige Millimeter) mit hochenergetischen Laserstrahlen oder hochenergetischen Teilchen aus einem Beschleuniger. Bei der Magnetfusion ist demgegenüber die Teilchendichte im Plasma gering (weniger als ein millionstel der Normaldichte), und die Energieeinschlußzeit muß dafür entsprechend höher sein. Das heiße Brennstoffplasma soll in einem „magnetischen Käfig“ gehalten werden, der von extrem starken elektro-magnetischen Feldern aufgebaut wird. Beide Konzepte würden zu einem völlig neuartigen Reaktorkonzept führen, das sich stark von heutigen

⁵ US Department of Energy, *A Roadmap for Developing Accelerator Transmutation of Waste (ATW) Technology*, A Report to the Congress, Washington D.C., Oct. 1999

Nuklearsystemen unterscheidet. Die im zivilen Bereich besonders geförderte Magnetfusion wird nicht vor der Mitte des 21. Jahrhunderts kommerziell zur Verfügung stehen können.

In Europa konzentriert sich die Fusions-FuE auf die Realisierung eines Magnetfusionsreaktors, der katastrophenfrei betreibbar sein soll und kein geologisches Endlager für anfallende radioaktive Abfälle benötigt. Vorteile im Vergleich mit gängigen Spaltreaktoren sind, falls die Technologieziele erreicht werden:

1. Kaum Spaltprodukte und wenig wärmeentwickelnde Aktivierungsprodukte (kein Nachwärmeproblem) werden erzeugt.
2. Praktisch keine Aktinidenelemente (wie Plutonium, Americium, Neptunium) entstehen.
3. Aktivierte Strukturmaterialien sind auf lange Sicht weniger problematisch als abgebrannter Brennstoff eines DWR.
4. Die geringere Energiedichte im Reaktor ist sicherheitstechnisch erwünscht; Kritikalitätsunfälle sind nicht möglich.
5. Mögliche Unfälle blieben weit mehr als beim DWR auf Anlage selbst beschränkt.
6. Praktisch kein Ressourcenende der Brennstoffe (bei geeigneter Brennstoffwahl) ist absehbar.

Dennoch sind Probleme bei der Realisierung eines Fusionsreaktors ersichtlich. In den letzten 20 Jahren ist eine ganze Reihe von Studien und politikberatenden Reports über die Fusionsforschung erschienen, die diesbezüglich aufschlußreich sind.

Das Ziel der inhärenten Sicherheit/Katastrophenfreiheit erscheint abhängig vom konkreten Design einer Reaktoranlage. Unwägbarkeiten bestehen heute in den noch unzureichenden Analysen von möglichen Störfallpfaden und den Unklarheiten über ein tatsächliches Design wesentlicher Komponenten und einer entsprechenden Wahl der verwendeten Materialien, die teilweise noch gar nicht existieren. Bei der Fusions-FuE handelt es sich um das erste Jahrhundertprojekt der Technikgeschichte, bei dem Zielplanungen mit weitem Vorgriff auf die zukünftigen Entwicklungen unausweichlich sind. Offene Fragen der Materialentwicklung betreffen insbesondere plasmanahe Strukturmaterialien, die extrem hohen Wechselbelastungen ausgesetzt sein werden. Zum Teil müssen widersprüchliche Anforderungen an die Materialien berücksichtigt werden. Es müssen Legierungen gefunden werden, die extreme thermische und mechanische Wechselbelastungen aushalten, kaum verspröden, in den hohen Neutronenflüssen kaum aktiviert werden, eine gute Tritiumrückhaltung und geringe Tritiumaufnahme aufweisen. Auch sind teilweise Abschirmungen notwendig (z. B. für die supraleitenden Magnete, in die ebenfalls noch erhebliche Entwicklungsanstrengungen gesteckt werden müssen), die eine Reduktion der Neutronenflüsse

um 6–7 Größenordnungen ermöglichen. Auf jeden Fall wird der regelmäßige Austausch plasmanaher Komponenten nach jeweils wenigen Jahren nötig.

Die Wahl des Brennstoffs Deuterium–Tritium (D–T) führt zu einer Reihe problematischer Aspekte. Das Tritium-Inventar in einem Reaktor wird sich in der Größenordnung von Kilogramm bewegen (Jahres-Brennstoffbedarf etwa 50 kg pro GWe und Jahr). Tritium ist ein wichtiger Waffenzustoff für fortgeschrittene Kernwaffenprogramme, der bereits in Gramm-mengen relevant ist. Die radiobiologische Wirkung von Tritium dominiert voraussichtlich die Normalbetriebsemissionen und die Emissionen bei etwaigen größeren Störfällen. Die Neutronenaktivierung aus der D-T-Reaktion sorgt für extreme Anforderungen für verwendete Strukturmaterialien und sorgt voraussichtlich für Probleme bei der Erreichung des Ziels, ein geologisches Endlager für Reaktorabfälle überflüssig zu machen.

