

Science or Fiction



Hat Atomenergie Zukunft?

04 Einleitung

- 04 Ist Atomenergie zur Eindämmung des Klimawandels unverzichtbar?



06 Das Programm »Generation IV«

- 07 Generation IV und was uns die Nuklearindustrie darüber verrät
09 Generation IV und was uns die Nuklearindustrie verschweigt



16 Fusion

- 16 Fusion, die Grundlagen
21 Unsicherheiten und Risiken



24 Schlussfolgerungen & Ausblick

- 24 Generation IV
25 Fusion
26 Empfehlungen



28 Technische Daten

Gas-Cooled Fast Reactor (GFR)	
Characteristics	Risks and Difficulties
• Uranium, Plutonium, carbide	• Reduced controllability of thermal inertia
• Helium	• In vessel structural mode to vented fast reactor
• Argon	• Very high temperatures (up to 1000°C)
• Neutron spectrum	• Extreme conditions (high high temperature)
• 200 MW _{th}	• High residual decay heat situation
• Core temperature: 850°C	• Significant high power density
• 50 GW _{th} /m ³	• Proliferation
• Density: 100 MW _{th} /m ³	

32 Literaturverzeichnis

34 Glossar

35 Abkürzungen



imprint

Medieninhaber, Verleger, Herausgeber: Österreichisches Ökologie-Institut, Seidengasse 13, A-1070 Wien, Web: www.ecology.at, Mail: office@ecology.at, Tel: 0043-1-523 61 05, Fax: 0043-1-523 58 43; Redaktion: Ingⁱⁿ Antonia Wenisch, Mag. Richard Kromp, Mag. David Reinberger; Layout, Grafik, Produktion: Ulli Weber; Druck: gugler crossmedia; Wien, November 2007

Gefördert aus den Mitteln des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft und der Wiener Umwelthanwaltschaft.

Dieses Booklet dient als Vorbereitung der Konferenzteilnehmer wie auch der Sprecher für die Konferenz »Science and Fiction – Is there a Future for Nuclear«. Diese internationale Konferenz zur Fusionsenergie und den neuen Reaktormodellen wurde von Global 2000/Friends of the Earth Austria veranstaltet und fand am 8. November 2007 in Wien statt.

Diese Publikation enthält unsere Beiträge zur aktuellen Diskussion über die zukünftige Sicherheit der Energieversorgung und welche Wege wir dabei beschreiten sollten. Wir konzentrieren uns dabei auf die möglichen Entwicklungsszenarien für die Kernenergie. Die Atomindustrie versucht zur Zeit sich ihre eigene Zukunft durch die Wiedereinführung alter Konzepte wie etwa der Kernfusion und eine Wiederauflage der Kernspaltungsreaktoren in den sogenannten Generation IV-Systemen zu sichern. Während genug Information zu Kernspaltung und Kernfusion von Projektfinanziers, Forschungseinrichtungen und der Europäischen Kommission, die den Löwenanteil an Energieforschungsgeldern der Kernfusion widmet, zur Verfügung steht, versuchen wir hier eine umfassendere Perspektive auszuarbeiten und zu untersuchen, wie weit es sich bei diesen Konzepten um Fiktion handelt, und was von diesen Konzepten sich in der künftigen Realität niederschlagen könnte. Die Entscheidung darüber muss jetzt fallen.

Wir danken für die finanzielle Unterstützung des Österreichischen Bundesministeriums für Land – und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Lebensministerium) und der Wiener Umweltschutzanstalt, die Textproduktion und Distribution dieses Booklets ermöglicht haben. Unser besonderer Dank gilt Mag. Patricia Lorenz und Dr. Helmut Hirsch für die Übersetzung, Durchsicht und redaktionelle Bearbeitung dieser Publikation.

Die AutorInnen

Ingⁱⁿ. Antonia Wenisch
Österreichisches Ökologieinstitut

Mag. Richard Kromp
Österreichisches Ökologieinstitut

Mag. David Reinberger
Wiener Umweltschutzanstalt

Wien, November 2007



Ist Atomenergie zur Eindämmung des Klimawandels unverzichtbar?

Die großen Herausforderungen unserer Zeit sind die Gestaltung einer nachhaltigen Entwicklung und die Bekämpfung des Klimawandels. Dabei geht es darum, wie die Gesellschaft Ressourcen und Energie fair nutzen und gleichzeitig eine radikale Reduktion der CO₂ Emissionen erzielen kann. Dabei ist zu beachten, dass der Abbau von CO₂ in der Atmosphäre ein langsamer Prozess ist. Die Auswirkungen der heutigen CO₂ Emissionen werden auch noch in den nächsten Jahrzehnten sichtbar sein. Wenn wir starke Klimaveränderungen verhindern wollen, gilt es keine Zeit zu verlieren: **CO₂ Reduktionen müssen billig , effektiv und ohne Verzögerung umgesetzt werden. Sollte Atomenergie Teil solcher Maßnahmen sein?**

Angesichts der bisherigen Erfahrungen mit Atomenergie gibt es keine Anhaltspunkte, dass dem so sein könnte: Enorme Beträge wurden in die Entwicklung und kontinuierliche Verbesserung der Atomenergietechnologie seit den 50er Jahren des vorigen Jahrhunderts investiert. Dennoch leistet die Atomenergie heute mit 7% der Weltenergieversorgung keinen wesentlichen Beitrag. Die Gründe dafür sind die anhaltenden Probleme mit Technik und Sicherheit: Die erste Generation der meist kleinen Prototyp-Reaktoren war mit vielen Kinderkrankheiten geschlagen. Erst die zweite Generation – das ist der Großteil der heute in Betrieb befindlichen KKW – erlebte einen kurzen Bauboom in den 80er Jahren. Die Atomenergie wurde nach dem Unfall von Three Mile Island in den USA im Jahre 1979 praktisch aufgegeben, da es als Reaktion auf den Unfall zu einem vollständigen Baustopp für große KKW in den USA kam. Der schwere Reaktorunfall in Tschernobyl, Ukraine, 1986 wiederum sensibilisierte den Großteil der Europäer gegenüber den Gefahren der Atomenergie. Das Vertrauen der EU-Bürger in die »friedliche« Nutzung der Atomenergie ist gering. Diese Tatsache bestätigen die Meinungsumfragen jedes Jahr von neuem: »... 53% der Europäer sind der Meinung, dass das Risiko von Nuklearenergie als Energiequelle gegenüber ihren Vorteilen überwiegt, nur 33% sind gegenteiliger Meinung« Weiters: »... würden die meisten Europäer den derzeitigen Anteil der Kernenergie beibehalten oder verringern ...« [EUROPÄISCHE KOMMISSION 2007].

Foratom, die europäische Lobbyorganisation der Nuklearindustrie, setzt sich stark für eine Renaissance der Atomenergie ein, um so die CO₂-Emissionen zu reduzieren. Foratom könnte sich hier eine zu anspruchsvolle Aufgabe gestellt haben: Derzeit erzeugen die 439 weltweit betriebenen KKW jährlich 372 GW Strom, 31 KKW sind in Bau, wobei sich der Großteil der Baustellen in Asien befindet, nur ein KKW ist in Europa in Bau. Im Jahre 2006 sind nur zwei KKW an das Netz gegangen, allerdings wurden sechs Atomkraftwerke stillgelegt [IAEA PRIS 2007]. Die Prognosen der IAEO, der Internationalen Energieagentur IEA und der OECD verweisen auf keine dramatischen Umbrüche, sondern erwarten auch weiterhin nur ein lang-

sames Wachstum der Atomenergie bis 2030 – mit einer Nettowachstumsrate von nur 600 MW jährlich. Mit einer so geringen Wachstumsrate kann Atomenergie keine bedeutende Rolle bei der zukünftigen Weltenergieproduktion spielen.

Die Atomindustrie verbessert nur ihr Image und ihre Präsenz in der öffentlichen Diskussion und verstärkt ihre Marketingaktivitäten. In Wirklichkeit sind ihre Kapazitäten für die Errichtung von neuen Atomkraftwerken sehr beschränkt. Aufgrund der schlechten Auftragslage, finanziellen Verlusten und der Firmenkonzentration, ist nur mehr eine Handvoll Firmen auf dem Markt übrig geblieben. Gegenwärtig muss die Branche auch mit einem Mangel an qualifizierten Mitarbeitern und Produktionskapazitäten für ihre sehr spezialisierten Produkte fertig werden. Ein echtes Comeback in der Form von neu errichteten Kernkraftwerken vor dem Jahre 2030 ist auszuschließen.

Atomenergie: CO₂-frei?

- Atomenergie ist nicht CO₂-frei, wenn man die gesamten Brennstoffkette betrachtet. Bei Verwendung der aktuell in Deutschland üblichen Erze (mit einem Urangehalt von ca. 2%) entsteht pro kWh Atomstrom (kWh_{el}) die Menge von 32g CO₂-Äquivalent (CO_{2eq}). In Frankreich sind es nur 8g/kWh_{el}, während es in Russland 65g und in den USA 62g sind. Einer der Gründe dafür ist die Uranqualität: je niedriger die Urankonzentration im Erz, desto mehr Gestein muss abgebaut und verarbeitet werden und desto mehr CO₂ wird emittiert.
- Eine wesentliche Erhöhung der Atomenergieproduktion würde auch zur Verwendung von Erz aus Minen mit geringerem Urangehalt und dadurch zur Erhöhung der CO₂-Emissionen bis zu 120g CO_{2eq}/kWh_{el} führen, womit Atomenergie viele andere Energietechnologien übertreffen würde: Gaskraftwerke mit Kraftwärmekopplung 50-140g CO_{2eq}/kWh_{el}; Windkraft 24g, Wasserkraft 40g, Energieeinsparung 5g CO_{2eq}/kWh_{el} [OEKO 2007].
- Nicht unerwähnt bleiben darf, dass Uranabbau Landschaften zerstört, Erde, Luft und Wasser in den Abbaugebieten kontaminiert und jede Tonne verwendbaren Urans viele Tonnen von strahlendem Abfallerz zurückläßt.
- Ein bedrohliches Erbe stellt das Ende der Brennstoffkette dar, verbrauchte Brennstäbe, die für Mensch und Umwelt gefährlich sind und für Millionen für Jahren nicht vernachlässigt werden können. Potentielle Standorte von Endlagerstätten für den hochaktiven Müll werden für gewöhnlich von den lokalen Bewohnern abgelehnt – so der Staat nicht jede Diskussion einfach unterbindet.
- Die Pläne für die Systeme der Generation IV sollen eine Wiederverwendung von abgebranntem Brennstoff ermöglichen. Wahr ist allerdings, dass auch dann Endlagerstätten benötigt werden, wie in Kapitel 2 ausgeführt wird. Ein anderer weit verbreiteter Irrtum ist, dass die Fusionstechnologie keine radioaktiven Abfälle erzeugen würde. Fusion wird in Kapitel 3 behandelt.

Diese Kapitel zeigen auch, dass jeder Reaktor für die Erzeugung von Spaltmaterial für den Bau von Atombomben verwendet werden kann, und daher auch die Reaktoren der Generation IV nicht als proliferationssicher bezeichnet werden können; dasselbe gilt auch für den Fusionsreaktor.

Das Programm »Generation IV«

Neue Herausforderungen und alte Hüte

➔ »Generation IV« Hintergrund

Aktuell erleben wir die Diskussion darüber, ob und unter welchen Bedingungen die großen kommerziellen Reaktoren der 70er, 80er und 90er Jahre (Generation II) über ihre geplante Lebensdauer von zumeist 30 Jahren betrieben werden dürfen. Gleichzeitig werden neue Reaktoren (Generation III) vorgestellt, Weiterentwicklungen der Generation II ohne drastische Änderungen. Generation III KKW's laufen bereits in Japan, und werden eben in Europa gebaut. Nach der Meinung zahlreicher Wissenschaftler ist die Verwendung dieser Reaktoren jedoch zeitlich begrenzt, weil ihrer Meinung nach der Vorrat an Uran (Ausgangsstoff für den Brennstoff der meisten Reaktoren der Generation III) innerhalb der nächsten drei Jahrzehnte zur Neige gehen wird.

Aufgrund dieser düsteren Aussichten wurde 2000 das »Generation IV International Forum (GIF)« eingerichtet. Bis vor kurzem gehörten diesem Forum die 10 Staaten Argentinien, Brasilien, Kanada, Frankreich, Japan, Südkorea, Südafrika, Schweiz, UK und USA sowie die 2003 über EURATOM beigetretene Europäische Union an, Ende 2006 traten noch Russland und China bei. Die Mitgliedschaft in diesem internationalen Forum verpflichtet Teilnehmerstaaten langfristig zur Unterstützung von Forschungsprojekten. »Mit gefangen, mit gefangen« sind über EURATOM somit auch Staaten, die eine prinzipiell kritische Haltung gegenüber der Nutzung von Kernenergie haben.

2001 initiierte die IAEA eine ähnliche, mittels IAEA Budget finanzierte Initiative »Internationale Projekte zu innovativen Nuklearreaktoren und Brennstoffkreisläufen« (INPRO). GIF und INPRO vereinbarten eine Kooperation auf technischem Level [HIRSCH et al 2005]. Im Februar 2007 waren 28 Länder oder Organisationen beteiligt.

Die Botschaft von GIF und INPRO an die Medien, Politiker und die Bevölkerung lautet folgendermaßen: Generation IV soll eine sichere, wirtschaftlich konkurrenzfähige, proliferation-resistente Energiequelle ohne Beitrag zum allgemeinen Treibhausgas-Problem sein. Generation IV wird sogar als nachhaltig dargestellt – eine Bezeichnung, die erneuerbaren Energiequellen und Umweltschutz vorbehalten ist. Die Tatsache, dass keines der sechs geförderten Reaktorkonzepte alle Generation IV Ziele erfüllt, wird nicht erwähnt [HIRSCH et al 2005].



Generation IV und was uns die Nuklearindustrie darüber verrät

Generation IV bedeutet nicht nur die Entwicklung neuer Reaktortypen. Man versteht darunter das gesamte Rahmenprogramm für eine internationale Forschungskooperation zur Entwicklung neuer Kernenergiesysteme von der Ressourcengewinnung bis zur Endlagerung. Der Forschungsbedarf wurde definiert und acht Entwicklungsziele formuliert, welche den vier politischen Zielen Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit, Sicherheit und Terrorresistenz Genüge tun sollen [SCHULENBERG 2004]

➡ **»Generation IV« Ziele**

1. Nachhaltige Erzeugung von Energie mittels langzeitverfügbarer Systeme auf Basis einer effektiven Spaltstoffnutzung unter geringstmöglicher Belastung der Luft.
2. Verbesserung des Schutzes von Mensch und Umwelt durch Minimierung des Nuklearabfalls und der Zerfallswärme des Abfalls sowie Reduktion von Langzeit-Radiotoxizität.
3. Klare wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit im Vergleich mit anderen Energiequellen.
4. Finanzielles Risiko, welches mit dem Risiko anderer Energieprojekte vergleichbar ist.
5. Verbesserte Sicherheit und Zuverlässigkeit.
6. Geringe Eintrittswahrscheinlichkeit und geringe Konsequenzen eines Kernschadens.
7. Wegfall des Bedarfs von Notschutzmaßnahmen außerhalb der Anlage.
8. Entwendung von waffenfähigem Spaltmaterial soll sehr unattraktiv und nicht erstrebenswert sein. Die Kernenergiesysteme sollen besser geschützt sein gegenüber terroristischen Angriffen.

