

1. Einleitung

Kernenergie kann auf zwei Arten freigemacht werden: durch Spaltung (Fission) von schweren oder Verschmelzung (Fusion) von leichten Kernen. Für beide Vorgänge können Teilchenbeschleuniger wichtig werden, da Strahlen beschleunigter, also energiereicher Teilchen (Elektronen, Protonen oder Ionen) sowohl spaltbares Material erzeugen als auch Fusionsprozesse einleiten können.

Seit Beginn des Kernzeitalters sind in diesen Technologien beträchtliche Fortschritte erzielt worden. Der Fortschritt in Beschleuniger- und Fusionstechnologien kann zur vertikalen Proliferation* beitragen, da diese Technologien für die Entwicklung neuer Kernwaffen Verwendung finden werden, indem physikalische Grundlagen und die Strahlungswirkungen der Kernwaffen in Laboratorien studiert werden können. Diese Möglichkeit könnte unterirdische Kernversuche bald unnötig machen. Ferner könnten Beschleuniger und Fusionshybriden zusätzlich der für Forschung oder Energieerzeugung verwendeten Spaltungsreaktoren schon bald zur Herstellung von spaltbarem Material Verwendung finden und dadurch der horizontalen Proliferation neue Wege öffnen.

Die Folgen, welche die jüngsten Fortschritte in Spaltungsreaktoren und Anreicherungsstechnologien für die Proliferation haben, sind schon in vielen Artikeln untersucht worden.¹ Proliferationsaspekte der Fusionsreaktoren sind ebenfalls besprochen worden;² sie werden im vorliegenden Artikel aufgegriffen und zusammen mit denen der Beschleunigungstechnologien behandelt.

* Proliferation: Weitergabe von Material, besonders von spaltbarem Material. Vertikale Proliferation: Weitergabe von spaltbarem Material an Staaten, die bereits im Besitz von Kernwaffen sind; horizontale Proliferation: Weitergabe von spaltbarem Material an Staaten, die noch nicht im Besitz von Kernwaffen sind.

2. Verschiedene Methoden der Erzeugung von Neutronen zur Herstellung von Spalt- und Fusionsmaterial

Starke Neutronenquellen sind nötig, um Fissionsmaterial (Plutonium 239, Uran 233) und Fusionsmaterial (Tritium) zu erzeugen. Plutonium 239 und Uran 233 werden durch Bestrahlung von Uran 238 und Thorium 232 mit Neutronen hergestellt. Aus diesem Grund hat man Uran 238 und Thorium 232 fertile (für Spaltung »fruchtbare«) Materialien genannt. Tritium, das in Fusionsreaktoren und in Wasserstoff- und Neutronenbomben benötigte Fusionsmaterial, wird durch die Bestrahlung von Lithium mit Neutronen hergestellt. Zum Beispiel benötigt die Erzeugung von 1 Kilogramm Plutonium oder Uran 233 oder 13 Gramm Tritium pro Jahr eine Quelle von mindestens 8×10^{16} Neutronen pro Sekunde.

Solche Intensitäten gibt es bereits im Inneren der Kernspaltungsreaktoren, in welchen bei der Spaltung von Uran 235 freierwerdende Neutronen von Uran 238 eingefangen werden und so beträchtliche Mengen Plutonium herstellen. Die Umwandlungsrate (Anzahl der pro Spaltung erzeugten Plutoniumkerne) ist hier kleiner als 1. Aus diesem Grund kann mit den traditionellen thermischen Reaktoren nur knapp 1 Prozent des vorhandenen Uran 238 in Plutonium umgewandelt werden. Schnelle Brutreaktoren können im Prinzip bis zu 70 Prozent des Uran 238 in Plutonium verwandeln, jedoch hat die Brütertechnologie große technische und wirtschaftliche Probleme.

Bei der Verwendung von Fusionsreaktoren oder Teilchenbeschleunigern als Neutronenquellen können ebenfalls bis zu 70 Prozent des Uran 238 in Plutonium verwandelt werden. In diesen Systemen, im Gegensatz zu den thermischen oder den Schnellen Brutreaktoren, werden die Neutronen außerhalb des fertilen Uran 238 erzeugt. So ist die Neutronenquelle räumlich getrennt vom fertilen Material, welches in Plutonium 239 umgewandelt werden soll. Diese räumliche Trennung vereinfacht die Sicherheitsprobleme und erleichtert die Extraktion des Plutoniums aus dem bestrahlten Uran, da es verhältnismäßig wenig Spaltprodukte enthalten würde. Außerdem kann in solchen Systemen die Bestrahlung des fertilen Materials so reguliert werden, daß das produzierte Plutonium »waffenfähig« ist.