Die Abfälle aus dem Betrieb von Magnetfusionsreaktoren werden vergleichbar sein mit DWR-Abfallmengen, aber ihre Zusammensetzung wird qualitativ weit günstiger sein, was Radiotoxizität und Langlebigkeit anbetrifft. Je nach Design der Anlage ist eine Reduktion um den Faktor 100 – 10.000 erwartbar. Verunreinigungsspuren in verwendeten Spezialstählen, die den sehr hohen Neutronenflüssen im Reaktor ausgesetzt sind, sind Ursache für das Entstehen langlebiger radioaktiver Nuklide. Dadurch wird voraussichtlich ein geologisches Endlager nicht überflüssig. Es wird über eine Teilrecycling der Abfälle nach ca. 50 Jahren nachgedacht, die zu einer Reduktion der endzulagernden Abfälle um etwa 70% oder bis zu 90% führen könnte.

Fortgeschrittene Brennstoffkonzepte könnten zur neutronenarmen Fusion führen, die einige Vorteile hinsichtlich Proliferationsgefahren, Abfall- und Umweltproblematik haben würde. Die Zündbedingungen für das Fusionsplasma wären aber weit schwerer zu erreichen als für die D-T-Fusion.

Ob Fusionsreaktoren ökonomisch betrieben werden können, ist heute noch ungewiß. Wie werden sich die regelmäßigen Wartungszeiten, die durch den Austausch hochbelasteter plasmanaher Komponenten erforderlich sind, auswirken? Ist ein stationärer oder quasi-stationärer Dauerbetrieb physikalisch-technisch möglich? Wie werden die erwarteten hohen Investitionskosten zu Buche schlagen?

Die wissenschaftliche Machbarkeit der Magnetfusion ist noch nicht demonstriert, auch wenn größere Fortschritte in den letzten Jahrzehnten erzielt wurden. Die technische Machbarkeit hängt von einer Vielfalt zukünftiger Entwicklungen ab.

Die Forschungs- und Entwicklungskosten sind erheblich. Bislang wurden im Bereich der EU etwa 10 Milliarden ECU verausgabt. Bei Fortschreibung des Trends muß mit weiteren 30 Milliarden Euro bis 2040 gerechnet werden. Der weltweite Bedarf bis zur Realisierung eines Reaktors kann grob mit etwa 80 Milliarden Euro abgeschätzt werden.

Es werden auch Alternativen zu Magnetfusion auf Basis des Tokamak-Prinzips entwickelt. Besondere Bedeutung hat die Trägheitseinschlussfusion (Inertial Confinement Fusion, ICF). Die ICF-Physik steht zum Teil in großer Nähe zur Physik thermonuklearer Kernwaffen. Dies begründet die lange Tradition einer militärisch motivierten Forschung

in einigen Kernwaffenstaaten. Damit sind Risiken für die Weiterentwicklung und Weiterverbreitung von Kernwaffen verbunden. Die zur Zeit im Aufbau befindlichen, militärisch motivierten Laserfusions-Großexperimente (Laser Megajoule im französischen Bordeaux und die National Ignition Facility in Livermore, USA) könnten in einigen Jahren eine Mikrowasserstoffbombenexplosion im Labor erzeugen. Damit entstünde eine Experimentiereinrichtung, mit der vielfältige und neuartige waffenrelevante Forschungen möglich werden. Aber der Weg zu einem Fusionsreaktor wäre sehr weit und vielleicht überhaupt nicht realisierbar. Beispielsweise müßte eine Laserrepetitionsrate im Bereich einiger Hertz erreicht werden. Dies ist schon allein wegen der Kühlerfordernisse der Hochenergielaser bislang überhaupt nicht denkbar.

Parallel zu den militärisch motivierten Projekten werden insbesondere in Japan, aber auch in Europa, zivil motivierte ICF-Konzepte verfolgt, in denen statt Hochenergielaser Teilchenbeschleuniger (oder eine Kombination von beiden) als Energielieferanten für die Zündung der Fusion dienen. Hier ist man noch weit davon entfernt, genügend leistungsfähige Anlagen betreiben zu können, aber prinzipiell wären die notwendigen Pulsraten erreichbar, so daß in zukünftigen Projekten physikalisch-technische Voraussetzungen für ein ICF- Programm geschaffen werden könnten, das tatsächlich eine Energieerzeugungsoption aufbauen kann. Ob sich durch ICF die Aussichten für die Realisierung einer neutronenarmen Fusion auf der Basis fortgeschrittener Brennstoffe günstiger gestalten als bei heute absehbaren Magnetfusionskonzepten, kann heute nicht mit Sicherheit angegeben werden.

4 Ergebnisse einer Betrachtung fortgeschrittener Nuklearsysteme

Im Rahmen der erwähnten Studie für den Schweizerischen Wissenschaftsrat konnten heute in Entwicklung befindliche fortgeschrittene Nuklearsysteme einer etwas genaueren Betrachtung unterzogen werden, wie im vorausgehenden Abschnitt skizziert.