Im Rahmen der Generation IV FuE-Programme werden folgende Reaktorsysteme gefördert [SCHULENBERG 2004]:

➔ **Die »Generation IV« Reaktorkonzepte**

I. Gasgekühlte schnelle Reaktorsysteme

engl. Gas-Cooled Fast Reactor (GFR) System

Das GFR System ist ein heliumgekühlter Reaktor mit schnellem Neutronenspektrum, der vor allem für die Produktion von Elektrizität und Abbau von Aktinoiden (=Aktiniden) entwickelt wird [HIRSCH et al 2005]. Mittels Brüterkonzept soll der Brennstoff um zwei Größenordnungen besser genutzt werden als in heutigen thermischen Reaktoren.

II. Bleigekühlte schnelle Reaktorsysteme

engl. Lead-Cooled Fast Reactor (LFR) System

Die LFR Reaktoren werden mittels flüssigem Metall (Blei oder Blei/Wismuth) gekühlt, haben ein schnelles Neutronenspektrum und einen »geschlossenen Brennstoffkreislauf«, und sollen in unterschiedlichen Größen, von vergleichsweise kleinen »Batterien« bis zu großen Kraftwerken, angeboten werden können. Die LFR »Batterie« ist laut Plänen der GIF ein koppelbares, serienmäßig hergestelltes und »schlüsselfertiges« Kraftwerk mit einer besonders langen Lebensdauer (10 bis 30 Jahre) [HIRSCH et al 2005]. Mittels schnellen Neutronen und »geschlossenem Brennstoffkreislauf« soll eine effiziente Umwandlung von brutfähigem Uran und Verwertung von Aktinoiden erreicht werden.

III. Salzschnmelze Reaktorsysteme

engl. Molten Salt Reactor (MSR) System

Das MSR System wird vorrangig zur Elektrizitätserzeugung und Atomwülvernichtung konstruiert und basiert auf einem thermischen Neutronenspektrum unter Verwendung eines »geschlossenen Brennstoffkreislaufs«, in welchem der Brennstoff Uran – in Kühlmittel Natriumfluoridsalz aufgelöst – durch Graphitkanäle zirkuliert [HIRSCH et al 2005]. Brennstoffbeladung, Wiederaufbereitung und Spaltproduktabtrennung während des Betriebs sollen eine hohe Verfügbarkeit gewährleisten und Aktinoide zwecks Vernichtung einfach der Schmelze hinzugefügt werden können.

IV. Natriumgekühlte schnelle Reaktorsysteme

engl. Sodium-Cooled Fast Reactor (SFR) System

Das SFR System benutzt ebenso schnelle Neutronen und einen »geschlossenen Brennstoffkreislauf«. Dieser Reaktortyp soll vor allem der Vernichtung von hochradioaktivem Abfall, Plutonium und anderen Aktinoiden dienen.

V. Wassergekühlte Reaktorsysteme mit überkritischen Dampfungständen

engl. Supercritical-Water-Cooled Reactor (SCWR) System

SCWRs sind Reaktoren, deren Kühlmittel Wasser über jene kritischen Werte gebracht wird, bei denen es keinen Unterschied zwischen flüssiger und gasförmiger Phase gibt (ein Zustand, der die Einsparung von diversen teuren Bauelementen wie Wärmetauschern, etc. erlaubt). Dieser Reaktortyp wird vor allem für die Produktion von billiger Elektrizität entwickelt.

VI. Gasgekühlte Höchsttemperatur-Reaktorsysteme

engl. Very-High-Temperature Reactor (VHTR) System

Das VHTR System verwendet ein thermisches Neutronenspektrum und eine »Einweg«-Uran-Brennstoffkette. Hauptziel dieses gasgekühlten Reaktors ist die Zurverfügungstellung von elektrischer Energie, Wasserstoff und Prozesswärme.

2002 wurde die Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems veröffentlicht, auf deren Basis in allen Mitgliedsländern FuE-Programme erarbeitet und durchgeführt werden [NERAC 2002]. Während die Beforschung der einzelnen Systeme unabhängig voneinander durchgeführt wird, sollen andere Problembereiche für alle sechs Systeme gemeinsam gelöst werden (»geschlossener Brennstoffkreislauf«, Spaltstoff- und Werkstoffentwicklung, Wasserstoffproduktion, Sicherheit und Zuverlässigkeit, Wirtschaftlichkeit, physikalischer Schutz und Proliferationsbarrieren).

Generation IV und was uns die Nuklearindustrie verschweigt

Allem Anschein nach versucht die Nuklearindustrie, das »sinkende Schiff vor dem Untergang« zu bewahren, indem die Nukleartechnologie einer Imagekorrektur unterzogen und als Retter vor dem drohenden Klimawandel dargestellt wird. Unter dem Vorwand der Nachhaltigkeit findet ein Facelifting statt. Es geht neben technischen und wirtschaftlichen Verbesserung vor allem darum, das Vertrauen der Bevölkerung zurück zu gewinnen. Die neue Generation von Reaktoren soll als nachhaltig, wirtschaftlich konkurrenzfähig, sicher, zuverlässig und terrorresistent gesehen werden. Die gesteckten Ziele sind ehrgeizig, doch einige hochangesehene Institutionen (z.B. »Massachusetts Institute of Technology« MIT) halten die Ziele des GIF für unrealistisch [MIT 2003]. Im Folgenden prüfen wir diese Ziele auf ihren Realitätsgehalt.

Acht Ziele und acht Irrtümer

Nachhaltigkeit ist ein Konzept, das nicht nur einen umfassenden humanökologischen Kontext betrachtet, sondern auch einen weiten Zeithorizont. Unter Nachhaltigkeit versteht man nach der Definition der Brundtland-Kommission 1987 eine Wirtschaftsweise, welche die Bedürfnisse der heutigen Generation befriedigt, ohne die künftigen Generationen in den Möglichkeiten zu beeinträchtigen, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen. Nachhaltigkeit könnte definiert werden als die Nutzung eines natürlichen System ausschließlich in der Weise, dass es in seinen wesentlichen Charakteristika langfristig erhalten bleibt und den nachfolgenden Lebewesen möglichst unverändert übergeben wird.

➔ »Generation IV« und Nachhaltigkeit

Die nachhaltige Erzeugung von Energie mittels möglichst langzeitverfügbarer Kernenergiesysteme auf Basis einer effektiven Spaltstoffnutzung unter geringstmöglicher Belastung der Luft ist das erste Ziel des GIF. Aber schon allein der Abbau von Uranerzen erzeugt 80% des heute anfallenden radioaktiven Abfalls (in Bezug auf Masse, nicht auf Radioaktivität). Für jede Tonne Brennstoff, wie er in Leichtwasserreaktoren eingesetzt wird, müssen – abhängig vom Urangehalt – tausende oder sogar zehntausende Tonnen Erz abgebaut werden. Die Mengen an radioaktiven Rückständen, die in Abbaugebieten zurückbleiben, sind dementsprechend groß. Beispielsweise lagern in den entsprechenden Regionen in New Mexico (USA) und Wismut (in der ehemaligen DDR) jeweils mehr als 100 Millionen Tonnen radioaktiver Abfälle aus der Urangeinnung auf der Oberfläche der Erde [HIRSCH et WEISH 2007]. Auch wenn alle anderen Probleme gelöst werden, kann die Erzeugung von Energie mittels Kernenergiesystemen wegen der Abfallproblematik nur kurzfristig einen Vorteil bringen, aber nicht auf Dauer. Der radioaktive Abfall, der bei der zivilen Nutzung der Atomenergie entsteht, weist ein außerordentliches Langzeit-Gefährdungspotential auf. Er kann über Millionen Jahre nicht vernachlässigt werden und ist in der Industriegesellschaft einzigartig [HIRSCH 2007]. Vor der in Europa besonders hoch bewerteten Möglichkeit der tief unter der Erde gebauten und nach einem gewissen Bewachungszeitraum mit Betonsperren unzugänglich gemachten Endlagerungsstätten wird von zahlreichen Geologen gewarnt. Das Hauptproblem besteht darin, dass es einfach unmöglich ist, einen belastbaren Sicherheitsnachweis für die erforderlichen langen Zeiträume über Millionen von Jahren zu führen. Die Naturwissenschaft stößt hier an die Grenzen ihrer Vorhersagefähigkeit [HIRSCH

2007]. Die Lagerungsstätten der Spaltprodukte müssten laufend vor den unterschiedlichsten Bedrohungen wie Wassereintrich, Überhitzung, Sabotage und Diebstahl des Mülls zwecks missbräuchlicher Verwendung geschützt und bewacht werden, was auf keinen Fall möglich ist. Neben Erdbeben, Verwerfungen und Vulkanismus stellen möglicherweise auch zukünftige Eiszeiten eine Bedrohung dar, da Gletscher Unmengen an Gestein aufgraben und abtragen können.

Wie auch immer, allmählich kann man eine Verlagerung weg von der Nuklearenergie hin zu anderen nutzbaren Energien beobachten. Die Generation IV Initiative versucht diesen Prozess umzukehren, indem sie Nuklearenergie attraktiv macht und als nachhaltig und CO₂-frei darstellt. Eine Bezeichnung, die – wie schon erwähnt – aus gutem Grund den erneuerbaren Energien vorbehalten ist. Diese Strategie soll der Nuklearindustrie und den nuklearen Forschungseinrichtungen das Überleben sichern [HIRSCH et al 2005].

➔ »Generation IV« und Nuklearabfall

Das zweite Ziel, die *Verbesserung des Schutzes von Mensch und Umwelt durch Nuklearabfallminimierung und -entsorgung sowie Reduktion von Langzeit-Radiotoxizität*, verspricht viel Potential und ebenso den hohen Bedarf an Forschungsgeldern. Die versprochene Reduzierung des Atommülls muss jedoch genau betrachtet werden. Von der GIF Initiative wird der »geschlossene Brennstoffkreislauf« als Hauptvorteil der Generation IV Konzepte gefeiert. Solch ein System wird als nachhaltig und effektiver als bisherige Systeme angesehen. Eine MIT-Studie von 2003 weist auf den Umstand hin, dass die Kosten für Brennstoff für ein System mit »geschlossenem Brennstoffkreislauf« inklusive Mülllagerung ungefähr 4,5 mal so groß sind wie die Kosten für Einweg-Brennstoff. Somit erscheint es als unrealistisch, dass man jemals neue Reaktoren und Brennstoffketten-Technologien erwarten kann, die das Problem der hohen Kosten, der Sicherheit und der Proliferation gleichzeitig lösen können. Die Beseitigung des langlebigen radiotoxischen Abfalls wird durch die Weiterentwicklung der Technologie sogenannter »geschlossener Brennstoffkreisläufe« begünstigt. Dies steht jedoch in keiner Relation zu den Risiken (Proliferation) und Kosten [MIT 2003].

Die Weiterverwendung gebrauchter Brennstäbe wird als »Recycling« bezeichnet. Der Prozess der Wiederaufbereitung ist nicht neu, sondern wird schon relativ lange praktiziert. Durch die Wortwahl könnte der Eindruck erweckt werden, dass es einen »geschlossenen Brennstoffkreislauf« gäbe, der – ganz im Sinne der Nachhaltigkeit – keine Ressourcen aufbrauche und keine Nuklearabfälle erzeuge. Dies ist jedoch ein Irrtum. Die Brennstoffkette (ein passendere Bezeichnung als »Brennstoffkreislauf«) benötigt immer auch frisches Uran, welches bekanntlich nicht erneuerbar ist und nur unter enormer Umweltbelastung abgebaut werden kann. Dies ist jedoch nicht das einzige Übel. Während des Reaktorbetriebs werden in den Brennstäben laufend Atomkerne hoher Massezahl (²³⁵U) in Kerne niedriger Massezahl mit hohem Neutronenüberschuss gespalten. Diese Umwandlung von Spaltstoff in Spaltprodukte geschieht unter Energiefreisetzung, die Erzeugnisse der Spaltung sind oft instabil, also radioaktiv. Die gasförmigen Spaltprodukte, wie etwa die radioaktiven Isotope der Edelgase Argon, Krypton und Xenon (vor allem die wegen ihrer langen Halbwertszeit radiologisch bedeutsamen Isotope ¹³³Xe und ⁸⁵Kr), sowie die flüchtigen radioaktiven Iod-Isotope (¹³¹I) können zum Teil – je nach Dichte der Brennstabhüllen – in die Atmosphäre entweichen und in der Umgebung von Nuklearanlagen auch nachgewiesen werden.

Feste Spaltprodukte (z.B. die radioaktive Isotope von Strontium oder Cäsium) müssen als strahlender Abfall gelagert werden, ein geringer Anteil entkommt auch hier in Form von radioaktiven Aerosolen (¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr). Während der Nutzung eines Brennstabes im Reaktor kann nicht der gesamte spaltbare Anteil tatsächlich gespalten werden, bevor der Stab getauscht werden muss. Um diesen noch verwendbaren Anteil an ursprünglichem Spaltstoff nicht unbenutzt im Endlager verschwinden zu lassen, muss er durch Wiederaufbereitung abgetrennt werden. Durch diesen komplexen und riskanten Prozess

geschieht vorerst sicher eine spürbare Reduktion der Radioaktivität des Abfall. Doch durch die zusätzliche Nutzbarmachung wird mehr Spaltstoff verfügbar gemacht als ursprünglich durch die geringere Ausbeute ohne »Recycling«. Die Verwendung dieses zusätzlichen Spaltstoffs aus der Wiederaufbereitung erzeugt selbstredend mehr endlagerungsbedürftige Spaltprodukte. Wie auch immer, das Ende des Atomzeitalters wird hinausgeschoben, mehr Atomanlagen müssen gebaut und auch wieder stillgelegt werden (wodurch wiederum Abfall entsteht). Das »Recycling« von gebrauchten Brennstäben verursacht eine gefährliche Aufkonzentrierung der radioaktiven Spaltprodukte. Dieses führt, auf Dauer gesehen, zu einer Erhöhung des Gesamtvolumens des Abfalls, teilweise mit einer höheren Aktivitätskonzentration.



© Comet Zürich (www.nagra.ch)

Zusätzlich zu den bisher besprochenen Spaltprodukten entstehen auch noch Aktinoide (= Aktinide), wie etwa das für den Bau von Kernwaffen und Brennstäben verwendbare Plutonium. Diese sind mittels Neutronenbeschuss abbaubar, ein Umstand, der in Systemen der Generation IV ausgenutzt werden soll, um den Abfall schon im Reaktor zu verringern.