In Tabelle 1 werden die genannten Methoden zur Neutronenerzeugung und ihre Plutoniumausbeuten verglichen. Unter den

Tabelle 1: Neutronenquellen für die Plutoniumproduktion

Beispiel	Netto-Plutoniumausbeuten (kg Plutonium pro Jahr)
Dichte-Plasma-Focus mit Uran-Mantel*	50
Schneller Brutreaktor**	200
Leichtwasserreaktor**	300
Schwerwasserreaktor**	500
1000-MeV-Protonenbeschleuniger mit Target aus natürlichem Uran***	3000
Fusions-Fissions-Hybridreaktor mit Uran-Mantel****	3000
Hybridreaktor mit Beryllium-Uran-Mantel****	9000

* Angabe nach: V. A. Gribkov: Feasibility of Developing a Hybrid Reactor Based on the Dense Plasma Focus Device. In: Atomkernenergie – Kerntechnik, Nr. 36/1980, S. 167.

** Angabe nach: Nuclear Energy and Nuclear Weapon Proliferation. SIPRI, Stockholm 1979.

*** Angabe nach: H. Takahashi u. a.: Nuclear Fuel Breeding by Using Spallation and Muon Catalysis Fusion Reactions. In: Atomkernenergie – Kerntechnik, Nr. 36/1980, S. 195.

**** Angabe nach: J. D. Lee: Tandem Mirror Fusion Fission Hybrid Studies. In: Atomkernenergie – Kerntechnik, Nr. 36/1980, S. 36.

Spaltungsreaktoren (thermische Reaktoren) sind die Schwerwasser- und graphit-moderierten Reaktoren die leistungsfähigsten für die Plutoniumproduktion. In diesen Reaktoren werden die meisten Neutronen, die nicht zur Aufrechterhaltung der Kettenreaktion dienen, von Uran 238 absorbiert. Gerade aus diesem Grund, und auch weil diese Art von Reaktoren mit natürlichem Uran gespeist werden kann, ist ihr Proliferationsrisiko besonders groß.³

Schnelle Brutreaktoren haben eine kleinere Netto-Plutoniumausbeute als thermische Reaktoren gleicher Größe. Jedoch würde das im Brutmantel erzeugte Plutonium waffenfähig sein.

Andererseits würden die neuen Methoden mit Hochenergie-Teilchenbeschleunigern (500 bis 1500 Mega-Elektronenvolt)

oder Fusionsreaktoren 10- bis 20mal mehr spaltbares Material produzieren als Spaltungsreaktoren gleicher Leistung. Systeme zu diesem Zweck bestehen jedoch bis jetzt noch nicht und einstweilen sind die nötigen Technologien noch nicht weit verbreitet.

Während alle nuklearen Anlagen eines Mitgliedstaates des Atomsperrvertrags unter strenger internationaler Kontrolle stehen, sind interessanterweise die Beschleuniger keiner solchen Kontrolle unterworfen; auch wird diese Technologie nicht im Hinblick auf Verbreitung von Kernwaffen diskutiert.⁴

3. Beschleuniger zur Erzeugung von spaltbarem Material

Plutonium 239 wurde zum ersten Mal 1941 in Berkeley erzeugt durch Bestrahlung von Uran 238 mit Neutronen, die durch Bombardierung eines Beryllium-Targets mit in einem Zyklotron beschleunigten Deuteronen gewonnen wurden. Von jenem Zeitpunkt an bis zum Herbst 1943 waren kreisförmige Beschleuniger die einzige Plutoniumquelle, und während dieser Periode wurden mehr als 2 Milligramm Plutonium erzeugt.⁵