4.1 Schlußfolgerungen

Die Akzeptabilität von neuartigen oder verbesserten nukleartechnologischen Systemen wird sich insbesondere an überzeugenden Lösungen der Schlüsselprobleme Sicherheit, nuklearer Abfall und Weiterverbreitungsgefahr von Kernwaffen messen lassen müssen. Legt man diese Einschätzung zugrunde, so ist von herausragender Bedeutung, ob auf der Basis veränderter oder neuartiger technologischer Konzepte wesentliche Durchbrüche, bei der Sicherheits-, Nachsorge- und Proliferationsproblematik denkbar und realisierbar erscheinen. Dem ist auf lange Sicht voraussichtlich auch die Frage nach der Wirtschaftlichkeit unterzuordnen, da die Energiedebatte bereits jetzt stärker die nichtmerkantilen Aspek-

te betont und die weltweite Gefahr des „Climatic Change“ eine Neuordnung der Energiemärkte nach nicht rein ökonomischen Gesichtspunkten (unter Einbeziehung externer Kosten) erwarten bzw. erhoffen läßt.⁶ Eine geringere Gewichtung der heute benannten Erwartungen an die Ökonomie der Systeme ist auch dadurch motiviert, daß sich in der Vergangenheit aber auch bis in die Gegenwart hinein gezeigt hat, daß in die Zukunft projizierte Kostenschätzungen und Wirtschaftlichkeitsaussagen für nukleare technische Großprojekte zumeist grob falsch und meist erheblich zu günstig waren.

Betrachtet man die in der Studie gesammelten Vergleichsinformationen unter diesem Blickwinkel, so kann das Ergebnis auf die knappe Formel gebracht werden: Entscheidende qualitative Sprünge in den Bereichen Sicherheit, Nachsorge und Proliferation sind über die in näherer Zukunft (5-15 Jahre) realisierbaren Nuklearsysteme eher nicht zu erwarten, während für die langfristigen Entwicklungsprojekte wesentliche durchschlagende Verbesserungen angestrebt werden, von denen aber noch nicht ohne weiteres angegeben werden kann, ob sie tatsächlich realisierbar sind.

Auf die drei als zentral angenommenen Aspekte bezogen kann dies folgendermaßen konkretisiert werden:

1. Qualitative Sprünge in der Anlagensicherheit sind bei „evolutionären“ Spaltreaktoren eher nicht zu erwarten. Eine Reihe von wesentlichen Verbesserungen sind bei einigen anderen fortgeschrittenen Spaltreaktoren absehbar, die aber alle bislang nicht zum Ziel einer nachweisbaren Katastrophenfreiheit der Systeme führen. Zumindest steht ein solcher Nachweis bei allen Konzepten, auch bei den „innovativen“ Spaltreaktoren, bislang aus. Vom sicherheitstechnischen Aspekt her am interessantesten erscheinen die Systeme, deren Realisierungszeitpunkte am weitesten in der Ferne liegen; dies gilt insbesondere für die Fusion.
2. Die Nachsorgeproblematik wird bei keinem der hier betrachteten Systeme wirklich gelöst, wenn man darunter versteht, daß ein auf geologischen Zeitskalen sicheres Lager für radioaktive Abfälle überflüssig werden soll. Interessant unter diesem Gesichtspunkt sind immerhin die beschleunigergetriebenen Systeme, die eine einschneidende Reduktion der Lagerungszeiträume versprechen oder zumindest eine deutliche Reduktion der zu lagernden Abfallvolumina und deren Radiotoxizität anpeilen. Dabei darf jedoch nicht übersehen werden, daß diese Konzepte auf umfangreiche Wiederaufarbeitung angewiesen sind, die wiederum problematische Aspekte hat. Die Fusion könnte zumindest zu einer erheblichen qualitativen Reduktion bei der Nachsorgeproblematik führen, wenn eine entsprechende Auslegung der Anlagen möglich werden sollte. Dies hätte jedoch keine Auswirkungen auf die bereits existierenden nuklearen Abfälle.

⁶ Allerdings muß einschränkend bemerkt werden, daß zur Zeit sehr wohl noch immer ökonomische Kriterien Investitionsentscheidungen von Energieversorgungsunternehmen dominieren. Hier sind aber Änderungen durch veränderte ordnungspolitische Rahmenbedingungen wie Energiesteuern zu erwarten bzw. bereits in Ansätzen vorhanden oder absehbar.

3. Die Proliferationsproblematik würde bei Einführung der hier betrachteten fortgeschrittenen Nuklearsysteme fortbestehen, allerdings bei Fortentwicklung und Einführung einiger Spaltreaktorsysteme oder -brennstoffe wie HTR oder RTR in einer möglicherweise quantitativ und qualitativ reduzierten Weise. Die Attraktivität von ADS-Konzepten im Hinblick auf eine erwünschte Reduktion der Proliferationsproblematik hängt von einer Fülle offener Fragen im Bereich der Wiederaufarbeitung von Brennstoffen ab. Negativ fällt hier ins Gewicht, daß unter Verwendung der Beschleunigereinrichtungen kernwaffenrelevante Materialien schnell und effektiv produziert werden könnten. Die Deuterium-Tritium-Fusion unter Nutzung magnetischer Einschlußkonzepte verlagert bei bestimmungsgemäßem Betrieb (ohne Nutzung der Möglichkeit von Spaltmaterialerbrütung) die Proliferationsproblematik auf Tritium, das nicht auf Platz 1 der proliferationsrelevanten Materialien steht.