Derzeit entstehen etwa 10.000 Tonnen abgebrannter Kernbrennstoff pro Jahr [HIRSCH 2007]. Jede Tonne enthält neben den endlagerungsbedürftigen Spaltprodukten mehrere Kilogramm Plutonium und andere Aktinoide. In der Wiederaufbereitungsanlage werden die Bestandteile von einander getrennt. Das separierte Plutonium wird dann entweder mit nicht angereichertem Uran vermischt als Mischoxidbrennstoff (MOX-Brennstoff) einer Weiterverwendung in Kernreaktoren zugeführt (wobei der Plutonium-Anteil etwa 5% beträgt), oder für den Bau von Atomwaffen verwendet. Das separierte Uran wird mit dem Uranisotop ^{235}U in Anreicherungsanlagen auf etwa 3-5% angereichert. Dieses Uran kann dann in Kernreaktoren als LEU (»lowly enriched uranium«) verwendet werden. Eine Anreicherung auf etwa 20% und mehr erzeugt für den Bau von Nuklearwaffen geeignetes HEU (»highly enriched uranium«). Für den Bau von Waffen wird Uran jedoch üblicherweise auf 90% und mehr angereichert. Das für die Reaktoren unbrauchbare »abgereicherte« Uran wird vor allem zum Bau von Flugzeugen und durchschlagskräftiger Munition gebraucht. Die nicht verwendbaren strahlenden Spaltprodukte und Aktinoide werden »vorerst« der Zwischenlagerung zugeführt, da die Frage der Endlagerung bis heute noch nicht gelöst ist. Erforderlich wäre eine praktisch vollständige Abtrennung sämtlicher langlebigen Nuklide während der Wiederaufbereitung, um sicherzustellen, dass die verbleibenden Abfälle nur für kurze Zeiträume sicher gelagert werden müssen. Die derzeit bei der Wiederaufarbeitung erreichten Abtrennungsgrade von 99% scheinen hoch, sind aber aufgrund der tatsächlich anfallenden Mengen bei weitem unzureichend! Bei der Wiederaufbereitung fallen auch Abgase und Abwässer an, welche trotz Reinigungsmaßnahmen noch radioaktive Bestandteile enthalten. Es müsste eine Technik der »Super-Wiederaufarbeitung« entwickelt werden (Abtrennungseffizienz von 99,99%), die im Gegensatz zur jetzigen Praxis der Wiederaufarbeitung die Umwelt nicht belasten und kein Katastrophenpotential haben dürfte [HIRSCH 2007]. Aus Gründen der Imagekorrektur propagiert die Nuklearindustrie nun verstärkt den vollständigen Abbau der langzeit-toxischen Aktinoide während des Reaktorbetriebs. Dafür setzt man auf die Verwendung schneller Neutronen im Reaktorkern. Im natriumgekühlten schnellen Reaktor soll etwa durch geeignete Reaktorgeometrie und »geschlossenen Brennstoffkreislauf« die geforderten 99,99% Aufarbeitung und Wiederverwertung der Aktinoide erreicht werden [SCHULENBERG 2004]. Was gerne verschwiegen wird: Die »unrecyclebaren« Spaltprodukte bleiben dennoch über. Generation IV Reaktoren sind weit von dem Ziel entfernt, erfolgreich ihren eigenen Nuklearabfall zu minimieren und zu vernichten [HIRSCH et al 2005]. Schlussendlich zerplatzt die Seifenblase: Der Betrieb nuklearer Anlagen kann wahrscheinlich niemals ohne Erzeugung von radioaktivem Müll geschehen. Unserer Meinung nach kann Nukleartechnologie nicht zum Umweltschutz beitragen.

➤ **»Generation IV« und Konkurrenzfähigkeit**

Als drittes Ziel wurde die *klare wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit im Vergleich mit anderen Energiequellen* festgelegt. Die Nukleartechnologie kann jedoch kaum längerfristig wirtschaftlich konkurrenzfähig sein. Die erneuerbaren Energiequellen werden so lange nicht versiegen, wie die Sonne scheint. Die fossilen Ressourcen sind jedoch endlich, die Reserven unserer derzeit wichtigsten Primärenergiespeicher Erdöl, Erdgas und Natururan knapp. Ein Wechsel zu nachhaltigen (weil erneuerbaren!) Energiequellen ist nicht abwendbar, höchstens aufschiebbar. Wir sind der Meinung, dass der Aufschub nur denen nützt, die entweder ein direktes wirtschaftliches Interesse an der Nuklearenergie oder an nuklearer Proliferation haben.

Der Greenpeace Report von 2005 verweist auf den Umstand, dass die abgeschätzten Kosten für die Entwicklung der sechs Generation IV Konzepte etwa 6000 Million US\$ betragen. Es ist mehr als nur wahrscheinlich, dass sowohl die Kosten, als auch die angegebene Zeit bei weitem überschritten werden. Gemäß einem der stärksten Promoter des GIF Programms, der französischen Regierung, wird Generation IV für die kommerzielle Nutzung frühestens 2045 zur Verfügung stehen, und nicht bereits 2030, wie offiziell von der GIF vorgesehen. Das muss vor dem Hintergrund betrachtet werden, dass Nuklearenergie am liberalisierten Markt bis heute nicht konkurrenzfähig ist; weder mit Kohle, noch mit Gas, auch nicht mit Windenergie [HIRSCH et al 2005]. Aktuell scheint es in Frankreich Anstrengungen zu geben, die Generation IV Entwicklungen zu beschleunigen, mit dem Ziel des ersten funktionierenden Proto-Typs um 2020. Es gilt abzuwarten, ob diese Pläne wirklich durchgeführt werden.

➤ **»Generation IV« und Finanzielles Risiko**

Als viertes Ziel wurde ein *mit dem Risiko anderer Energieprojekte vergleichbares finanzielles Risiko* gefordert. Es macht den Eindruck, dass den Banken und Investoren neuer Nuklearenergieprojekte vorgetäuscht werden soll, dass der nukleare Markt auf Grund des angeblichen Bedarfs an neuen Bauprojekten große Chancen bietet. Es ist jedoch gewagt, vom steigenden Bedarf an nutzbarer Energie auf eine zukünftig erhöhte Bautätigkeit in der Atomindustrie zu schließen, wo noch nicht einmal die Frage der technischen Umsetzbarkeit zukünftiger Systeme geklärt ist. Letztendlich ist nicht der Bedarf allein, sondern auch die Machbarkeit der Projekte (Akzeptanz in der Bevölkerung, Standortauswahl, Sicherheit, usw.) ausschlaggebend. Es gibt tatsächlich einen steigenden Bedarf an nutzbarer Energie, aber nur wenige realistische Pläne für neue Kernkraftwerke [WENISCH 2006].

➤ **»Generation IV« und Sicherheit**

Das fünfte Ziel verspricht dort Verbesserungen, wo die Nukleartechnologie bis heute offenbar am meisten versagt hat: am Sektor der *Sicherheit und Zuverlässigkeit*. Das negative Image der unsicheren und unzuverlässigen Nuklearindustrie soll der Vergangenheit angehören. Es ist aber ein Irrtum, dass man jedes Risiko durch irgendwelche Maßnahmen beliebig einschränken kann. Ein gewisses Risiko wird immer bestehen bleiben: Erdbeben, Terror, Sabotage, menschliches Versagen, technische Gebrechen, Verwendung der Anlagen weit über ihre ursprünglich genehmigte Lebensdauer hinaus, widrige Zufälle, unerwartete physikalische und chemische Phänomene, und Kriege. Dazu kommt schon in naher Zukunft noch der Wegfall wichtiger Energiequellen: erst im Juli 2007 warnte die IEA vor einer neuen Ölkrise innerhalb der nächsten fünf Jahre und dem Überschreiten des Fördermaximums für Erdöl noch in diesem Jahrzehnt [IEA 2007]. Irgendwie muss jedoch der zukünftige Engpass an nutzbarer Energie, hervorgerufen durch die Verknappung der fossilen Ressourcen sowie die prognostizierte weltweite Bedarfssteigerung, so weit wie möglich aufgefangen werden. Die Nukleartechnologie kann das wohl kaum. Es müssten um ein Vielfaches mehr Nuklearanlagen gebaut werden, als derzeit überhaupt möglich wäre. Mit der Anzahl der Anlagen steigt auch das Unfall-Risiko. Und letztendlich würden für den zuverlässigen langfristigen Betrieb der benötigten Anlagen die Uranressourcen nicht ausreichen [WENISCH 2006]. Sehr bald schon müsste man – wiederum aufgrund von Verknappung – auf die bereits

heute verfügbaren erneuerbaren Technologien umsteigen. Auch wenn durch Investitionen die Sicherheit von Nuklearanlagen vergrößert werden kann, ist das noch lange kein Grund, weiterhin auf diese Technologie zu setzen. Sicherer und zuverlässiger wäre unserer Meinung nach ein sofortiger Aus- und Umstieg.

Ähnlich verhält es sich mit dem sechsten und siebenten Ziel *geringe Eintrittswahrscheinlichkeit und geringe Konsequenzen eines Kernschadens* sowie *Wegfall des Bedarfs von Notschutzmaßnahmen außerhalb der Anlage*. Die Generation IV Systeme könnten sich aufgrund extremerer Betriebsbedingungen (höhere Temperatur, höherer Druck, höherer Abbrand) als noch gefährlicher als die bisherigen Anlagen herausstellen, und müssen daher technisch aufwendiger gestaltet werden. Diese Probleme umgeht man am sichersten durch eine Zuwendung zu nachhaltigen Technologien, deren Nutzung solche Risiken erst gar nicht mit sich bringen.

➔ »Generation IV« und Proliferation

Ein Schwerpunkt liegt bei der Beforschung des achten Ziels, die *Entwendung von waffenfähigem Spaltmaterial sehr unattraktiv und nicht erstrebenswert zu machen und Kernenergiesysteme besser gegenüber terroristischen Angriffen zu schützen*.

»Bezüglich Proliferation wird generell bemerkt, dass es praktisch nicht möglich ist, zivile Nuklearenergiesysteme proliferations-resistent zu gestalten. Somit kann diesbezüglich bei der Entwicklung von Generation IV Systemen kein großer Fortschritt erwartet werden« [HIRSCH et al 2005]. Um eine Kernwaffe herzustellen, braucht man entweder hoch angereichertes Uran (HEU, hauptsächlich aus ^{235}U oder ^{233}U), das Neptuniumisotop ^{237}Np oder »weapon-grade« Plutonium [SHOLLY 2007]. In mit Uran betriebenen Reaktoren entstehen durch Neutronenbeschuss des Uranisotops ^{238}U als Nebenprodukt verschiedene Plutonium-Isotope. Das Plutoniumisotop ^{239}Pu ist wegen seiner geringen kritischen Masse besonders gut für den Bau einer Kernwaffe geeignet, etwas mehr als 5 kg reichen in einer günstig gestalteten Bombengeometrie aus, eine explosionsartig stattfindende Kettenreaktion auszulösen (mit fortgeschrittener Technologie könnte die notwendige Menge noch kleiner werden). Ob Plutonium waffenfähig (»weapon-grade«) oder nur für den Reaktor geeignet (»reactor grade«) ist, hängt vor allem von seinem Anteil an dem beim Spaltprozess zusätzlich zum Plutoniumisotop ^{239}Pu produzierten Plutoniumisotop ^{240}Pu ab. Dieses Isotop emittiert aufgrund spontaner Spaltung Neutronen und kann daher zu einer verfrühten (abgeschwächten) Detonation der Nuklearwaffe führen. »Weapon-grade« Plutonium muss daher einen wesentlich kleineren Anteil an ^{240}Pu aufweisen als »reactor-grade« Plutonium. Um die Entstehung von waffenfähigem Plutonium zu verhindern, muss der Brennstab so lange wie möglich im Reaktor verweilen. Das Plutonium muss dann in einer Wiederaufbereitungsanlage von den Spaltprodukten abgetrennt werden. Die hierzu eingesetzten chemisch-physikalischen Abtrennverfahren wurden ursprünglich ausschließlich aus militärischen Gründen entwickelt und können gleichermaßen für die Abtrennung von »weapon-grade« Plutonium und »reactor-grade« Plutonium verwendet werden. Die vollständige Kontrolle über die Nutzung aller Wiederaufbereitungsanlagen weltweit in Hinblick auf die Gewinnung von waffenfähigem Plutonium ist schwer möglich. Gerade das Bestreben, mittels Wiederaufarbeitungsanlagen Spaltstoff für Reaktoren zu gewinnen, birgt daher ein großes Risiko der nuklearen Proliferation. Um eine missbräuchliche Verwendung ausschließen zu können, dürfte Plutonium eigentlich erst gar nicht erzeugt werden.

➔ »Generation IV« und Thorium

Auf der Suche nach alternativen Spaltmaterialien wird im Rahmen der Generation IV Forschungsprogramme neben der althergebrachten Verwendung von Uran auch die Verwendung von Thorium untersucht. In der Vergangenheit wurden erste Thorium-Erfahrungen mit den Hochtemperatur-Reaktortypen (HTR) gemacht, deren Technologie als Basis für die Höchsttemperatur-Reaktortypen (VHTR) der Generation IV dienen soll. Indien,

ein Land mit nur wenigen Uran-, aber großen Thoriumsand-Vorkommen, und eventuell andere Länder, überlegen, eine auf Thorium basierende Brennstoffkette einzurichten [KREUSCH et al 2006]. Die geschickte Argumentation der Nuklearindustrie, dass durch die Verwendung von Thorium-Reaktoren die Produktion von neuem Plutonium eingeschränkt und der Bestand an vorhandenem waffenfähigem Plutonium reduziert werden könnte [KAKODKAR et al 2006], ist mit Vorsicht zu genießen. Wir glauben, dass die Thoriumwirtschaft nicht weniger gefährlich als die Plutoniumwirtschaft ist. Durch Neutronenbeschuss des Thoriumisotops ^{232}Th entsteht über Umwege das nicht minder gefährliche Uranisotop ^{233}U , welches wie ^{239}Pu wegen der geringen kritischen Masse sowohl für Kernreaktoren als auch für Kernwaffen verwendbar ist. Nebenbei entsteht aber auch noch das Uranisotop ^{232}U . Dieses Isotop erzeugt kurzlebige Tochterprodukte (z.B. ^{208}Tl), welche als Gammastrahler das Handling, die Wiederaufbereitung und das »Recycling« von ^{233}U erschweren. Ein Umstand, der als Vorteil propagiert wird, da die Thorium-Brennstoffkette dadurch gegenüber Proliferationsrisiken widerstandsfähiger sein soll [KAKODKAR et al 2006]. Des einen Freud, des anderen Leid! Die Entstehung des hochradioaktiven Nebenprodukts dient als Rechtfertigung für die Verwendung von Thorium als Spaltmaterial (statt Uran).