Der erste Versuch, einen Beschleuniger zur Produktion von spaltbarem Material in großen Mengen zu benutzen, wurde in den frühen fünfziger Jahren durch eine Gruppe in Berkeley unternommen; das Geheimprojekt lief unter der Bezeichnung MTA (Materials Testing Accelerator – Materialprüfungsbeschleuniger). Das Ziel war, verbrauchtes Uran (das heißt, Uran, dem in der Diffusionsanreicherungsanlage des Oak-Ridge-Laboratoriums das spaltbare Isotop Uran 235 entzogen worden war) in (spaltbares) Plutonium für das Waffenprogramm umzuwandeln. Damals wurde das Uran für das Anreicherungswerk hauptsächlich aus Belgisch-Kongo und aus Süd-Afrika bezogen. Wenn alles anfallende Uran in Plutonium hätte umgewandelt werden können, wären die Vereinigten Staaten unabhängig von ausländischen Uranquellen gewesen. Das MTA-Projekt wurde jedoch aufgegeben, als beträchtliche Uranlager im Westen der Vereinigten Staaten entdeckt wurden. Der Bau des Beschleunigers hatte bereits begonnen, als das MTA-Projekt 1954 aufgegeben wurde und ein Prototyp des Beschleunigers schon erfolgreich funktioniert hatte.⁶

Seit den fünfziger Jahren ist die Beschleunigertechnologie beträchtlich entwickelt worden. Zur Zeit verfügt man über die

Tabelle 2: Spallationsneutronenquellen für die Forschung

Anlage	Land	Neutronen- ausbeute (10^{15} n/s)	Stand
ZING-P'	USA	0,2	In Betrieb
KENS	Japan	0,3	In Betrieb
IPNS-I	USA	2	Im Bau
TRIUMPF	Kanada	5	In Betrieb
WNR (W, U 235)	USA	1-20	In Betrieb
SNQ(-Ring)	BRD	30	Vorgeschlagen
SNS	England	40	Im Bau
IPNS-II	USA	90	Vorgeschlagen
WNR-Ring	USA	10-200	Im Bau
SIN (Pb/Bi, U)	Schweiz	70-130	Vorgeschlagen

nötigen Kenntnisse zur Herstellung von linearen und kreisförmigen Beschleunigern, die sich für die Erzeugung großer Plutoniummengen eignen. Außerdem wird schon seit einiger Zeit vermutet, daß die Erzeugung von spaltbarem Material in Beschleunigern rentabel werden könnte.⁷ Gemäß Berechnungen könnte ein 1000-Mega-Elektronenvolt-Protonenstrahl von 300 Milliampere genügend Uran 233 pro Jahr produzieren, um ein Dutzend Uran-Thorium Reaktoren des Typs CANDU (1000 Megawatt) zu beliefern.⁸

Der physikalische Prozeß, mit dem in Teilchenbeschleunigern Neutronen produziert werden, heißt Spallation: Wenn ein beschleunigtes Teilchen auf einen komplexen Atomkern stößt, werden dem Kern Neutronen und Protonen entrissen. Wenn die Energie dieser Spallationsprodukte genügt, um eine weitere Spallation hervorzurufen, veranlaßt dieser Mechanismus eine Nuklear-»Kaskade«, und es werden viele Neutronen freigegeben. Für ein natürliches Uran-Target beträgt die Anzahl der auf diese Weise in einer Kaskade erzeugten Neutronen etwa 100 pro einfallendes 1000-Mega-Elektronenvolt-Proton.⁹

In Tabelle 2 sind die wichtigsten intensiven Spallations-Neutronenquellen aufgeführt, die existieren oder vorgeschlagen sind. Im allgemeinen werden diese Quellen für die angewandte und Grundlagenforschung in der Kernphysik gebaut. Sie ermöglichen überdies die Durchführung der grundlegenden Ent-

wicklungsarbeit an Produktionssystemen für spaltbares Material. Solche Systeme werden oft »Beschleunigungsbrüter« oder sogar »elektrische Brüter« genannt, weil man sie als Umwandler der den Beschleuniger antreibenden Elektrizität in Plutonium mit einem Wirkungsgrad von prinzipiell zirka 1200 Prozent¹⁰ betrachten kann.

In »Nature« vom 19. April 1979 sind Einzelheiten einiger Beschleunigungsbrüter-Projekte in Kanada und den Vereinigten Staaten und andere mögliche Verwendungen von Teilchenbeschleunigern im Kernbrennstoff-Zyklus beschrieben.¹¹ Man ist der Ansicht, daß Beschleunigungsbrüter mit einem annehmbaren Kostenaufwand innerhalb von zirka 10 Jahren gebaut und innerhalb der darauffolgenden 20 Jahre kommerziell verwendet werden könnten. Solche Systeme könnten auch für jene Länder interessant werden, die sich zur Produktion von spaltbarem Material für andere Möglichkeiten als Reaktoren interessieren. Dies könnte der Fall sein für Länder, die wenig Uran oder relativ viel Thorium besitzen. Es ist interessant, festzustellen, daß die Bundesrepublik Deutschland¹² und die Schweiz¹³ sich auch für derartige Systeme interessieren.