Ein simultaner technologischer Durchbruch im Hinblick auf alle drei Schlüsselfragen ist auf dem jetzigen Stand für keines der betrachteten Konzepte ernsthaft zu erwarten. Am ehesten denkbar wäre dies vielleicht noch für die Fusion. Hier ist allerdings eine erhebliche Designabhängigkeit zukünftiger Anlagen gegeben, ohne daß heute angebbare wäre, ob entsprechende Konzepte technologisch und (forschungs-)politisch erreichbar bzw. durchsetzungsfähig wären. Für ADS-Konzepte erscheint es noch verfrüht, eine eindeutige Aussage über realistische Potentiale zu machen.

4.2 Empfehlungen für weitergehende Untersuchungen

Technisch orientierte Untersuchungen zur Technikfolgenabschätzung (TA) fortgeschrittener Nuklearsysteme liegen nicht in einem ausreichendem Umfang vor. Daher ist es sinnvoll, zu einer Reihe von Fragestellungen weitergehende Untersuchungen vorzunehmen. Dies wird in einigen wesentlichen Stichworten ausgeführt.

Eingehendere Untersuchungen zu fortgeschrittenen Spaltreaktoren:

- EPR: Welche ernsthaften Sicherheitsvorteile gegenüber einem Referenz-DWR bestehen tatsächlich? Kann das ökonomische Potential unabhängig von Entwicklerangaben geklärt werden?
- HTR und PIUS: Welche signifikanten Fortschritte gegenüber der Weinberg-Debatte der achtziger Jahre („inhärente Sicherheit“) sind erkenntlich? Welche Gründe (ökonomische, technische oder institutionelle) bestehen für die vermutlich geringen Fortschritte? Wie können Vorteile und fortbestehende Nachteile „innovativer“ Spaltreaktoren gegenüber einem Referenz-DWR grundsätzlich eingeschätzt werden?
- RTR (stellvertretend für Thorium-Brennstoffe): Klärung des Uran-233/Uran-232-Problems (wesentlich ebenfalls bei EA-Konzept). Wie ist die Waffentauglichkeit des

entstehenden Uran-233 einzuschätzen? Untersuchung des Proliferations-Toxizitäts-Dilemmas bei Th-Brennstoffen.

- Wie kann ein vernünftiger Ausgleich zwischen deterministischen und probabilistischen Konzeptionen (gefahren- versus risikoorientierte Untersuchungen) zur Analyse der Anlagensicherheit gefunden werden?

Eingehendere Untersuchungen zu ADS/Hybride

- Welche Vorteile unter-kritischer Systeme zu schnellen oder thermischen kritischen Reaktoren bestehen tatsächlich? (Geht es um mehr als „nur“ Neutronenökonomie?)
- Welche prinzipiellen technologischen Begrenzungen des Potentials bzgl. Sicherheitsvorteilen, Nachsorgevorteilen, Reduktion von Proliferationsgefahren bestehen?
- Wie sind die erheblichen technologischen Herausforderungen einzuschätzen (z.B. Verfügbarkeit von Beschleunigern im Dauerbetrieb, sichere Funktion des Kühlmittels, Spallationstarget und „Window“, Entwicklung und Demonstration der erweiterten Wiederaufarbeitung)?
- Für eine eingehende Analyse der Anlagensicherheit ist unverzichtbar:
 - Vergleich mit flüssigmetallgekühlten schnellen Reaktoren.
 - Wie weit tragen Vorteile der Unterkritikalität? Sind auftretende Überreaktivitäten ausgleichbar?
 - Problematik des gewünschten Werts der Unterkritikalität dauerhaft weit unterhalb von $k=1$ versus ökonomisches Erfordernis k nahe 1?
 - Welche Anfälligkeit von notwendigen Kontroll- und Steuerungsmechanismen besteht?
 - Funktionstüchtigkeit der Kühlkreisläufe und -medien?
- Eine eingehende Analyse des Potentials für Abfallvermeidung und Reduktion vorhandener Abfallmengen ist notwendig:
 - Auffinden limitierender Faktoren (z. B. Abtrenneffizienz der chemischen Verfahren)
 - Welche Toxizitätsminderung (gemessen woran?) unter welchen Randbedingungen erscheinen möglich?
 - Welcher potentielle Vorteile bestünde gegenüber direkter Endlagerung? Wie ist Transmutationstechnologie insgesamt im Vergleich mit direkter Endlagerung nuklearer Abfälle einzuschätzen?
- Zu Untersuchungen zur Proliferationsresistenz gehört:

- Welche Vor- und Nachteile bietet der thoriumhaltige Brennstoff beim EA?
- Wie ist die potentielle Nutzung der Beschleunigereinrichtungen zur Erbrütung von Waffensstoff einzuschätzen?