Die Diskussion über Proliferationsbarrieren lassen jedoch ein zweites Problem etwas in den Hintergrund treten: Ob »weapon-grade« oder »reactor-grade«, die Radiotoxizität von Plutonium und Uran darf nicht unterschätzt werden. Die Inhalation von 40 Milliardstel (!) Gramm ^{239}Pu reicht aus, um den Grenzwert der Jahres-Aktivitätszufuhr für Inhalation bei Arbeitern zu erreichen. Wenige Kilogramm ^{239}Pu (etwa eine tennisballgroße Kugel) können – theoretisch – alle Menschen töten, wenn jeder einen Teil davon inhaliert. Plutonium weist mit seiner relativ geringen Halbwertszeit von 24.000 Jahren eine hohe Langzeit-Toxizität auf. ^{233}U ist ebenso hoch toxisch und hat noch dazu eine Halbwertszeit von 159.000 Jahren.

Eine weitere Schwierigkeit bei der Verwendung von Thorium entsteht durch den um mehrere Wochen verzögerten Zerfall des Zwischenprodukts ^{233}Pa . Nach einem längeren Shutdown einer mit Thorium betriebenen Anlage entsteht im Nachhinein aufgrund der verzögerten Aktivität von Protactinium ein Überschuss an spaltbarem ^{233}U , wodurch die Reaktivität des Brennstoffs in unerwünschtem Maße erhöht wird [KAKODKAR et al 2006]. Alles in allem halten wir die Thorium-Brennstoffkette für gefährlich und schlecht kontrollierbar, es findet nur eine Verlagerung der Probleme statt.

➤ **»Generation IV« und Schnelle Brüter**

Es gibt zahlreiche Hinweise darauf, dass die acht Ziele des GIF nicht realisierbar sein können. Bleibt nur noch die Spekulation darüber, warum schon seit Jahren trotz Erfolglosigkeit so verbissen an Generation IV Systemen geforscht wird. Wenig an den Generation IV Reaktorsystemen ist wirklich neu. Die Hälfte der sechs »neuen« Reaktorkonzepte basieren auf dem alten Konzept des Schnellen Brüters (engl. »Fast Breeder«), welches jedoch weltweit nur bei an einer Hand abzählbaren Leistungsreaktoren umgesetzt werden konnte. Alle bis auf einen (Belojarsk/Russland) wurden – zum Teil nach kürzester Laufzeit – aufgrund von Schwierigkeiten mit der Steuerung, Unfällen und Bürgerprotesten und wegen unverantwortbarem Risiko von den Betreibern stillgelegt. Das Konzept des Schnellen Brüters ist unserer Meinung nach extrem gefährlich. »Brüten« bezeichnet hier die Erzeugung von Spaltstoff (z.B. ^{239}Pu) beim gleichzeitigen Verbrauch eines anderen Spaltstoffs (z.B. ^{238}U). Die Bezeichnung »schnell« steht für die Verwendung von schnellen Neutronen, welche zur Spaltung des mit abgebremsten (so genannten thermischen) Neutronen nicht spaltbaren Uranisotops ^{238}U benötigt werden. Aus dem gebrüteten Spaltstoff, dem spaltbaren ^{239}Pu oder ^{233}U , kann nach Extraktion aus dem gebrauchten Brennstoff frischer Reaktorbrandstoff produziert werden. Der Reaktor muss ohne Moderator (Neutronenbremsmittel) arbeiten. Schnelle Neutronen lösen, verglichen mit thermischen Neutronen, mit wesentlich geringerer Wahrscheinlichkeit eine neue Kernspaltung aus. Daher muss die Spaltstoffkonzentration im



Vergleich zu moderierten Reaktortypen erhöht werden. Durch die hohe Spaltstoffkonzentration kommt es zu einer sehr hohen Wärmeleistungsdichte, weshalb ein geeignetes Kühlmittel gefunden werden muss, allerdings ohne Moderatorwirkung, wodurch Wasser als Kühlmittel ausscheidet. Mit flüssigem Natrium gekühlte Brutreaktoren hatten laufend Probleme und mussten fast alle stillgelegt werden: durch Natrium hervorgerufene Korrosion und Undichtheiten, heftige exotherme Reaktionen von Natrium mit Luft und Wasser unter Bildung von Natriumhydroxid und Freisetzung von Wasserstoff sowie die Gefahr einer explosiven Reaktion bei Vorhandensein einer feinen Verteilung des Natriums (große Reaktionsoberfläche) sind nur einige der Probleme, die in der Vergangenheit zu Unfällen in Kernreaktoren geführt haben. Der japanische Schnelle Brüter in Monju etwa wurde nach einem schweren Unfall (Natriumbrand) 1995 stillgelegt, eine Wiederinbetriebnahme scheiterte unter anderem auch am Widerstand der Bevölkerung. Der französische Schnelle Brüter Superphönix wurde als letzter in Europa zur Produktion von Elektrizität betriebener Brutreaktor nach zahlreichen Störfällen wegen Natriumlecks, zerstörten Wärmetauschern und gefährlichen Leistungsschwankungen stillgelegt. Der kleinere französische Brüter Phénix läuft noch immer als Forschungsreaktor (hauptsächlich für Bestrahlungsversuche) und wird in 2009 geschlossen.

Offensichtlich erhoffen sich jetzt Forschungseinrichtungen, aber auch die FuE-Abteilungen von Nuklearfirmen, Forschungsgelder, um aus Entwicklungen, die in den letzten 30 Jahren nicht erfolgreich umgesetzt wurden, noch möglichst viel herauszuholen [WENISCH et PRAUHART 2006]. Es gibt den dringenden Verdacht, dass unter dem Deckmantel der Generation IV versucht wird, die aus Sicherheitsgründen längst verworfenen Konzepte für Brutreaktoren wiederzubeleben. Jüngste Ereignisse und Unsicherheiten in der Energieversorgung sollen den Forschungsbedarf begründen: 1990 Ölkrise (Golfkrieg), 2005 rasanter Ölpreisanstieg (Hurrikan Katrina), 2006 Gaskrise (Streit Ukraine Russland), 2006 Korrektur der Kohlereserven (Deutschland korrigiert deutlich bisherige Angaben), 2007 aktuelle Peak-Oil-Warnung noch für dieses Jahrzehnt durch die IEA und der drohende Klimawandel. Bis heute verstummt der Ruf nach Weiterentwicklung nicht. Generation IV Brüter-Systeme sind eine Neuauflage des Schnellen Brüter Konzepts. Ein Umstieg auf Schnelle Brüter bedeutet jedoch ziemlich sicher eine Fortsetzung der Plutonium- und Thoriumwirtschaft in einem Ausmaß, wie sie bislang nicht stattgefunden hat. Unmengen an hochtoxischen Materialien wie Plutonium- und Uranisotope würden wie Kohle oder Erdöl um die halbe Welt transportiert. Das sollte unter allen Umständen vermieden werden.

Fusion

Fusion, die Grundlagen

Kernfusion ist jener Prozess, der die Sonne und auch alle anderen Sterne mit Energie versorgt. Vom energetischen Standpunkt aus ist es für leichte Atomkerne günstiger, schwerere Kerne zu formen. Dieser Vorgang ist die mit Abstand größte und wichtigste Energiequelle im gesamten dem Menschen bekannten Universum. Im Prinzip ist die Kernfusion der umgekehrte Vorgang der Kernspaltung. Zwei fundamentale Kräfte bestimmen den Prozess der Kernfusion, die elektromagnetische Wechselwirkung und die starke Wechselwirkung. Unter normalen Bedingungen auf der Erde haben Atomkerne auf Grund der Abstoßung der Protonen (elektromagnetische Wechselwirkung) einen großen Abstand zueinander. Wenn die Distanz zwischen zwei Atomkerne auf etwa 10^{-15}m oder weniger verringert wird, beginnt der Prozess der Kernfusion.

Bei dieser Entfernung ist die starke Wechselwirkung etwa 100 mal stärker als die abstoßende Wirkung der elektromagnetischen Wechselwirkung. Dieser Umstand erklärt auch die Stabilität vieler natürlich vorkommender Atomkerne. Ist der entstehende Atomkern nicht schwerer als Eisen oder Nickel, so wird bei dem Prozess mehr Energie freigesetzt als notwendig ist um den Vorgang zu starten.

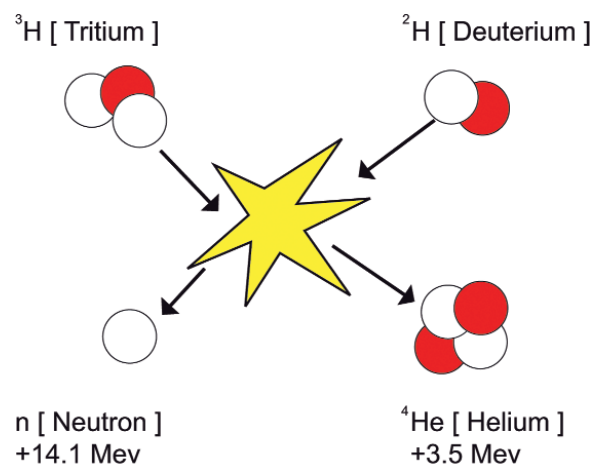


Figure 1: Illustration of the fusion of deuterium and tritium

➤ Die erforderlichen Rahmenbedingungen

Um den Prozess der Kernfusion in Gang zu setzen ist es notwendig, zwei geeignete Atomkerne so nahe zusammen zu bringen, dass unter dem Einfluss der starken Wechselwirkung der schwerere Atomkern eines neuen Elements entsteht. Wie kann das erreicht werden? In der Sonne und allen anderen Sternen ist es die Gravitationskraft, die auf Grund der gewaltigen vorhandenen Massen Drücke erzeugt, welche die Voraussetzungen für die Fusion schaffen. Die daraus und aus den Fusionsprozessen resultierende Wärme führt bei der Sonne zu einer Kerntemperatur von etwa 15 Millionen Kelvin.

Auf der Erde steht keine Möglichkeit zur Verfügung, nach dem Vorbild der Sterne auch nur annähernd den notwendigen Druck zu erzeugen. Fusion kann daher auf der Erde nur durch die Bereitstellung entsprechend hoher Temperaturen in Gang gesetzt werden. Bei hohen Temperaturen gibt es einen Punkt, an dem die Teilchen eine derartig schnelle Bewegung ausführen, dass eine ausreichende Wahrscheinlichkeit für die Kollision und die Überwindung der elektromagnetischen Barriere besteht. Diese Temperatur liegt für die betrachteten Prozesse auf der Erde bei über 100 Millionen Kelvin oder etwa der zehnfachen Kerntemperatur der Sonne.

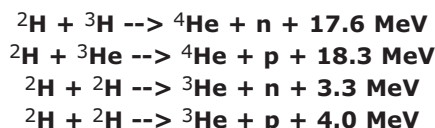
➔ Mögliche Prozesse

Bei der Temperatur, die für die Kernfusion notwendig ist, befindet sich die Materie in keinem der drei »üblichen Aggregatzustände fest flüssig oder gasförmig«, sondern in einem Zustand, den die Wissenschaft als Plasma bezeichnet. Die Materie im Zustand des Plasmas hat einige bemerkenswerte Eigenschaften. Atome im Plasma sind teilweise oder gänzlich ionisiert. Das heißt, dass die Atomkerne und die Elektronen der Hülle gänzlich voneinander getrennt sind. Bei Temperaturen, die denen der Kernregionen der Sonne entsprechen oder darüber liegen, liegt eine völlige Separierung der Atomkerne und ihrer Hüllen vor. Mit Materie im Zustand des Plasmas beschäftigt sich ein eigener Zweig der Naturwissenschaft, die sogenannte Plasmaphysik.

Es ist offensichtlich, dass es kein Material gibt oder geben kann, welches in der Lage wäre, Materie mit einer Temperatur von über 100 Millionen Kelvin einzuschließen. Jegliches vorstellbare Wandmaterial würde innerhalb weniger Augenblicke verdampfen. Das Plasma würde durch den Wärmetransfer außerdem sofort die nötige Energie verlieren, die notwendig ist, um den Fusionsprozess aufrecht zu erhalten. Auf Grund der prinzipiellen Eigenschaften des Plasmas ist allerdings keine Wand im klassischen Sinn notwendig, um das Plasma einzuschließen. Da die Atome des Plasmas ionisiert und damit elektrisch geladen sind, ist es möglich ihren Einschluss mittels eines geeigneten Magnetfelds zu erreichen.

Das Magnetfeld eines Fusionsreaktors muss in der Lage sein, verschiedenste Anforderungen zu erfüllen. Zu allererst muss es dazu geeignet sein, das Plasma in der Luft schwebend innerhalb des Reaktors einzuschließen, wie auch das Plasma mit neuem Brennstoff zu beschicken, ohne dadurch die Stabilität des Plasmas zu gefährden. Und schließlich ist es auch notwendig, dass die Produkte des Fusionsprozesses kontrolliert aus dem Plasma entfernt werden können. Es wäre für einen möglichen zukünftigen Energie erzeugenden Fusionsreaktor von Vorteil, wenn Teile des notwendigen Brennstoffs ebenfalls innerhalb dieser Prozesskette erzeugt werden könnten.

Der Brennstoff für die Kernfusion kann vom Prinzip her jedes Element sein, das leichter als Eisen ist. Für den ITER (Internationaler thermonuklearer Versuchsreaktor), welcher nach den Hoffnungen der internationalen Fusionsforscher der letzte Schritt auf dem Weg zum Prototypen des Kernfusionskraftwerks, dem so genannten DEMO sein soll, ist geplant Deuterium und Tritium als Brennstoff einzusetzen. Deuterium kann mittels Elektrolysekaskaden aus Wasser gewonnen werden und hat einen Anteil von 0,015% am gesamten vorhandenen Wasserstoff. Tritium kann durch Kernprozesse aus Lithium gewonnen werden. Darüber hinaus haben die schweren Isotope des Wasserstoffs den Vorteil, nur ein Proton im Kern zu enthalten, wodurch die zu überwindenden abstoßenden Kräfte relativ gering sind. Die folgende Aufzählung enthält die Energieausbeute für einige Fusionsprozesse, welche die leichtesten Elemente Wasserstoff und Helium als Brennstoff enthalten:



Die für die Fusion auf der Erde näher betrachtete Reaktion erzeugt ein Neutron, das den Großteil (14,1 MeV) der freigesetzten Energie trägt. Neutronen sind Teilchen ohne elektrische Ladung und können somit dem Magnetfeld entkommen, welches das Plasma einschließt. Dadurch sind sie geeignet, Energie aus dem Plasma abzuführen und an die Wand des Reaktors zu übertragen. An der Reaktorwand wird die kinetische Energie des Neutrons in Wärme umgewandelt und an ein Arbeitsmedium (Kühlmittel) übergeben, um elektrische Energie mittels einer Turbine zu erzeugen. Außerdem können die Neutronen zur Erbrütung von Tritium aus Lithium genutzt werden. Die Energie, die beim auch im Prozess erzeugten Helium verbleibt, kann zum Ausgleich der Strahlungsverluste des Plasmas verwendet werden.