Die Beschreibung des Konzepts einer Spallationsneutronenquelle im Bericht des Ausschusses des Bundesministers für Forschung und Technologie schließt mit der Feststellung: »Die noch nötige wissenschaftlich-technische Entwicklungsarbeit stellt eine interessante Aufgabe dar. Dabei können Erfahrungen für den Bau von kostengünstigen und betriebsökonomischen Beschleunigern für Wasserstoffisotope im Giga-Elektronenvolt-Bereich mit Strömen bis zu 100 Milliampere gewonnen werden. Weiterhin können Kenntnisse über das Verhalten von Schwermetalltargets unter dem Einfluß solcher hohen Ströme erworben werden. Dies kann nicht nur für die Grundlagenforschung, sondern auch für energiewirtschaftliche Zwecke von Bedeutung sein.«¹⁴

Im Jahresbericht 1979 des Schweizerischen Instituts für Nuklearforschung (SIN) steht: »Bei bestehenden oder sich im Bau befindlichen Neutronenquellen in ausländischen Laboratorien handelt es sich entweder um spezielle Kernreaktoren oder um gepulste Spallationsquellen. Die Anlage am SIN wäre somit in den achtziger Jahren die weltweit einzige kontinuierliche Spallationsquelle hoher Leistung. In Zusammenarbeit mit Forschern aus der Bundesrepublik Deutschland ist gegen Ende des Berichtjahres am SIN ein Versuchsprogramm angelaufen, wel-

Tabelle 3: Hauptsächlichliche Hochenergie-Teilchenbeschleuniger und Speicherringe

Land	Beschleuniger	Speicherringe	Total
USA	13	4	17
UdSSR	9	3	12
CERN*	5	3	8
Japan	5		5
Frankreich	3	1	4
BRD	2	2	4
China	3		3
Schweiz	1		1
Kanada	1		1
Italien		1	1

* CERN: Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, Europäisches Kernforschungszentrum, Genf, Schweiz.

Tabelle 4: Beschleuniger (Zyklotrone) in der dritten Welt

Land		Energie (MeV)	Inbetriebnahme
Argentinien	Buenos Aires	28	1954
Brasilien	Rio de Janeiro	14	1974
Brasilien	Sao Paulo	14	1979
Chile	Santiago	6	1967
Indien	Calcutta	130	1977
Indien	Chandigahr	5	1971
Südafrika	Pretoria	17	1958
Südafrika	Stellenbosch	200	(1983)
Südafrika	Stellenbosch	8	(1984)
Saudi-Arabien	Riyadh	24	(1979)

ches die theoretisch erwarteten Leistungsdaten der geplanten Spallationsquelle experimentell absichern soll. « Am SIN spricht man auch vom hohen praktischen Interesse, das die Spallationsquellen für die Energietechnologie haben.¹⁵

Viele Nieder- oder Hochenergiebeschleuniger funktionieren in der ganzen Welt oder sind im Bau. Tabelle 3 zeigt, auf welche Länder die hauptsächlichlichen Teilchenbeschleuniger verteilt sind.¹⁶

In Tabelle 4 sind die in der dritten Welt im Betrieb oder auch im Bau befindlichen Kreisbeschleuniger aufgeführt.¹⁷ China hat sich kürzlich auf ein sehr großes Entwicklungsprogramm in Hochenergiephysik und Beschleunigerbau festgelegt.¹⁸ Außerdem scheint es seit der im Oktober 1979 in Bombay abgehaltenen nationalen Konferenz möglich, daß auch Indien die Beschleunigertechnologie entwickeln wird, mit besonderem Interesse für den Bau einer intensiven Spallations-Neutronenquelle.¹⁹

4. Verwendung von Beschleunigern in der Kernwaffentechnologie

Eine weitere wichtige Folge der Entwicklung in der Technologie der Teilchenbeschleuniger ist die Möglichkeit, im Laboratorium die Strahlungsauswirkungen und die physikalischen Grundlagen der Kernwaffen zu studieren. Zum Beispiel ist die genaue Wirkungsweise der Wasserstoffbombe noch heute nicht bekannt.