Eingehendere Untersuchungen zur Fusion:

- Eine Klärung des Potentials der Fusion (Schwerpunkte: Sicherheit, Nachsorge, Proliferation) ist wesentlich. Können die hochgesteckten Ziele der Technologieentwicklung erreicht werden? Dazu ist wesentlich:
 - Transparenz über die Designabhängigkeit (Fusion ist nicht gleich Fusion)
 - Abhängigkeit von der Materialentwicklung transparent machen
 - Option der neutronenarmen Fusion auf den Prüfstand stellen (Vorteile, Realisierbarkeit, Voraussetzungen, Aussichten)
 - Klärung der Proliferationsaspekte
 - Klärung der Aussichten für Abfallbehandlung.
- Einige nachgeordnete Detailfragen, die zu berücksichtigen wären, z.B.:
 - Tritium-Problematik: Umweltfolgen, materialtechnische Folgen, Nachsorgefolgen, Proliferationsrisiken?
 - Demonstration der technischen Machbarkeit nur über Grossexperimente möglich?
 - Aufklärung der zivil-militärischen Ambivalenz von ICF
- Einige übergeordnete Fragestellungen sind wesentlich, z.B.:
 - Ist der hohe und langfristige FuE-Aufwand sinnvoll und vertretbar?
 - Ist eine Akzeptabilität des angesteuerten Fusionsreaktors zu erwarten (Zielfunktion, Pfadwahl und gesellschaftlichen Randbedingungen)?

5 Prospektive Technikfolgenabschätzung und Vorschlag für einen Kriterienkatalog

Untersuchungen zu neuartigen Nukleartechnologien, wie wir sie empfehlen, müssen aber auch über überwiegend technisch orientierte Fragestellungen hinausgehen. Nach den Erfahrungen mit der Spaltenergienutzung ist auch bei der Einführung neuartiger nuklearer Energietechnologien mit einem erheblichen Konfliktpotential zu rechnen. Wenn wirklich eine neue überzeugende Generation von Reaktoren entwickelt werden soll, die breite Akzeptanz nicht nur der Reaktorbetreiber selbst, sondern auch der Bevölkerung erreichen

will, müssen solche Systeme insgesamt akzeptabler erscheinen als die bislang genutzten Technologien auf der Basis fossiler Rohstoffe. Andererseits müßten sie auch den Wettbewerb mit weiterentwickelnden regenerativen Energieträgern aufnehmen können — und dies nicht nur in wirtschaftlicher Hinsicht. Es geht also um eine Generation weit innovativerer Nukleartechnologien, deren Zukunftsfähigkeit konkret überprüfbar sein muß. Ein vorurteilsfreier Dialog darüber ist anzustreben.

Bei Technologien, die sich noch im Stadium von Forschung und Entwicklung befinden, kann eine frühzeitige Debatte über Ziele, technische Möglichkeiten und absehbare Auswirkungen des Technologiegebrauchs, die nicht auf die Forschenden und die Fördermittel vergebenden Instanzen beschränkt bleibt, zur Konfliktreduzierung und möglicherweise auch zu Lösungen beitragen. Die Chance einer solchen frühzeitigen Problematisierung liegt darin, daß die Debatte nicht über bereits fertige Produkte der Technikentwicklung geführt werden muß, sondern bereits in der Vorphase angesiedelt werden kann. Diskurse der Technikfolgenabschätzung (TA) greifen bislang zumeist zu spät, da sie im wesentlichen nachsorgend angelegt sind. Eine prospektive, vorausschauende Perspektive kann bewußt angesteuert werden.

Als erster Schritt des Diskurses ist die Einigung auf Kriterien, die eine verantwortbare Verfolgung von Zukunftsoptionen im Bereich nuklearer Technologien in den Blick nehmen, dienlich. Ein Kriterienraster für fortgeschrittene Nuklearsysteme soll geeignet sein

1. für die eingehende Betrachtung
2. zur Bewertung und
3. gegebenenfalls zur Gestaltung

der verschiedenen denkbaren wissenschaftlich-technischen Optionen.

Wenn Einverständnis darüber hergestellt ist, welche Aspekte für die Betrachtung und schließlich zur Bewertung von nuklearen Technologieoptionen von allen am Diskurs Beteiligten ernst genommen werden, erscheint ein ergebnisorientierter Dialog leichter möglich, als wenn kein gemeinsamer Fokus dieser Art in der Debatte vorausgesetzt werden kann. Eine kriteriengeleitete Debatte über neue Energietechnologien macht dann Sinn, wenn sie hilft, Zielhorizonte mit technischen Optionen in Einklang zu bringen, wenn sie technische Potentiale transparenter macht und hilft, für alle nachvollziehbare Bewertungen durchzuführen, und wenn sie schließlich darauf angelegt ist, gegebenenfalls die rechtzeitige Gestaltung von technologischen Optionen noch in der Forschungs- und Entwicklungsphase zu ermöglichen. Dabei kann auch ein ausgesprochener Dissens über zugrundegelegte Kriterienkataloge bereits ein wesentlicher Beitrag zu einem so strukturierten Diskurs sein.

Für einen kriteriengeleiteten inner- und außerwissenschaftlichen Dialog ist es wesentlich, daß Ziel-, Wert- und Sachebenen konstruktiv miteinander vermittelt werden. Die gewählten Kriterien müssen zum einen von den Sachseiten her gerechtfertigt und angemessen erscheinen und zum anderen eine Orientierung an Zielen und Werten deutlich

machen. Mit dem Entwurf eines Kriterienrasters soll eine Basis geschaffen werden, für eingehendere Untersuchungen über fortgeschrittene Nuklearsysteme. Dabei ist eine Beschränkung auf einige wesentlichen Aspekte notwendig, die eine querschnittsartige und auf naturwissenschaftlich-technische Aspekte besonders achtende Beleuchtung der Technologien erlauben. Weiterhin sollten möglichst viele Kriterien so formuliert sein, daß sie operationabel gemacht werden können.