➤ Unterschiede zwischen Kernfusion und Kernspaltung

Kernfusion und Kernspaltung beruhen auf den selben physikalischen Grundprinzipien. In beiden Fällen werden Änderungen in der Zusammensetzung von Atomkernen herbeigeführt, um Energie zu gewinnen. Der Energiegewinn rührt von den unterschiedlichen Bindungsenergien der Nukleonen (Neutronen und Protonen) in den Ausgangsatomen und in den jeweiligen Spalt- beziehungsweise Fusionsprodukten entsprechend der berühmten Beziehung $E=m \cdot c^2$ von Albert Einstein her. Ob nun die Energiegewinnung durch Fusion oder Spaltung möglich ist, hängt von den Bindungsenergien der Reaktionspartner an. Für die Kernspaltung bieten sich schwere Elemente wie Uran oder Thorium an. Die Energiegewinnung erfolgt auf Grundlage der physikalischen Eigenschaften dieser Elemente. Innerhalb gewisser enger Randbedingungen ist es möglich, den Prozess zur Energiegewinnung durch Kernspaltung kontrolliert ablaufen zu lassen.

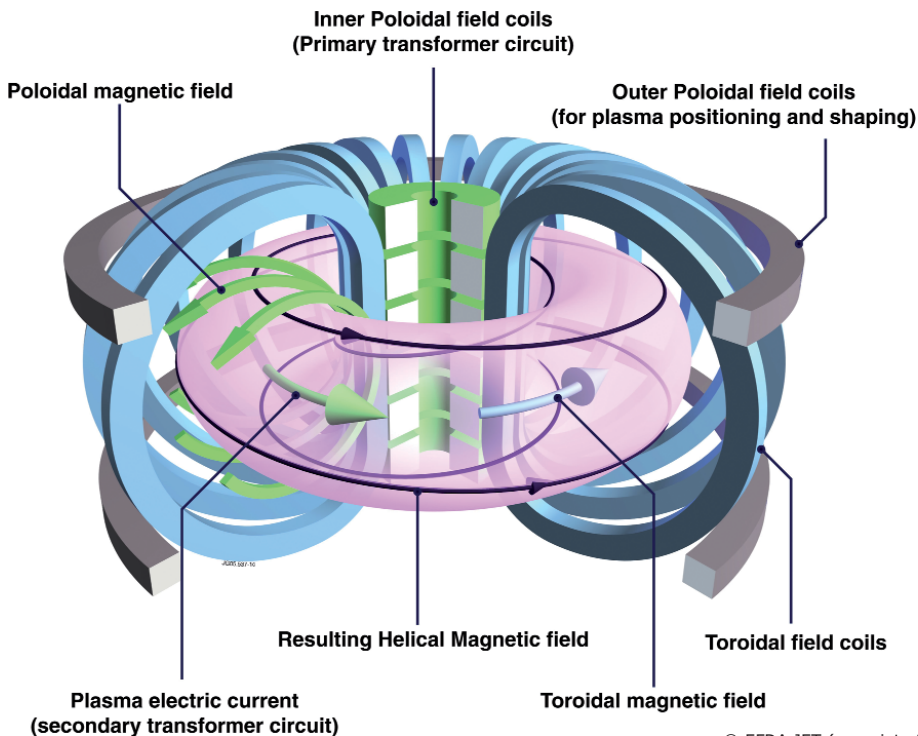
Bei der Verwendung leichter Elemente kann man durch Kernfusion Energie gewinnen. Die Kernfusion führt zwei leichte Atome unter Energiegewinn in ein bestimmtes schwereres Element um. Wenn die Rahmenbedingungen für die Kernfusion nicht aufrechterhalten werden – zum Beispiel durch den Zusammenbruch des Magnetfelds auf Grund eines Kurzschlusses – bricht die Fusionsreaktion fast augenblicklich zusammen. Wenn auch ein unkontrolliertes Weiterlaufen der Reaktion unmöglich ist, kann bei einem derartigen Unfall durch das an die Wand gelangende heiße Plasma mit gravierenden Schäden an der Reaktortechnik gerechnet werden. In Folge der Neutronenstrahlung werden die Materialien der Wandstruktur aktiviert und leiden unter Versprödung. Bei Unfällen können nun Tritium und durch die Neutronenbestrahlung aktivierte Stäube – Abrieb- und Korrosionsmaterial von den Wänden – freigesetzt werden. Der bei einem Fusionsreaktor anfallende radioaktive Abfall wird durch die beschriebene Neutronenstrahlung verursacht. Er besteht vor allem aus dem Wandmaterial, welches durch Neutroneneinfang radioaktiv wird.

➤ Geschichte und gegenwärtige Entwicklung

Die Fusionsforschung begann bald nach dem zweiten Weltkrieg, die militärische Geheimhaltung wurde aber erst 1955 nach der Konferenz der Vereinten Nationen zur »friedlichen Nutzung der Kernenergie« von den verschiedenen Nationen aufgegeben und die weltweite wissenschaftliche Kooperation konnte beginnen. Bis zum Beginn dieser wissenschaftlichen Zusammenarbeit hatten sich bereits zwei verschiedene Konzepte entwickelt: der Tokamak in der Sowjetunion und der Stellarator in den USA.

Tokamak (die russische Abkürzung für toroidale Kammer in Magnetspule) ist zur Zeit das am weitesten entwickelte Konzept. Der größte Vorteil des Tokamak-Prinzips liegt in der relativ einfachen Form der Magneten. Der Tokamak ist ein rotationssymmetrischer Torus mit einem D-förmigen Querschnitt. Die Magnetfeldkomponente zum Verdrehen des Plasmastroms wird mittels Induktion im Plasma selbst erzeugt. Dieses Verdrehen des Plasmas wird notwendig, um die Abhängigkeit des Magnetfelds vom Radius auszugleichen. Diese Technik führt zu einem gepulsten Betrieb des Reaktors. Das Plasma in einem Tokamak kann sich parallel zur Oberfläche des Plasmas frei bewegen und ist normal auf diese eingesperrt. Der größte Tokamak ist zur Zeit der JET (Gemeinschaftlicher Europäischer Torus) in Culham UK. Sein Verhältnis von aufgewendeter zu erzeugter Energie ist mit 0,7 zu gering für den kommerziellen Einsatz. Das heißt, dass der Fusionsprozess 30% mehr Energie verbraucht als er erzeugt.

Ursprünglich wurde die Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Kernfusion durch die USA, die UdSSR, die EU und Japan gebildet. 1988 begannen die Arbeiten am Anlagenkonzept, 1998 folgten die Arbeiten am technischen Konzept, die 2001 abgeschlossen wurden. 650 Millionen US\$ kostete alleine der Nachweis der praktischen Durchführbarkeit des ITER-Designs. Mitte 2005 fiel die Standortwahl für ITER. Ein Teil der Vereinbarungen sieht im Zusammenhang mit der Entscheidung für einen europäischen Standort vor, dass Europa ein Fünftel seiner



© EFDA-JET (www.jet.efda.org)

Beschaffungen für den ITER in Japan tätigen und Japan ein Fünftel des Personals stellen wird. Im Juni 2007 hat die Russische Föderation als letzter Teilnehmer mit der Ratifikation der Verträge begonnen, welche die ITER-Organisation zu einer internationalen Rechtspersönlichkeit machen werden. Die nächsten geplanten Schritte sind die Baugenehmigung im Jahr 2008, gefolgt vom Baubeginn des eigentlichen Reaktors 2012 und schließlich dem ersten Plasma – das ist der erste Start des Reaktors – 2016.

Unter der Voraussetzung des Erfolgs von ITER – der eine thermische Leistung von 500MW haben soll – ist als der nächste Schritt für eine kommerzielle Nutzung der Fusionsenergie die Anlage DEMO geplant. Dieser soll der Prototyp des kommerziell nutzbaren Fusionsreaktors sein. Die Betreiber des ITER-Projekts hoffen mit den Erfahrungen aus ITER in der Lage zu sein, das Verhalten des etwa viermal größer geplanten DEMO hinreichend genau vorherzusagen zu können. Der ITER soll auch der Klärung wichtiger Materialfragen dienen.

➔ **Gelder, Kosten, Pläne**

Bis zum Ende der 1990-er Jahre hat die Europäische Union etwa 10 Milliarden Euro für den Bereich Plasmaphysik und Kernfusion zur Verfügung gestellt. Die geschätzten Kosten bis zur Fusion als verfügbare Energiequelle werden für Europa noch einmal etwa 20-30 Milliarden Euro betragen. Die folgende Zusammenstellung zeigt eine Übersicht über den gegenwärtigen Finanzierungsplan für das ITER-Projekt.

National Parties of ITER									
Procurment	Total	CN	EU	JA	KO	RF	US	IN	JF
Total (1000) IUA	3021	239	1064	496	241	223	236	241	341
Share (%)	100	8	35	16	8	7	7	8	11

Figure 2: Investment share of the ITER participants. (http://www.iter.org/a/index_nav_4.htm)

[CN = People's Republic of China, EU = European Union together with the Swiss Federation, JA = Japan, KO = Republic of Korea, RF = Russian Federation, US = United States of America, IN = Republic of India, JF = Joint funding. 1 IUA (ITER Units of Account) = 1000 US\$ at January 1989 values , 1 IUA is approximately 1400 euro in 2005 money]

Die Investitionssumme für ITER beträgt 2,755 kIUA. Der Rest der oben angegebenen Kosten wird in den ersten Jahren für Ersatzteile und den vollen Betrieb mit Deuterium und Tritium anfallen.

Die EU finanziert den ITER zur Zeit mit dem 7-ten Rahmenprogramm 2007-2011 unter dem Titel Fusionsenergie-Forschung. In dieser Periode werden 1,947 Milliarden Euro über EURATOM gedeckt.

Das Ziel des Forschungsprogramms mit Schwerpunkt ITER soll die Schaffung einer Basis für einen Prototypen und einen technisch und ökonomisch machbaren Reaktor unter Berücksichtigung der Sicherheit und des Umweltschutzes sein. Als wichtigsten Punkte führt die EU folgendes an:

- Vorbereitung des ITER-Standorts, Management, Unterstützung in Technik und Verwaltung.
- Vorbereitung im Bereich F&E, Grundlagen und Technikforschung, Untersuchung von Schlüsseltechnologien und Konsolidierung der ITER Projektentscheidungen sowie die Vorbereitungen für den Betrieb
- Technologische Vorbereitungen auf DEMO
- F&E Aktivitäten im Bereich der Langzeitperspektiven für den Magnetischen Einschluss sowie die Theorie und die Modellierung des Plasma-Verhaltens betreffend. Darüber hinaus sollen die Aktivitäten der Mitgliedstaaten in diesem Bereich koordiniert werden.
- Entwicklung der Humanressourcen durch Ausbildung und Training – nicht nur für die ITER-Aktivitäten, sondern auch für die weitere geplante Entwicklung der Kernfusion
- Technologietransfer

Die Frage, ob die Kernfusion ein ökonomisch sinnvoller Beitrag zur Energieversorgung wird leisten können, ist aus heutiger Sicht schwer zu beantworten, da einige Überlegungen berücksichtigt werden müssen.

Die Investitionskosten für die Errichtung eines Fusionsreaktors werden sehr hoch sein. Geschätzte Kosten für Fusionsreaktoren mit einer elektrischen Leistung von 1000 MW (das entspricht heutigen Kernkraftwerken) werden sich im Bereich von 5000 € pro installiertem kW bewegen [WARD 2002]. Die Liberalisierung im Energiesektor macht es immer unwahrscheinlicher, dass private Firmen die Risiken für so enorme Investitionskosten auf sich nehmen werden.

Die Kosten während der Laufzeit werden vor allem durch den notwendigen Austausch von Komponenten wie die dem Plasma nächstgelegenen Strukturen bestimmt, die von dem hohen Neutronenfluss betroffen sind. Dieser Komponententausch trägt mit etwa 10% zur Gesamtsumme bei und ist eine bedeutende Quelle für radioaktive Abfälle.

Die Kosten für den Brennstoff sind schwer abzuschätzen. Es ist aber anzunehmen, dass sie wie bei Kernkraftwerken nur gering zu den Gesamtkosten beitragen werden.

Die Dekommissionierung stellt neben dem Bau einen großen Kostenfaktor dar. Die durch Neutronenbestrahlung radioaktiv gewordenen Bauteile müssen gehandhabt und zum Teil über Jahrzehnte bis hin zu Jahrhunderten gelagert werden. Wie auch bei Kernkraftwerken ist das Problem des Abfalls ungelöst und scheint auch unlösbar zu sein.

Falls die Kernfusion tatsächlich eine verfügbare Energiequelle der zweiten Hälfte unseres Jahrhunderts sein wird, ist es schwer vorherzusagen, auf welches Energieumfeld sie treffen wird. Verschiedene Konzepte wurden in dieser Hinsicht betrachtet und haben Energiekosten zwischen 8 und 3.7 Euro ct/kWh ergeben. Diese Vorhersagen lassen den Schluss zu, dass die Fusionsenergie zum Zeitpunkt ihrer erhofften Markteinführung nicht konkurrenzfähiger sein wird, als es die Erneuerbaren Energien heute schon sind.



➔ **Die Hauptakteure der Kernfusion**

Die Volksrepublik China, Indien, Japan, die Vereinigten Staaten von Amerika, Südkorea, die Russische Föderation und die Europäische Union (inklusive der Schweizer Eidgenossenschaft) sind im November 2006 übereingekommen, das ITER-Projekt gemeinsam zu finanzieren. ITER selbst wird auf dem Gelände eines bestehenden Nuklearzentrums in Frankreich nahe Cadarache entstehen.

Die an ITER teilnehmenden Staaten sind zugleich auch jene, die in den vergangenen 70 Jahren die Forschung auf dem Gebiet der Kernfusion vorangetrieben und bestimmt haben. Die Erkenntnisse aus dem Projekt werden in erster Linie den teilnehmenden Staaten zur Verfügung stehen.

Eine Liste der für ITER arbeitenden Firmen ist auf der Webseite der ITER-Organisation zu finden (<http://www.iter.org/industry.htm>). Auch auf der Webseite des Europäischen Teils der ITER-Organisation findet sich eine Liste der potenziell interessierten Unternehmen (<https://www.efda.org/eidi/>). Naturgemäß ist ein Projekt wie der ITER für Unternehmen aus vielen Branchen interessant, von Bauunternehmen über Schwerindustrie bis zu Komponentenherstellern für Kernkraftwerke.

Unsicherheiten und Risiken

➔ **Verbreitung (Proliferation) waffenfähiger Materialien**

Fusionsreaktoren sind nicht proliferationsresistent, da sie sich als Neutronenquelle zur Erbrütung waffenfähiger Materialien eignen. Unter der Voraussetzung von adäquaten Kontrollen sind solche Aktivitäten leicht festzustellen. [LIEBERT] »Fusionsreaktoren stellen ein geringeres Proliferationsrisiko als Kernreaktoren dar, vor allem für 'Schurkenstaaten' oder nicht-staatliche Terrorgruppen sind sie nur eingeschränkt nutzbar.« Dennoch kann innerhalb eines bestehenden Waffenprogramms das vorhandene Tritium in fortgeschrittenen Atomwaffen genutzt werden. Tritium wird verwendet, um die Explosion einer Atombombe zu verstärken (sog. Wasserstoffbombe), was die Leistung der Nuklearwaffe vervielfachen kann.