Die wichtigsten Studienobjekte sind die Effekte der bei der Kernexplosion freiwerdenden elektromagnetischen Strahlung (Röntgen- und Gammastrahlen) und Neutronen. Um im Laboratorium den intensiven Impuls von elektromagnetischen Strahlen zu simulieren, sind in den USA, der UdSSR und anderen Ländern sehr große Elektronenbeschleuniger gebaut worden, die Elektronenstrahlpulse kurzer Dauer (25 bis 100 Nanosekunden), relativ niedriger Energie (1 bis 14 Mega-Elektronenvolt) und starker Intensität (0,1 bis 1,6 Mega-Ampère) erzeugen.²⁰

Die klassische Methode der Erzeugung von intensiven Kurzimpulsen von Neutronen geht über sogenannte Fast Burst Reactors. Diese Reaktoren bestehen aus hyperkritischen Spaltmaterialanordnungen, die durch Elektronenbeschleuniger be-

strahlt werden und kurzzeitig sehr hohe Neutronenflüsse liefern. Nunmehr könnten kürzere und intensivere Impulse mittels Protonenbeschleunigern mit Speicherring erzeugt werden. Diese Speicherringe ermöglichen es, eine große Anzahl von Protonen zu speichern und sie mit einem einzigen kurzen Impuls auf ein Spallationstarget zu schießen. Ein solcher Speicherring befindet sich in den USA im Bau, und zwar in Los Alamos, für die Anlage der Waffen-Neutronenforschung (Weapons Neutron Research, WNR²¹). Der Bau eines ähnlichen Speicherrings ist für die in der Bundesrepublik Deutschland geplante Spallations-Neutronenquelle vorgeschlagen worden.²²

Die gepulsten Neutronenquellen, welche Beschleuniger verwenden, sind besonders interessant, weil das Spektrum der Spallationsneutronen dem durch die Explosion einer Atombombe hervorgerufenen sehr ähnlich ist. Diese Anlagen liefern ein derartiges Spektrum mit verhältnismäßig niedriger Gammastrahlenbeimischung. Andererseits liefern Elektronenbeschleuniger intensive Röntgen- und Gamma-Strahlen mit unbedeutendem Neutronenuntergrund.

Die militärische Materialwissenschaft stellt ein besonderes Gebiet dar, in welchem hochintensive gepulste Spallationsneutronenquellen eine bedeutende Rolle spielen könnten. Sie würden manche Experimente möglich machen, für die Materialproben nur in geringer Menge vorhanden oder beschränkt zugänglich sind, und welche hohe Neutronenflüsse benötigen. Zum Beispiel wird es möglich sein, Materialien wie Oxyd- oder Nitrit-Keramiken unter Druck bis zu 100000 bar mittels Neutronen-Diffraktionstechniken zu studieren. Als weiteres Beispiel sei das Studium der Eigenschaften und das Verhalten von Materialien unter gepulsten Außeneinflüssen wie Laseranregung, Druck und magnetischen oder elektrischen Feldern erwähnt. Inelastische Streuung wird eine einmalige Methode schaffen zum Studium der Eigenschaften von Legierungen von Übergangsmetallen und von dynamischen Prozessen, die sich in mikroskopischen Bereichen in kondensierter Materie abspielen. Schließlich werden dank des niederen Gammastrahlenuntergrundes und der Möglichkeit, das Spektrum der freiwerdenden Neutronenenergie durch Wechsel des Targetmaterials zu verändern, die Spallations-Neutronenquellen für das Studium der Neutronenstrahlen-Auswirkungen besonders nützlich sein.²³

Im Zusammenhang mit der WNR-Anlage hat P. R. Fullwood den Einfluß der Beschleunigertechnologie auf die vertikale Pro-

liferation und den eventuellen totalen Atomversuchsstopp (Comprehensive Test Ban Treaty, CTBT) klar beschrieben: »Die zukünftige Entwicklung komplizierter Kernwaffen erfordert bessere Kenntnisse in Neutronik und Hydrodynamik. Was die Wirkungen von Waffen betrifft, wird Kenntnis des Funktionierens des Systems in radioaktiver Strahlung sowie eingehendes Verständnis der physikalischen Vorgänge für die Berechnungen nötig sein. Diese Tatsachen sowie die eventuellen Einschränkungen von Kernexplosionsversuchen lassen auf Beschleunigern basierende Untersuchungen im Laboratorium als das Geeignete erscheinen.«²⁴