Der Kriterienvorschlag für weitergehendere TA-Untersuchungen wird hier nur in wenigen Stichworten ausgeführt:

1. *Funktionsfähigkeit:*
Basis dafür ist wissenschaftliche und technische Machbarkeit, sowie Genehmigungsfähigkeit.
2. *Sicherheit im Normalbetrieb:*
Berücksichtigung der gesamten Brennstoffspirale und der gesamten Prozeßkette (über den Reaktor selbst hinaus).
3. *Katastrophenfreiheit:*
Es muß nachprüfbar erkennbar sein, daß das Ziel einer wohldefinierten Katastrophenfreiheit erreichbar ist, d.h. auch außerhalb der Anlage - auch bei höchst unwahrscheinlichen Unfallabläufen - dürfen keine Katastrophenschutzmaßnahmen nötig werden. Dementsprechend müssen auch bislang unberücksichtigte denkbare Unfallsequenzen mit geringer Eintretenswahrscheinlichkeit, aber signifikanten radiologischen Schadenswirkungen deterministisch ausgeschlossen werden können. Aber unabhängig von deterministischen und probabilistischen Argumentationen gilt es, eine Betrachtungsgrenze zu definieren, jenseits derer Unfallbetrachtungen aus praktischen und theoretischen Gründen nicht mehr sinnvoll sind.
4. *Proliferationsresistenz:*
Wenn schon keine proliferationssichere Kerntechnologie vorstellbar ist, soll sie doch wenigstens resistent (robust) gegen militärische Nutzung gemacht werden. Dem probabilistischen Ansatz bei der Reaktorsicherheit entspricht ein auf Entdeckungswahrscheinlichkeiten basierendes Konzept nuklearer Safeguards. Auch hier wäre ein deterministisch orientierter Ansatz durchgreifender, der Proliferationsrisiken an der technologischen Quelle auszuschließen sucht.
Wissenschaftlich-technische Projekte sollten prinzipiell in Distanz zu möglichen Waffenanwendungen stehen.
5. *Minimierung absehbarer Langzeitfolgen:*
Eine Minimierung der Erfordernisse für die Abfallagerung, sowie eine Reduktion der notwendigen Lagerzeiträume auf überschaubare Zeitspannen sollte angestrebt werden. Bei einer Gesamtbewertung nuklearer Abfälle sind alle wesentlichen Aspekte zu

berücksichtigen: isotopenspezifische Lebensdauern, Mobilität in Endlagerumgebungen, Freisetzungspfade, Radiotoxizität, Wärmeentwicklung, Kritikalitätssicherheit, Proliferationsgefahren, Quantitäten.

6. *Nachhaltige Rohstoffnutzung:*
Der vorhersehbare Nutzungshorizont sollte weit über den theoretisch nutzbaren Zyklus für fossile Brennstoffe hinausgehen — also mindestens viele Jahrhunderte bis weit ins nächste Jahrtausend hinein — da ansonsten der erforderliche hohe Entwicklungsaufwand, insbesondere auch im Vergleich zu Entwicklungen im Feld der regenerativen Energien, kaum zu rechtfertigen sein wird.
7. *Kalkulierbares Investitionsrisiko und nachhaltige Energiewirtschaft:*
Die Wettbewerbsfähigkeit mit anderen Energietechnologien sollte nicht bezüglich der fossilen Energieträger gefordert werden, deren Gebrauch mittelfristig deutlich einzuschränken ist. Der Bezugspunkt sollte das Ziel einer nach-fossilen Ära der Energiebereitstellung sein. Die Investitions- und Stromgestehungskosten sollten daher in einer ökonomischen und ökologischen Gesamtrechnung nicht größer sein als diejenigen, die man für die wesentlichen regenerativen Energieträger erwartet.
8. *Beitrag zur Erreichung von Klimaschutzzielen:*
Der tatsächlich erwartbare Beitrag zur Erreichung von Klimaschutzzielen (beispielsweise Reduktion der CO₂-Emissionen) muß in Konkurrenz zu den Beiträgen, die durch die mögliche Installierung anderer Energietechnologien — insbesondere erneuerbarer Energiequellen — möglich wäre, überzeugend sein; dies auch hinsichtlich der spezifischen Kosten. Auch die Möglichkeit zur weltweiten Partizipation an den Technologien ist ein wesentlicher Aspekt.
9. *Kulturverträglichkeit:*
Nukleare Großtechnologien, die bislang genutzt werden, stehen vor dem Dilemma ihrer hohen Komplexität. Ein Ausweg aus dem Dilemma kann prinzipiell nur über eine drastische Senkung des Risikopotentials, eine durchgängige Orientierung an Prinzipien inhärenter Sicherheit und eine Komplexitätsreduktion im Hinblick auf die Sicherheitsproblematik durch die Orientierung an dem Prinzip der Fehlerfreundlichkeit gelingen. Ansonsten stellt sich die Frage nach der Kulturverträglichkeit von Energietechnologien. Eine Transparenz der technischen Zusammenhänge für Experten, Nicht-Experten und Nutzer sollte gewährleistet sein. Eine Angepaßtheit an die vorhandene technisch-ökonomische Kultur und die Möglichkeit zum Technologietransfer stehen in einem wesentlichen Zusammenhang.
10. *Demokratieverträglichkeit:*
Die Auswirkungen auf Strukturen weltweiter wissenschaftlich-technischer Kooperation bzw. Abhängigkeitsverhältnisse sind mitzubedenken. Weiterhin muß die Einführung neuer Technologien auch in einem offenen und transparenten innergesellschaftlichen Prozeß erfolgen können. Dies betrifft bereits den Bewertungsprozeß