➔ Radioaktiver Abfall

Auf Grund der Neutronenstrahlung des Fusionsprozesses werden Wandmaterialien aktiviert. Die Art der zu erwartenden radioaktiven Isotope ist somit von den verwendeten Materialien abhängig. Für die technischen Rahmenbedingungen von ITER wird das radiotoxische Potential zu Beginn der Dekommissionierungsarbeiten auf 10 Milliarden Sievert (Sv) geschätzt. Analysen zeigen einen Rückgang auf 10 Millionen Sv nach einer Wartezeit von 100 Jahren [ITER-WASTE]. Trotz dieses starken Rückgangs muss man davon ausgehen, dass ein Teil des Strukturmaterials hochaktiven Müll darstellt und daher über sehr lange Zeiträume sicher gelagert werden muss. Die radioaktiven Elemente mit längeren Halbwertszeiten werden im Bereich der Übergangsmetalle erwartet. Die dem Plasma am nächstgelegenen Komponenten werden zum größten Teil aus Beryllium, Kohlenstoff und Wolfram bestehen. Wenn auch der Anteil an hoch radioaktiven Material geringer sein wird, so könnte das Volumen des gesamten anfallenden Abfalls etwa doppelt so groß wie bei Kernkraftwerken sein.

➔ Gefahren durch Strahlung

Tritium ist ein radioaktives Isotop des Wasserstoffs mit einer Halbwertszeit von 12,32 Jahren. Es zerfällt unter Aussendung niederenergetischer Betastrahlung. Das Tritium in einem hypothetischen Fusionsreaktor wird die Menge von einigen Kilogramm erreichen. Der größte Teil davon werden Lagerbestände sein. Für ITER beträgt das Maximum an mobilisierbarem Tritium im Reaktorsystem weniger als 500g. Diese Menge stellt eine Aktivität von etwa 10^{17} Bq dar. Im Normalbetrieb gibt die Anlage kleine Mengen an Tritium an die Umgebung ab. Bei einem Unfall besteht die Gefahr, dass größere Mengen des vorhandenen Tritiuminventars freigesetzt werden.

Tritium ist vor allem auf Grund seiner großen Mobilität und der vielen möglichen Aufnahmewege gefährlich. Tritium kann Wasserstoffatome in Wasser und organischen Verbindungen ersetzen. Tritium stellt außerhalb des Körpers ein geringes Risiko dar und hat als Gas keine große Wahrscheinlichkeit, in der Lunge absorbiert zu werden.

Die biologische Halbwertszeit von im Körper aufgenommenem Tritium beträgt etwa 10 Tage. Allerdings gibt es Hinweise, dass Tritium als Bestandteil organischer Moleküle eine Verweildauer bis zu etwa 500 Tagen im Körper haben kann. Nach Rosalie Bertell ist die biologische Wirkung von Tritium höher als für vergleichbare Betastrahler dieser Energie angesetzt wird. Tritium erhöht die Gefahr von Krebserkrankungen und anderen Gesundheitsproblemen wie Totgeburten und Geburtsdefekten, auch wenn dieser Umstand bisweilen von der Internationalen Kommission für Strahlenschutz (ICRP) ignoriert wird. Das Risiko der Fruchtschädigung ist etwa sechs mal höher als das Risiko von Krebserkrankungen.

➔ Unfälle

Die Arbeitsgruppe der EU für Sicherheits- und Umweltaspekte der Kernfusion kam zu dem Schluss, dass interne Unfälle (z. B. Kühlmittelverlust) eine Dosis zur Folge haben würden, die unter den Evakuierungslimits der EU liegt.

Die Konsequenzen aus externen Ereignissen wie Erdbeben oder Sabotageakte führen Schätzungen zu Folge zu einer maximalen Dosis von 400 mSv für Außenstehende und würden in diesem Fall zu Evakuierungen in der nahen Umgebung des Reaktors führen. Angesichts der fehlenden Erfahrung ist die Vorhersage der tatsächlichen Auswirkungen schwierig und unsicher.

Der überwiegende Teil der aktivierten Materialien ist in der metallischen Struktur des Reaktors gebunden. Trotzdem gibt es auch einen Teil der durch Korrosion und Abrieb mobilisiert ist. Dieser Teil wird im Normalbetrieb in kleinen Mengen freigesetzt und stellt in Unfallszenarien eine mögliche Freisetzungquelle in größerem Umfang dar.

Für den Fusionsreaktor stellt mobilisiertes Wolfram wegen der möglichen Erzeugung von Wasserstoff unter erhöhten Temperaturbedingungen ein Risiko dar. Aus Sicherheitsgründen wird es notwendig sein, die Menge im Reaktorgefäß zu limitieren, um Wasserstoffexplosionen bei Wassereintritt zu vermeiden.

➔ **Brennstoff**

Für die Tritium – Deuterium – Fusion sind die beiden schweren Wasserstoffisotope notwendig. Deuterium kann aus Seewasser durch Elektrolyse-Kaskaden gewonnen werden. Zur Bereitstellung von Tritium benötigt man Lithium. Lithium kann ebenfalls aus Seewasser gewonnen werden, des weiteren kommt es zu 0.002% in der Erdkruste vor. Aus der Erdkruste kann es bergmännisch gewonnen werden, dies bedingt die aus dem Bergbau bekannten üblichen Umweltschäden.

➔ **Wirtschaftlichkeit der Fusion**

Die Möglichkeit der Zukunft für Fusionskraftwerke wird von ihrer Sicherheit, den Umweltauswirkungen und der ökonomischen Wettbewerbsfähigkeit abhängen. In jedem Fall bestehen große Unsicherheiten in vielen Bereichen wie zum Beispiel Annahmen über zukünftiges Kraftwerksdesign und zukünftige Materialien. Es ist daher unmöglich, eine genaue Abschätzung des zukünftigen Ressourcenbedarfs zu geben, der alle Kosten von der zur Entwicklung, der wissenschaftlichen Forschung bis zur technischen oder wirtschaftlichen Realisierung der Kernfusion erfassen würde. Das Ziel der Fusionsgemeinschaft ist in jedem Fall die Realisierung von ITER und in der Folge von DEMO bis 2050.

Eine große Herausforderung für die Realisierung der wirtschaftlich verwendbaren Kernfusion ist die Entwicklung geeigneter Strukturmaterialien für den Reaktor. Gerade dieser Bereich braucht geeignete Testeinrichtungen, die ITER unter Umständen nicht vollständig erfüllen kann. Die Errichtung eines zusätzlichen Materialprüfzentrums kann sich in der Folge als notwendig erweisen.

Die Marktreife für Fusionsreaktoren mit 2050 ist eine sehr optimistische Einschätzung. Betrachtet man die Vergangenheit der Fusionsforschung oder anderer vergleichbar aufwendiger Technologien so sieht man, dass Verzögerungen durch unvorhersehbare Schwierigkeiten oder Fehleinschätzungen sehr wahrscheinlich sind.

Für die Versorgung der Energiebedürfnisse der Entwicklungsländer ist die Kernfusion auf Grund der hohen Investmentkosten, der notwendigen Infrastruktur und der notwendigen fachlichen Grundlagen nur von geringem Nutzen.

Soweit man den Preis für eine 2050 vielleicht verfügbare Technologie überhaupt abschätzen kann, rechnen Studien mit etwa 5000 € pro installiertem kW. Solche Investitionen sind aus heutiger Sicht – wenn überhaupt – nur bei stabil hohen Energiepreisen oder mit staatlichen Garantien wirtschaftlich darstellbar. Da man davon ausgehen darf, dass sich die Wettbewerbsfähigkeit der erneuerbaren Energieträger durch technischen Fortschritt und Marktentwicklung ähnlich wie in der Vergangenheit entwickeln wird, so sieht man, dass Kernfusion eine teure Form der Energieerzeugung sein wird, selbst wenn man die Kosten für Forschung und Entwicklung seit den 1950er Jahren nicht in diese Rechnung einbezieht.



Schlussfolgerungen & Ausblick

Die Atomindustrie versucht aus jeder Energiekrise das Beste für sich zu machen und das als Marketingstrategie anzuwenden. Verknappung und Unsicherheit der Energieversorgung sind Argumente für weitere Forschungsgelder für die Atomtechnologie: von der Ölkrise 1990 (Golfkrieg) bis zu Hurrikan Katrina, oder die Gaskrise aufgrund des Konflikts zwischen Ukraine und Russland, bis zu den wiederkehrenden Peak-Oil Warnungen der IEA und der Bedrohung durch den Klimawandel. Atomenergie wird als Antwort präsentiert und gleichzeitig wird behauptet, dass die altbekannten Probleme der Atomenergie überwunden seien. Die Antwort sollen die neuen Reaktorsysteme basierend auf Kernspaltung plus Wiederaufbereitung unter der Bezeichnung Generation IV und – wirklich neu – Fusionsreaktoren sein.

Generation IV

Forschungseinrichtungen und Entwicklungsabteilungen der Nuklearfirmen hoffen neue Forschungsgelder für Konzepte zu bekommen, die vor Jahren entwickelt wurden, aber in den letzten 30 Jahren nur mit geringem Erfolg realisiert wurden [WENISCH et PRAUHART 2006]. So sind die Brutreaktoren der Generation IV eine Neuauflage der meist stillgelegten Schnellen Brüten, was eine Fortsetzung der Plutoniumwirtschaft in einem noch nie gesehenen Umfang bedeuten würde. In Betracht gezogen und beforscht wird auch der Einsatz von Thoriumbrennstoff. Das würde eine Fortsetzung der Hochtemperaturreaktoren – Konzepte bedeuten, wie sie in den 1970er Jahren zum ersten Mal in Deutschland betrieben wurden. Der HTR in Hamm erreichte niemals stabile Betriebsbedingungen bis er zwanzig Jahre später endgültig still gelegt wurden. Nur ein sehr kleiner Reaktor dieses Typs ist heute noch in Betrieb – in China.

Die Atomindustrie möchte sich als Teil der Lösung des Energieproblems verkaufen: Mit neuen Reaktoren, neuen Brennstoffzyklen und – last but not least – indem sie der Welt eine praktisch unerschöpfliche Energiequelle zur Verfügung stellt: die Kernfusion.

Während der mehr als 50 Jahre von Forschung, Errichtung und Betrieb von nuklearen Anlagen, hat die Atomindustrie eine Reihe ungelöster Probleme (Sicherheit von Nuklearanlagen, Atommüll, radioaktive Ableitungen etc.) hervorgebracht. Ungeachtet dessen versucht sie weitere staatliche Förderungen und Unterstützung zu erhalten, mit dem Anspruch, dass die Zukunft der Atomenergie besser werden würde als ihre Vergangenheit.

➤ **Die Behauptung**

Unter der Bezeichnung Generation IV Reaktorkonzepte verspricht die Nuklearindustrie neue Systeme als Antwort auf die Verknappung von Spaltmaterial (Uran), wie auch die Probleme der Proliferation und die Notwendigkeit von Endlagern für den hochradioaktiven Müll.

➤ **Die Realität**

Die Reaktorsysteme der Generation IV bestehen aus Reaktoren zur Stromproduktion und Wiederaufbereitungsanlagen. Teil des Systems sind auch Plutoniumbrüter, die einerseits Strom generieren und gleichzeitig neues Plutonium »erbrüten«. Die Wiederaufbereitung trennt dann das Spaltmaterial vom abgebrannten Brennstoff für die Wiederverwendung als MOX-Brennstoff. Dieses »Recycling« erzeugt neuen Atommüll.

Große Mengen an hoch toxischem Material wie Plutonium- und Uranisotope würden rund um den Erdball transportiert wie etwa Erdöl oder Kohle und würden neben dem erheblichen Unfallrisiko auch ein potentielles Ziel für Sabotage und Terror darstellen.

Darüber hinaus würden die Reaktorsysteme der Generation IV vermutlich die Möglichkeiten vervielfachen Spaltmaterial abzuzweigen. Die für eine nukleare Explosion benötigte Menge

ist gering: zwischen 10 und 50 kg $^{235}\text{Uran}$ oder 5 kg $^{238}\text{Plutonium}$, je nach Bauart der Waffe. Das Bestreben der Nuklearindustrie mehr und mehr Nuklearanlagen zu errichten und Spaltmaterial zur friedlichen Nutzung bereit zu stellen, wird vermutlich die Bemühungen der IAEO im Bereich der Nichtweiterverbreitung zunichte machen.

Die neuen Reaktoren sollten einfachere und somit kostengünstigere Designs haben. Das Gegenteil ist der Fall: aufgrund der extremen Verhältnisse unter denen diese Reaktoren arbeiten (extrem hohe Temperaturen, Drücke etc.), benötigen die Reaktoren der Generation IV noch komplexere Sicherheitssysteme.

Allgemein wird davon ausgegangen, dass diese Reaktoren nicht vor dem Jahre 2030 kommerziell einsetzbar sein werden, und darüber hinaus gibt es keine Anzeichen, dass die Generation IV die Atomenergie aus der Liga der teuersten Energieformen katapultieren würde.



Fusion

Fusion ist die zweite Nukleartechnologie, die die Welt mit einer nachhaltigen Energieform versorgen soll. Bei der Fusion handelt es sich um ein relativ neues Forschungsgebiet. Die Entwicklung begann in den 50er Jahren und musste sich vor allem mit den Eigenschaften des Plasmas befassen, große wissenschaftliche Fortschritte wurden in diesem Bereich erzielt. Heute sind die Hindernisse am Wege zum Fusionsreaktor nicht mehr grundlegende Fragen, sondern Probleme der Konstruktion und technischen Lösungen. Die Fusionsforschung in Europa hat ihren Schwerpunkt beim ITER-Projekt. Dieses wird über das 7. Forschungsrahmenprogramm von EURATOM mit 1.947 Milliarden Euro finanziert. Nach Fertigbau der ITER-Anlage ist der nächste Schritt der Nachweises, dass ein selbst erhaltender Fusionsprozess erreicht werden kann (bis 2017). Ein weiterer Schritt zur kommerziellen Realisierung des Fusionsreaktors ist der Bau von DEMO, einem Demonstrations-Fusionsreaktor, der bereits Strom erzeugen sollte.

➔ **Die Behauptung**

Vorbereitungen für die Errichtung eines kommerziellen Fusionsreaktors sind 2050 abgeschlossen.

➔ **Die Realität**

Wenn 2050 auch noch weite Zukunft zu sein scheint, so handelt es sich doch um einen optimistischen Zeitplan. In der fünfzig jährigen Geschichte der Fusionsforschung wurden die Schwierigkeiten bei der Entwicklung von Fusionsreaktoren immer wieder unterschätzt und der Zeitpunkt für die Realisierung musste wiederholt verschoben werden.