5. Thermonukleare Fusion und Hybridreaktoren

Zur Zeit werden hauptsächlich zwei Linien verfolgt für den Bau von Reaktoren für kontrollierte Thermonuklearfusion: erstens handelt es sich um »magnetische Einschlußsysteme«, in welchen eine ionisierte Deuterium-Tritium-Mischung (Plasma) durch magnetische Felder eingeschlossen und auf extrem hohe Temperaturen erhitzt wird, um die thermonukleare Reaktion zu zünden. Zweitens sind es die Trägheitseinschlußsysteme, in welchen Deuterium-Tritium-Kügelchen (Pellets, Mikrowasserstoffbomben) durch Laserstrahlen oder Strahlen beschleunigter Teilchen (Elektronen, Protonen oder Ionen) zusammengedrückt und aufgeheizt werden, um die Fusionsreaktion in Gang zu bringen. Diese Art der Fusion wird oft »Mikroexplosionsfusion« genannt. Eines der Merkmale der Deuterium-Tritium-Fusion besteht darin, daß der größte Teil der Reaktionsenergie durch das in der Reaktion produzierte Neutron gegeben wird. Wenn das Gefäß des Fusionsreaktors von einem Brutmantel aus Uran umgeben ist, genügt die Energie des Fusionsneutrons (14 Mega-Elektronenvolt), um eine Spaltung des Urans herbeizuführen. Diese Spaltung erhöht die Gesamtenergieausbeute beträchtlich und vervielfacht gleichzeitig die Anzahl der Neutronen. Dieses Prinzip findet Anwendung in den sogenannten Fusions-Fissions-Hybridreaktoren.²⁵ Das sind Reaktoren, die die neutronenreichen Fusionsreaktionen mit den energiereichen Spaltungsreaktionen verbinden. Ein Hybridreaktor mit minimaler Wärmeleistung und maximaler Neutronenausbeute zur Konversion von fertilem Material in spaltbares Material könnte erstellt werden, indem man die innere Wand des Reaktors mit

einer Berylliumschicht belegt, in welcher die Neutronen durch die $(n, 2n)$ -Reaktion vervielfacht werden. Hybridreaktoren, die dieses Prinzip anwenden, gehören zu den wirksamsten Systemen der Erzeugung von spaltbarem Material (siehe Tabelle 1 und J. D. Lee²⁶).

Die vorstehend beschriebenen Systeme sind technisch außerordentlich kompliziert und ihr Gebrauch wird wahrscheinlich noch für einige Zeit auf die technisch am weitesten fortgeschrittenen Länder beschränkt bleiben. Es gibt jedoch andere Methoden, welche eine weniger komplizierte Technologie brauchen. So ist zum Beispiel kürzlich der »dichte Plasma-Fokus« in einer hybriden Form für die Brütung von Plutonium vorgeschlagen worden.²⁷

Der enge Zusammenhang zwischen zivilen und militärischen Anwendungen der Fusion (besonders der Mikroexplosionsfusion) wird nunmehr allgemein anerkannt. Ein großer Teil der Forschung auf diesem Gebiet wird durch militärische Programme in den USA²⁸ finanziert, und Frankreich hat kürzlich seine gesamte Mikroexplosionsforschung der nationalen Verteidigung unterstellt.²⁹

Es sind wohl die militärischen Anwendungen, die die Höhe der Finanzierung der Fusionsentwicklung rechtfertigen; denn die Möglichkeit, eines Tages Energie direkt durch einen reinen Fusionsreaktor zu produzieren, liegt zur Zeit in weiter Ferne.

Gemäß Edward Teller »besteht nur eine »geringe Möglichkeit«, daß noch in diesem Jahrhundert ein Fusions-Reaktor mit magnetischem Einschluß gebaut werden kann, und die Chancen für einen Mikroexplosionsfusions-Reaktor in der gleichen Periode sind »äußerst fernliegend«. Andererseits könnte ein magnetischer Fusions-Fissions-Hybridreaktor in etwa zehn Jahren gebaut werden und diese Möglichkeit einer Energie produzierenden Alternative sollte daher weiter verfolgt werden.«³⁰