anhand der hier vorgeschlagenen Kriterien. Beispielsweise ist es wesentlich, in welcher Weise über die Definition von Betrachtungsgrenzen, die für das Kriterium der Katastrophenfreiheit große Bedeutung haben, entschieden wird. Die Möglichkeit grenzüberschreitender negativer Folgen der Nutzung nuklearer Technologien macht deutlich, daß auch der Respekt vor der Vielfalt der Kulturen einzufordern ist.

11. Gerechtigkeit:

Das Problem der Gerechtigkeit tritt bei der Entwicklung und projektierten Nutzung fortgeschrittener Energietechnologien (im nuklearen Bereich) auf. Eine Berücksichtigung der räumlichen und zeitlichen Getrenntheit von Nutzern und Betroffenen der Technologie ist erforderlich.

Der hier vorgeschlagene Kriterienkatalog ist nicht auf vollständige Berücksichtigung aller diskutierbaren Aspekte zugeschnitten, vielmehr setzt er bewußt Prioritäten. Diese sind veränderbar, was sich auf die konkrete Ausgestaltung der einzelnen Kriterien überträgt, die zunächst ein Angebot zur Diskussion darstellen. Die Kriterien sind so ausgewählt, daß sich anhand von ihnen erweisen sollte, ob heute interessante zukunftsfähige Innovationen im Bereich nuklearer Energietechnologien vorgeschlagen werden können bzw. Entwicklungen in diese Richtung zu erwarten sind. Dabei wird eine Gestaltbarkeit der technologischen Entwürfe im Vorlauf von Forschung und Entwicklung angenommen.

Die Kriterien alleine werden innerhalb einer eingehenderen Untersuchung fortgeschrittener Nuklearsysteme für praktische Zwecke nicht ausreichen. Es käme weiterhin darauf an, für die einzelnen Kriterien soweit möglich Indikatoren anzugeben, die eine auch quantitative Einstufung erlauben, inwieweit die verschiedenen Anforderungen an die fortgeschrittenen Nuklearsysteme erfüllt werden können.

Literatur:

W. Liebert, R. Bähr, A. Glaser, L. Hahn, C. Pistner: *Fortgeschrittene Nuklearsysteme — Review Study*. Technology Assessment TA 34/1999, Schweizerischer Wissenschaftsrat, Bern, April 1999.

W. Liebert: *Vergleich fortgeschrittener Nuklearsysteme zur Energienutzung*. Erscheint in: E. Rebhan (Hrsg.): *Energie — Handbuch für Wissenschaft und Technik*. Springer Verlag, 2001.

		Referenz-DWR	EPR	HTR-Modul
Sicherheit	Normalbetriebsem.	< 100 µSv - 1 mSv	Vergleichbar	k. A.
	Inventar	6,8x10 ⁹ Ci / 1,3 GW	Vergleichbar	Vergleichbar
	Max. Unfallfreisetzung	2,6x10 ⁶ manSv	k. A.	Geringer
	W. f. Kernschmelzen, Unfälle mit Freisetzung	3,6x10 ⁻⁶ /a, 3,6x10 ⁻⁶ /a (umstritten)	10 ⁻⁶ /a, < 10 ⁻⁷ /a	5x10 ⁻⁷ /a
	Katastrophenfreiheit	Nein	Nein	Nachweisdefizite
Brennstoff	Element	Uran oder Uran/MOX	Uran oder Uran/MOX	Uran/Thorium
	Anreicherung	3–4%	bis 5%	8%
Proliferation	Produzierte Menge waffenfähiger Stoffe	250 kg(Pu)/GWa	Vergleichbar	Geringer (Faktor 2,5 bis zu 6 bei 20% Anr.)
	Direkter Zugriff auf Waffensstoffe durch WA	Optional, insb. für MOX	Ja, WA geplant	WA nicht vorgesehen
	Proliferationsrel. Tech.	Urananreicherung, WA	Vergleichbar	Urananreicherung
Ökonomie	Investitionskosten	~3.400 – 6.000 DM/kW (F1997/CH1984)	2.350 DM/kW (1998)	3.150 – 5.500 DM/kW je nach Stückzahl (1991/93)
	Stromgestehungskosten	4,9 – 10,2 Pf/kWh (F1997/CH1995)	5,2 – 7,2 Pf/kWh (1998/1996)	k. A.
	Abrißkosten	500 Mio.– 1,2 Mrd. DM	Vergleichbar	Vergleichbar
Einsatzmöglichkeiten	Stromproduktion	(Ja)	Ja	Ja
	Prozeßwärme/Fernw.	Nein	Nein	Ja
	Transmut. von Abfällen	Nein (für Pu ggf. mögl.)	Vergleichbar	Vergleichbar
Nachsorge	Aktivität/Abfallmenge	Hoch	Vergleichbar	Vergleichbar
	Anteil relev. Nuklide	Hoch	Vergleichbar	Vergleichbar
	Geol. Endlagerung	Ja	Ja	Ja
	Lagerbedarf (ohne WA), (mit Wiederaufarbeitung (WA))	12.500–25.000 m ³ /Betriebszeit, 26.000–38.000 m ³ /Betriebszeit	Vergleichbar Vergleichbar	Höher (Faktor 3–4) -
	Lagerzeit	> 10 ⁶ a	Vergleichbar	Vergleichbar
Realisierung	Stand der Entwicklung	-	Übergang zu detailed design	basic design
	denkb. Realisierungszeit	-	~ 5 Jahre	Offen > 10 Jahre
	Prototyp geplant	-	2003–2004	Nein
	Genehmigungsverfahren	-	in Vorbereitung	Standortunabhängig begonnen (abgebrochen)
	Investierter Aufwand	Unklar / hoch	~ 365 Mio. DM	k. A.
	Derzeitige Entwicklung	-	Intensiv	Keine
	Entwicklungsbedarf	entf.		