Die Fusionstechnologie mag gegenüber dem üblichen Kernspaltungsreaktoren gewisse Vorteile haben, es ist allerdings nicht wahr, dass sie proliferationssicher wäre: Auch ein Fusionsreaktor kann zum Erbrüten von waffenfähigem Plutonium verwendet werden. Die

Dekommissionierung der Fusionsanlage erzeugt Atommüll, der sehr lange gelagert werden muss.

Die Realisierung von Fusionsreaktoren ist vom Sicherheitsniveau, den Umweltauswirkungen und der Wirtschaftlichkeit abhängig. Diese Faktoren sind schwer prognostizierbar, denn sie hängen von einer Reihe von Annahmen betreffend Bauweise und zukünftige Strukturmaterialien ab, auch weil überraschende Entwicklungen während der Forschungsarbeiten nicht ausgeschlossen werden können. Eine besonders große Herausforderung ist die technische Realisierung eines Materials, das eine gute Abschirmung gegen die Neutronenstrahlung bietet und dabei keiner schnellen Degradierung aufgrund der Aktivierung unterworfen ist. Das könnte sogar die Einrichtung neuer Testanlagen benötigen, bevor eine Lösung gefunden werden kann.

Die Fusionsreaktoren werden nicht rechtzeitig zur Verfügung stehen um zu den CO₂ Reduktionen beitragen zu können. Selbst wenn sie dann einsatzbereit sein sollten, so werden sie aufgrund der sehr hohen Investitionskosten nur eingeschränkt genutzt werden können.

Empfehlungen

Wenn es in der Energiepolitik darum geht die nächsten Schritte festzulegen, so sind natürlich Zeit und Geld die Schlüsselfragen. Angesichts der langfristigen Planungshorizonte, langen Bauzeiten von Kernkraftwerken und hohen Investitionskosten, sind staatliche Förderungen für die Forschung und Entwicklung bzw. die eigentliche Errichtung und Betrieb nicht gerechtfertigt.

Durchschnittlich betragen die Baukosten pro kW Nennleistung eines KKW das Doppelte von einem Kohlekraftwerk und das Vierfache von einem Gaskraftwerk. Außerdem dauert die Errichtung eines KKW 5 – 10 Jahre, die eines Gaskraftwerks 3 Jahre, einer Windfarm 6 Monate. Nach 60 Jahren Entwicklungsarbeit mit Hilfe staatlicher Förderungen in mehreren großen Ländern, ist es nicht gelungen, die Kosten von Atomkraft wesentlich zu verringern. Und noch immer ist es so, dass ein heute errichtetes KKW ohne staatliche Unterstützung auf einigen Ebenen (z. B. das aktuelle finanzielle »Initiativenpaket« der US-Regierung für die ersten neuen KKW) nicht möglich ist.

Die Prognosen für erneuerbare Energien versprechen eine Kostenreduktion, da die Anlagen verbessert und in größerer Anzahl erzeugt werden. Die Faustformel besagt, dass bei jeder Produktionsverdopplung die Kosten der Erneuerbaren um 20% geringer werden. [FROGATT-2 2006]

Eine Investition in die teurere Option bedeutet somit auch, dass pro investiertem Euro weniger Kohlenstoff ersetzt wird. Diese Opportunitätskosten sind eine unvermeidbare Folge, wenn man sich nicht für die Least-Cost-Option entscheidet, denn die Regeln der wirtschaftlichen Prioritätensetzung gelten auch für den Umweltschutz. [LOVINS 2006]

Die Energiepolitik ist in einer entscheidenden Phase. Die Entscheidung ob Atomenergie Teil einer nachhaltigen Zukunft sein soll, muss jetzt gefällt werden. Da nicht mehr viel Zeit zur Verfügung steht um neue technische Lösungen zu entwickeln, wäre es wesentlich effizienter im Sinne der Vermeidung weiterer Temperaturerhöhung die bestehenden Technologien einzusetzen und eventuell zu verbessern: **Erhöhung der Energieeffizienz und erneuerbare Energiequellen sind eine sichere und kostengünstige Lösung.**

Unser Wirtschaftswachstum ging mit einer deutlichen Reduktion der Energieintensität einher. Ohne diese Erhöhung der Energieeffizienz wären etwa doppelt so viel fossile Brennstoffe zusätzlich verbraucht worden. Durch Verbesserung der Effizienz der Energieumwandlung und Strukturänderungen beim Energieverbrauch wurde der Beitrag von Atomenergie und Erneuerbaren deutlich übertroffen.



© EFDA-JET (www.jet.efda.org)

Die Realisierung von »Negajoules« (Energieeinsparungen und Energieeffizienzerhöhungen) stellt weltweit die größte Energiequelle dar, mit gleichzeitig dem geringsten CO₂-Äquivalent/kWh. Die Minimierung des Energiebedarfs ist eine Voraussetzung für eine nachhaltige Energieversorgung mit Erneuerbaren. Anstatt Import von Öl, Gas oder Biomasse soll ein nachhaltiges Energiesystem auf regionalen Energiequellen aufbauen [FROGGATT-1 2006].

Die großen Player im Stromgeschäft (Vattenfall, ENEL, RWE und E.ON) verhindern den Einsatz regionaler Energieerzeugung in verschiedenen kleineren Kraftwerken. Sie bevorzugen die Errichtung großer Kraftwerke (und schrecken dabei auch vor schmutziger Braunkohle nicht zurück) und diktieren diese Vorlieben den Regierungen. Die großen Energieversorger haben kein Interesse an einer Modernisierung und Verbesserung der Stromnetze oder der Einspeisung regionaler Stromerzeuger in das Netz. Ebenso wenig möchten sie die Kontrolle über die regionale Infrastruktur an die örtliche Verwaltung abgeben. Große Energieversorger bevorzugen große Kraftwerke wie etwa den Schnellen Brüter, KKW wie den EPR oder gar den Fusionsreaktor mit Leistung weit über 1000 MW um ihre Monopole im Strommarkt aufrecht zu erhalten. Da Strom nun auch über die Strombörsen gehandelt wird, können sie durch die Abschaltung von Kraftwerken Stromknappheit und somit hohe Preise durchsetzen. Viele kleine Netze mit regionaler Einspeisung aus erneuerbaren Quellen würden mehr Macht den Konsumenten geben und könnten gleichzeitig Teil des größeren nationalen Netzes werden, in das dann Überschuss eingespeist werden könnte. Mehr Unabhängigkeit (z.B. bei Stromausfall im deutschen Netz) könnten lokale Netze erreichen, wenn sie auch im Inselbetrieb arbeiten könnten.

Eine deutliche Reduktion des Energieverbrauchs ist Voraussetzung für eine nachhaltige Energieversorgung in der Zukunft: z.B. Wärmedämmung für Gebäude und effizienter Energieeinsatz für Heizen, Beleuchtung und natürlich in Transport und Verkehr.

Dazu muss dringend und klar eine politische Entscheidung für Energieeffizienz getroffen werden. Um die stärksten Auswirkungen des Klimawandels zu verhindern, muss die Politik unabhängig von den kurzfristigen Firmeninteressen werden, die Energie oder energiefressende Produkte verkaufen. Das Ziel ist ein nachhaltiges Energiesystem auf der Grundlage erneuerbarer Energien.

Gasgekühlter schneller Reaktor (GFR)

Brutreakortyp für die Bereitstellung von elektrischer Energie, Wasserstoff und Prozesswärme und für das Erbrüten von Spaltstoff

Charakteristika

- Spaltstoff: Uran-Plutoniumcarbid
- Kühlmittel: Helium
- Brutreaktor
- Schnelle Neutronen
- Leistung: 600 MWth
- Kühlmittelaustrittstemperatur: 850°C
- Abbrand: 50 GWd/tHM
- Leistungsdichte: 100 MWth/m³

Risiken und Schwierigkeiten

- Reduzierte Regelbarkeit wegen geringer thermischer Trägheit
- Werkstoffe müssen Beschädigungen durch schnelle Neutronen und Höchsttemperaturen bis zu 1600°C widerstehen
- Extreme Bedingungen (Druck, Temperatur)
- Hohe Nachzerfallswärme
- Signifikant hohe Leistungsdichte
- Proliferation

Bleigekühlter schneller Reaktor (LFR)

Brutreakortyp für die Verarbeitung von hochradioaktivem Abfall und für das Erbrüten von Spaltstoff

Charakteristika

- Spaltstoff: Mischung aus Uran, Plutonium und anderen Aktinoiden
- Kühlmittel: Blei oder Blei-Wismuth
- Brutreaktor
- Schnelle Neutronen
- Leistung: bis zu 3600 MWth
- Kühlmittelaustrittstemperatur: 800°C
- Abbrand: bis zu 150 GWd/tHM
- Spaltstoffbeladungszyklus: 30 Jahre

Risiken und Schwierigkeiten

- Inkompatibilität der Nitridmatrix mit dem Brennelementhüllenwerkstoff
- Werkstoffe müssen Beschädigungen durch schnelle Neutronen widerstehen
- Extreme Bedingungen (Temperatur, Abbrand)
- Zusätzliches Umweltrisiko durch Verwendung von Blei als Kühlmittel
- Weniger Beladungszyklen = weniger Service- und Reparaturmöglichkeit
- Proliferation

Natriumgekühlter schneller Reaktor (SFR)

Brutreakortyp für die Verarbeitung von hochradioaktivem Abfall und für das Erbrüten von Spaltstoff

Charakteristika

- Spaltstoff: Mischung aus Uran, Plutonium und anderen Aktinoiden
- Kühlmittel: Natrium
- Brutreaktor
- Schnelle Neutronen
- Leistung: bis zu 5000 MW_{th}
- Kühlmittelaustrittstemperatur: 550°C
- Abbrand: 200 GWd/t_{HM}
- Leistungsdichte: 350 MW_{th}/m³

Risiken und Schwierigkeiten

- Natrium brennt an Luft und reagiert auch mit Wasser sehr heftig
- Korrosionsverhalten
- Wartungsarbeiten am mit flüssigem Natrium gefüllten Kühlsystem
- Werkstoffe müssen Beschädigungen durch schnelle Neutronen widerstehen
- Extreme Bedingungen (Temperatur, Leistungsdichte, Abbrand)
- Wiederaufbereitung im Kraftwerk

Salzschmelze Reaktor (MSR)

Reaktortyp, der die Spaltstoffbeladung, Wiederaufbereitung und Abfallabtrennung ohne Betriebsunterbrechung ermöglichen soll

Charakteristika

- Spaltstoff: Uran- / Plutoniumfluorid
- Kühlmittel: wie Spaltstoff
- Thermische (langsame) Neutronen
- Leistung: 1000 MW_{th}
- Kühlmittelaustrittstemperatur: 850°C
- Zugabe von Aktinoiden zur Schmelze zwecks Vernichtung von Nuklearabfall
- Keine Betriebsunterbrechungen für Spaltstoffbeladung

Risiken und Schwierigkeiten

- Chemie und Verhalten der Schmelze
- Löslichkeit der Aktinoiden in flüssigem Fluorid
- Inkompatibilität der Schmelze mit den Strukturwerkstoffen
- Extreme Bedingungen (Temperatur)
- Ansammlung von Metall in den Wärmetauschern
- Keine Beladungszyklen = weniger Service- und Reparaturmöglichkeit
- Proliferation

Wassergekühlter Reaktor mit überkritischen Dampfzuständen (SCWR)

Vereinfachter Reaktortyp, der Elektrizität zu niedrigen Kosten bereitstellen soll

Charakteristika

- Spaltstoff: Urandioxid
- Kühlmittel: Superkritisches Wasser
- Thermische (langsame) Neutronen
- Leistung: 1700 MW_{th}
- Kühlmittelaustrittstemperatur: 510°C
- Abbrand: 45 GWd/t_{HM}
- Leistungsdichte: 100 MW_{th}/m³

Risiken und Schwierigkeiten

- Einphasen-Kühlmittel unter superkritischen Bedingungen (Wasser über 374°C und 22,1 MPa)
- Billigreaktor: Vereinfachungen des Reaktors auf Kosten der Sicherheit (kleineres Kühlsystem soll Kosten reduzieren, wodurch aber im Falle eines Unfalls weniger Kühlmittel zur Verfügung steht)
- Direktkreislauf für ein kompakteres Containment
- Proliferation

Gasgekühlter Höchsttemperatur-Reaktor (VHTR)

Weiterentwicklung des THTR Reaktortyps, mit extremen Kühlmittelaustrittstemperaturen bis zu 1000°C für die Bereitstellung von Elektrizität, Wasserstoff und Prozesswärme

Charakteristika

- Spaltstoff: Zirkoniumcarbid-beschichtete Brennstäbe oder Kugeln (Spaltstoff z.B. Thorium)
- Kühlmittel: Helium
- Thermische (langsame) Neutronen
- Leistung: 600 MW_{th}
- Kühlmittelaustrittstemperatur: 1000°C
- Abbrand: 200 GWd/t_{HM}
- Leistungsdichte: 10 MW_{th}/m³

Risiken und Schwierigkeiten

- Spaltstoff und Werkstoffverhalten unter extremen Bedingungen (Temperatur, Abbrand)
- Direktkreislauf für Bereitstellung von Elektrizität; indirekter Kreislauf für zusätzliche Bereitstellung von Prozesswärme
- Ungewollte Leistungs- und Temperaturspitzen
- Entwicklung einer Hochtemperatur-Heliumturbine
- Proliferation

Stellarator

Fusionsreakortyp, dessen Design einen durchgehenden Betrieb ermöglichen soll

Charakteristika

- Fusionsreaktor
- Brennstoff: Deuterium, Tritium
- Einschließendes Magnetfeld mit inhärenter Eigenschaft
- Durchgehender Betrieb
- Leistung: 2000 MWth

Risiken und Schwierigkeiten

- Generelle technische Umsetzbarkeit
- Hohe Investitionskosten und extrem lange Entwicklungszeit (~50 Jahre)
- Sehr kleine Toleranz für alle Komponenten bei Herstellung und Zusammenbau
- Versprödung des Strukturmaterials wegen des hohen Neutronenflusses
- Mögliche Neutronquelle für Erbrüten von waffenfähigen Materialien
- Proliferation von Tritium

Tokamak

Am weitesten entwickelter Fusionsreakortyp, welcher aber dennoch nicht vor 2050 zur Verfügung stehen wird

Charakteristika

- Fusionsreaktor
- Brennstoff: Deuterium, Tritium
- Teile des Magnetfelds durch Induktion in das Plasma
- Gepulster Betrieb
- Leistung: 2000 MWth

Risiken und Schwierigkeiten

- Generelle technische Umsetzbarkeit
- Hohe Investitionskosten und extrem lange Entwicklungszeit (~50 Jahre)
- Versprödung des Strukturmaterials wegen hohem Neutronenfluss
- Mögliche Neutronquelle für Erbrüten von waffenfähigen Materialien
- Proliferation von Tritium