Tabelle 2: Vergleich Referenz-DWR/EPR/HTR-Modul.

		Referenz-DWR	ADS:ATW	Magnetfusionsreaktor
Sicherheit	Normalbetriebsem.	< 100 μ Sv - 1 mSv	k. A.	1 μ Sv (umstritten)
	Inventar	6,8x10 ⁹ Ci / 1,3 GW	k. A.	Höher, (qual. niedriger)
	Max. Unfallfreisetzung	2,6x10 ⁶ manSv	k. A.	50 mSv - 3 Sv (umstritten)
	W. f. Kernschmelzen, Unfälle mit Freisetzung	3,6x10 ⁻⁶ / a, 3,6x10 ⁻⁶ / a (umstritten)	k. A.	< 10 ⁻⁷ / a (angestrebt)
	Katastrophenfreiheit	Nein	Offen (Nein)	Angestrebt
Brennstoff	Element	Uran oder Uran/MOX	Transurane (u. Spaltprod.)	Deuterium/T (Basis:Lithium)
	Anreicherung	3-4%	Entfällt	Entfällt
Proliferation	Produzierte Menge waffenfähiger Stoffe	250 kg(Pu)/GWa	0	~ 10 ² kg/GWa (T)
	Direkter Zugriff auf Waffenstoffe durch WA	Optional, insb. für MOX	Zugriffsmöglichkeit nicht angestrebt	Ja (T)
	Proliferationsrel. Tech.	Urananreicherung, WA	Beschleuniger	T-Abtrennung
Ökonomie	Investitionskosten	~3.400 – 6.000 DM/kW (F1997/CH1984)	k.A.	Höher
	Stromgestehungskosten	4,9 – 10,2 Pf/kWh (F1997/CH1995)	Höher	Eher höher
	Abriffkosten	500 Mio.–1,2 Mrd. DM	k. A.	Höher
Einsatzmöglichkeiten	Stromproduktion	(Ja)	Ja	Ja
	Prozeßwärme/Ferrow.	Nein	k. A.	Denkbar
	Transmut. von Abfällen	Nein (für Pu ggf. mögl.)	Ja	Möglich
Nachsorge	Aktivität/Abfallmenge	Hoch/Hoch	Geringer: 10 ⁻² / 10 ⁻¹	10 ⁻² – 10 ⁻⁴ / vergleichbar
	Anteil relev. Nuklide	Hoch	Unklar	Geringer
	Geol. Endlagerung	Ja	Ja	Ja (Vermeidung angestrebt)
	Lagerbedarf (ohne WA), (mit Wiederaufarbeitung (WA))	12.500–25.000 m ³ /Betriebszeit, 26.000–38.000 m ³ /Betriebszeit	Geringer (Ziel: Faktor 10)	37.000 m ³ ohne Rezykl. (günstigste Variante)
	Lagerzeit	> 10 ⁶ a	vergleichbar	Vergleichbar
Realisierung	Stand der Entwicklung	-	conceptual design	conceptual design
	denkb. Realisierungszeit	-	~ 30 a	~ 50 a
	Prototyp geplant	-	~ 2027	> 2040 (Demo)
	Genehmigungsverfahren	-	-	
	Investierter Aufwand	Unklar (hoch)	k. A.	10 Mrd. ECU (EU allein)
	Derzeitige Entwicklung	-	k.A.	> 1 Mrd. EURO/Jahr (weltweit)
	Entwicklungsbedarf	entf.	~ 30 Mrd. Dollar	~ 80 Mrd. EURO (weltw.)

Tabelle 3: Vergleich Referenz-DWR/ADS/Magnetfusion.