- [**BERTELL 2005**]: Bertell, R. (2005): »Health Effects of Tritium«
<http://www.iicph.org/docs/health-effects-of-tritium>
- [**BOSSEW 1993**]: Bossew, P.; Fink, U.; Mraz, G.; Neumann, W.; Panten, T.; Schreiber, H.; Wensch, A. (1993): »The International Atomic Energy Agency – A Critical Documentation of the Agency's Policy«
- [**COOK et al 2001**]: Cook, I.; Marbach, G.; Di Pace, L.; Girard, C.; Taylor, N. P. (2001): »Safety and Environmental Impact of Fusion«, European Fusion Development Agreement (EFDA) Report Nr. EFDA-S-RE-1
- [**DOE 1991**]: US Department of Energy (1991): »Handbook Tritium Handling and Safe Storage« DOE-HDBK-11290 p. 5
- [**DOE 1998**]: US Department of Energy (1998): Glossary, Washington, DC
- [**EURATOM 2004**]: »Euratom Forschungs- und Ausbildungsprogramm auf dem Gebiet der Kernenergie (2002-2006), Arbeitsprogramm 2004« <http://cordis.europa.eu/fp6-euratom/nutech.htm>
- [**EUROPÄISCHE KOMMISSION 2007**]: Europäische Kommission (2007): »Die Europäer und die Nukleare Sicherheit« Eurobarometer Spezial 271 / Welle 66.2 – TNS opinion & social, http://ec.europa.eu/public_opinion/archives/ebs/ebs_271_de.pdf
- [**FAIRLIE 1992**]: Fairlie, I. (1992): »Tritium, the Overlooked Nuclear Hazard« from »The Ecologist«, sep.-oct. 1992, pp. 228-32
- [**FROGGATT-1 2006**]: Froggatt, A. (2007): »Nuclear Energy and the Kyoto Protocol in Perspective« in [Lebensministerium 2007] p. 187-199
- [**FROGGATT-2 2006**]: Froggatt, A. (2007): »Nuclear Energy – The Economic Perspective« in [Lebensministerium 2007] p. 201-215
- [**HIRSCH et WEISH 2007**]: Hirsch, H.; Weish, P. (2007): »Umweltbelastung durch den Kernenergiezyklus bei Normalbetrieb« in [LEBENSMINISTERIUM 2007] p. 47-57
- [**HIRSCH 2007**]: Hirsch, H. (2007): »Radioaktive Abfälle« in [LEBENSMINISTERIUM 2007] p. 103-118
- [**HIRSCH et al 2005**]: Hirsch, H.; Becker, O.; Schneider, M.; Froggatt, A. (2005): »Nuclear Reactor Hazards – Ongoing Dangers of Operating Nuclear Technology in the 21st Century«, report prepared for Greenpeace International
- [**IAEA PRIS 2007**]: International Atomic Energy Agency – Power Reactor Information System: www.iaea.org/programmes/a2
- [**IEA 2007**]: International Energy Agency (2007): »Medium-Term Oil Market Report (MTOMR)«
- [**ITER**]: ITER Internationaler Thermonuklearer Experimenteller Reaktor:
http://www.iter.org/a/index_nav_4.htm
- [**ITER-WASTE**]: <http://www.iter.org/safety-waste.htm>
- [**KAKODKAR et al 2006**]: Kakodkar, A.; Sinha, R. K. (2006): »The Twin Challenges of Abundant Nuclear Energy Supply and Proliferation Risk Reduction – a View« Presentation at the 50th IAEA General Conference, Vienna

- [**KREUSCH et al 2006**]: Kreusch, J.; Neumann, W.; Appel, D.; Diehl, P. (2006): »Nuclear Fuel Cycle, Nuclear Issues Paper No. 3« aus »Nuclear Power: Myth and Reality«, Heinrich Böll Stiftung
- [**LIEBERT 2001**]: Liebert, W. (2001): »Erste Antworten zur Fragenliste zur parlamentarischen Anhörung Kernfusion am 28.03.2001« Deutscher Bundestag, Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung, A - Drs. 14-383f, Berlin
- [**LEBENSMINISTERIUM 2007**]: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2007): »Kernenergie, Klimaschutz und Nachhaltigkeit. Ein Argumentarium des Forum für Atomfragen« <http://www.lebensministerium.at/filemanager/download/20556/>
- [**LOVINS 2006**]: Lovins, A. B. (2006): »Nuclear Power: Economics and Climate-Protection Potential«, Rocky Mountain Institute
- [**MIT 2003**]: Deutch, J.; Moniz, E. J.; Ansolabehere, S.; Driscoll, M.; Gray, P. E.; Holdren, J. P.; Joskow, P. L.; Lester, R. K.; Todreas, N. E. (2003): »The Future of Nuclear Power« Massachusetts Institute of Technology
- [**NERAC 2002**]: »A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems«, US DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee (NERAC) und Generation IV International Forum (GIF), 2002 <http://gif.inel.gov/roadmap>
- [**OEKO 2007**]: Fritsche, U. et al (2007): »Treibhausgasemissionen und Vermeidungskosten der nuklearen, fossilen und erneuerbaren Strombereitstellung – Arbeitspapier«, Öko-Institut e. V., Darmstadt
- [**POSTNOTE 2003**]: »Postnote 2003 No. 192«, UK Parliamentary Office of Science and Technology www.parliament.uk/post/home.htm
- [**SHOLLY 2007**]: Sholly S. C. (2007): »Möglichkeiten nuklearer Proliferation durch die Nutzung kommerzieller Kernkraftwerke« in [**LEBENSMINISTERIUM 2007**] p. 155-178
- [**SCHULENBERG 2004**]: Schulenberg, T.; Behnke, L.; Hofmeister, J.; Löwenberg, M. (2004): »Was ist Generation IV?« Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, FZKA 6967, Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft
- [**TAB 2002**]: Grunwald, A.; Grünwald, R.; Oertel, D.; Paschen, H. (2002): »Arbeitsbericht 75«, p. 27-30, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag
- [**WARD 2002**]: Ward, D. J. (2002): »Assessment of Economics of PPCS Plant Models A and B«, PPCS/UKAEA/PPCS6-2, EURATOM/UKAEA Fusion Association
- [**WEISH 2007**]: Weish, P. (2007): »Zur Einstimmung: Energiewende – vom Öl zur Sonne« in [**LEBENSMINISTERIUM 2007**] p. 23-29
- [**WENISCH 2006**]: Wenisch, A. (2006): »Wege zur Bombe. Was Atomenergie und Atombombe mit einander zu tun haben« aus Koryphäe 40/06, p. 28-32
- [**WENISCH et PRAUHART 2006**]: Wenisch, A.; Prauhart, N. (2006): »Die Renaissance der Kernenergie – Wunschtraum der Atomlobby oder Realität?« aus »50 Jahre Atomenergie sind genug. Zum Status der Atomkraft im 21. Jahrhundert« ch. 5, p. 45-53, Austrian Institute of Ecology

Abbrand

Unter dem Begriff Abbrand versteht man in der Kerntechnik die Menge an Wärmeenergie, die pro Masseneinheit in einem Brennelement erzeugt wurde. Der Abbrand wird meist in Gigawatt-Tagen pro Tonne Schwermetall (GWd/tHM) ausgedrückt. Der Brennstoff von Kernreaktoren kann im Gegensatz zu fossilem Brennstoff nicht »in einem Zuge« umgesetzt werden, das im Laufe des Einsatzes im Reaktor der Brennstoff Veränderungen erfährt, die ein Auswechseln der Brennelemente erfordern.

Becquerel

Becquerel ist die SI-Einheit der Radioaktivität (Formelzeichen A). Sie wird durch das Zeichen Bq abgekürzt. Benannt wurde sie nach dem französischen Physiker Antoine Henri Becquerel, der den Nobelpreis für die Entdeckung der Radioaktivität erhalten hat. $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$. Mit anderen Worten hat also eine Substanz eine Radioaktivität von 1 Becquerel, wenn im Mittel pro Sekunde eines seiner instabilen Atome zerfällt.

Dekommissionierung

Unter Dekommissionierung versteht man den Abbau einer Atomanlage nach Betriebsbeendigung, die Reinigung des Standortes und der Bauelemente von Quellen radioaktiver Strahlung, um diese für eine andere Verwendung zur Verfügung zu stellen. An Arbeitsplätzen ist mit Dekommissionierung die Entfernung von Strahlungsquellen gemeint. Im rechtlichen Sinne wird der Begriff auch für die Entnahme eines Atomstandorts aus dem Atomgesetz verwendet.

Leichtwasserreaktor

Der Leichtwasserreaktor (LWR) ist ein Reaktortyp, bei dem so genanntes leichtes Wasser als Kühlmittel und Moderator verwendet wird. »Leichtes Wasser« bezeichnet dabei gewöhnliches Wasser, dessen Wasserstoffatome überwiegend als Protium, dem leichtesten Wasserstoffisotop, vorliegen.

MOX

Ein Mischoxid (kurz MOX) ist ein Stoff, der sich aus mehreren Oxiden zusammensetzt. Ein Beispiel aus der Kerntechnik sind die MOX-Brennelemente, die aus Urandioxid UO_2 und Plutoniumdioxid PuO_2 bestehen. Sie werden heute in verschiedenen Ländern (vor allem Frankreich und Deutschland, aber auch in der Schweiz und Belgien) in Kernreaktoren eingesetzt, um das bei der Wiederaufarbeitung abgetrennte Plutonium zu verwerten und es gleichzeitig für Kernwaffen weitgehend unbrauchbar zu machen.

Nukleare Wiederaufbereitung

Die Wiederaufbereitung von Kernbrennstoffen, oft auch »Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen« genannt, wurde ursprünglich aus militärischen Gründen entwickelt. Im zivilen Bereich enthalten abgebrannte Brennelemente aus zivilen Leistungsreaktoren noch rund 96% unverbrauchtes Uran und 1% Plutonium. Beides sind Stoffe, die im Prinzip zu neuen Brennelementen verarbeitet werden können. Die restlichen 3% sind Spaltprodukte und höhere Aktinoide, die den eigentlichen radioaktiven Abfall ausmachen. Die Wiederaufarbeitung ist ein technischer Vorgang, mit dessen Hilfe das spaltbare Material von den übrigen Bestandteilen separiert werden kann.

Proliferation

Proliferation ist im Rüstungsbereich die Bezeichnung für die Weiterverbreitung bzw. die Weitergabe von Massenvernichtungswaffen und ihren Trägersystemen von Staaten, die über derartige Technologien verfügen, an andere Staaten, die noch nicht darüber verfügen.

Radiotoxicity

Ein Maß, das angibt, wie sich ein Radionuklid negativ auf die Gesundheit auswirkt. Die Art und der Energiegehalt von Strahlung, die Absorption in einem Organismus, die Verweildauer im Körper beeinflussen unter anderem den Grad der Radiotoxizität eines Radionuklides.

Schneller Brüter

Ein Brutreaktor ist ein Kernreaktor, der nicht nur zur Energiegewinnung, sondern gleichzeitig zur Erzeugung von weiterem spaltbarem Material dient. Der Betrieb mit schnellen Neutronen macht den Brutreaktor zum »Schnellen Brüter«.

Spaltmaterial (spaltbares Material)

Jedes Material, welches einer Spaltung unterzogen werden kann.

Spaltprodukt

Resultat des Spaltprozesses; manche Spaltprodukte zerfallen sehr schnell, andere bleiben als Nuklearabfall für Jahrhunderte bestehen.

Bq	Becquerel (SI Einheit der Radioaktivität)
°C	Grad Celsius (SI Einheit der Temperatur)
CGS	Zentimeter-Gramm-Sekunde (CGS-Einheitensystem)
CO ₂	Kohlendioxid
CO ₂ eq	Kohlendioxid Äquivalent (Maßeinheit des Treibhausgaspotenzials)
Cs	Cäsium
DDR	Deutsche Demokratische Republik
DEMO	Demonstration Fusion Power Plant
DOE	US Department of Energy
EFDA	European Fusion Development Agreement
ENEL	Ente Nazionale per l'Energia Elettrica
EPR	European Power Reactor
EU	Europäische Union
EURATOM	Europäische Atomgemeinschaft
eV	Elektronenvolt (Einheit der Energie = 1.6×10^{-19} Joule in SI)
F&E	Forschung und Entwicklung
FZKA	Forschungszentrum Karlsruhe
g	Gramm (CGS – Einheit der Masse)
Generation II	Zweite Generation
Generation III	Dritte Generation
Generation IV	Vierte Generation
GFR	Gascooled Fast Reactor
GIF	Generation IV International Forum
Gwd/t _{HM}	Gigawatt-Tag pro Tonne Schwermetall (abgeleitete Maßeinheit für Abbrand)
HEU	Highly Enriched Uranium
HTR	High-Temperature Reactor
I	Iod
IAEA/IAEO	Internationale Atomenergiebehörde
IEA	Internationale Energie Agentur
INPRO	International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor
J	Joule (SI Einheit der Energie, Arbeit und Wärme)
kg	Kilogramm (SI Einheit der Masse, 103 g im CGS-System)
KKW	Kernkraftwerk
Kr	Krypton
LEU	Lowly Enriched Uranium
LFR	Lead cooled Fast Reactor
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MOX	Mischoxid
MSR	Molten Salt Reactor
MTOMR	Medium Term Oil Marked Report
NERAC	Nuclear Energy Research Advisory Committee
Np	Neptunium
OECD	Organisation für Wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
Pa	Pascal (SI Einheit des Drucks)
Pa	Protactinium
PPCS	Power Plant Conceptual Study
PRIS	Power Reactor Information System
Pu	Plutonium
PuO ₂	Plutoniumdioxid
RWE	Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk
s	Sekunde (SI Einheit der Zeit, CGS Einheit of time)
SCWR	Supercritical Watercooled Reactor
SFR	Sodium cooled Fast Reactor
SI	Système international d'unités (SI unit system)
Sr	Strontium
Sv	Sievert (= Einheit der Äquivalenzdosis, beschreibt die biologische Strahlenwirkung)
Th	Thorium
THTR	Thorium-High-Temperature Reactor
Tl	Thallium
U	Uran
UK	United Kingdom
UKAEA	United Kingdom Atomic Energy Authority
UO ₂	Urandioxid
US\$	United States Dollar
USA	United States of America
VHTR	Very-High-Temperature Reactor
W	Watt (SI Einheit der Leistung)
Wh	Wattstunde (SI Einheit der Arbeit, Energie und Wärme)
Wh _{el}	Wattstunde elektrisch
Wh _{th}	Watt thermisch
Xe	Xenon

Metrische Präfixe

μ	mikro (= 10 ⁻⁶ , ein millionster Teil)
m	milli (= 10 ⁻³ , ein tausendster Teil)
k	kilo (= 10 ³ , tausend)
M	Mega (= 10 ⁶ , eine Million)
G	Giga (= 10 ⁹ , eine Milliarde)

Radioaktive Nuklide

Bezeichnung radioaktiver Nuklide: z.B. Cs-137 oder ¹³⁷Cs: die Massenzahl (137) beschreibt die Anzahl der Nukleonen