Es ist durchaus wahrscheinlich, daß die Hybridreaktoren zu einem horizontalen Proliferationsproblem werden könnten. Insbesondere könnten diese Anlagen jährlich 1000 bis 10000 Kilogramm spaltbares Material produzieren, welches dann in den Handel gelangen könnte.³¹ Außerdem werden die Hybridreaktoren, wie die übrigen Fusionsreaktoren, Tritium in großen Mengen erzeugen (10 bis 100 Kilogramm pro Jahr) und dies besser als die zur Zeit verwendeten spezialisierten Reaktoren. Und schließlich wird das in den Hybridreaktoren produzierte Plutonium waffenfähig sein, so daß, gemäß A. W. Maschke, »es

in der Tat sozusagen sicher ist, daß eine erfolgreiche Fusionsanlage in erster Linie für die Herstellung von Kernwaffenmaterial Verwendung finden wird.«³² Außerdem, »da es nötig ist, das Geheimnis betreffend Tritiumerzeugung zu wahren und da wir Elektrizität *nur* mit Fusion nicht billiger erzeugen können als mit Kernkraft, ist die Wahl für Fusion ziemlich eingeschränkt: offensichtlich würde die erste Wahl auf die Herstellung von Kernwaffenmaterial fallen.«³³

6. Anwendungen der Mikroexplosionsfusion in der Kernwaffentechnologie

In ähnlicher Weise wie die Beschleuniger soll die Fusion anfänglich für militärische Zwecke Verwendung finden. Noch bevor ein Hybridreaktor gebaut ist, wird Mikroexplosionsfusion weitgehend zur Entwicklung neuer Kernwaffen und zum Studium von deren Wirkungen verwendet werden. Bei Erwähnung des Nova-Lasers, der sich in den USA für Mikroexplosionsfusion im Bau befindet, erklärte Melvin Price (Vorsitzender des Militärkomitees des Repräsentantenhauses) kürzlich: »Man hat alle Ursache zu glauben, daß die Nova Neutronenflüsse liefern wird, welche für Experimente in Kernwaffenphysik im Laboratorium gebraucht werden können. Außerdem ist Nova der erste Anwärter, eine bedeutende thermonukleare Zündung zu erreichen, die es ermöglicht, im Laboratorium Versuche mit simulierten Kernwaffenwirkungen zu machen.«³⁴

Auf dem Gebiet der physikalischen Waffenforschung kann Mikroexplosionsfusion zum Studium von Zustandsgleichungen bei hohen Energiedichten, Implosionsdynamik und exoatmosphärischen Kernexplosionsphänomenen verwendet werden.³⁵ Man hofft, durch dieses Studium thermonukleare Zündungs- und Explosionsphysik besser zu verstehen. Tatsächlich ist es heutzutage nur möglich, diese Art von Mechanismen mit unterirdischen Kernexplosionen zu studieren, welche Röntgenstrahlen genügender Intensität liefern, um das Fusionsmaterial zusammenzudrücken und zu entzünden. Eine mögliche Folge der Mikroexplosionsforschung könnte in einer weiteren Verkleinerung der Wasserstoff- und Neutronen-Bomben liegen.

Auf dem Gebiet der simulierten Waffenwirkungen hat die Mikroexplosionstechnologie kurz-, mittel- und langfristige Anwendungen. Kurzfristig wird man die Auswirkungen kurzer

Tabelle 5: Beispiele von Mikroexplosionsfusionsanlagen

Anlage	Land	Strahlen	Leistung (Terawatt)	Inbetriebnahme
Nova	USA	Laser	250	(1983)
Antares	USA	Laser	100	(1983)
Shiva	USA	Laser	25	1978
Helios	USA	Laser	10	1978
Delfin	UdSSR	Laser	10	
Gekko XII	Japan	Laser	10	
Octal	Frankreich	Laser	2	1978
Gekko IV	Japan	Laser	2	1979
CLF	England	Laser	0,1	1978
Angara-5	UdSSR	Elektronen	100	(1984)
Proto II	USA	Elektronen	8	1977
Angara-1	UdSSR	Elektronen	2	1976
PBFA II	USA	Protonen	100	(1986)
PBFA I	USA	Protonen	30	1980
HIDE (LBL)	USA	U ⁴⁺ Ionen	40	

Röntgenstrahlimpulse auf elektronische Komponenten prüfen können. Mittelfristig können Möglichkeiten entwickelt werden, diese Komponenten hochenergetischer Neutronen- und Gammastrahlung auszusetzen. Langfristig wird es möglich sein, ganze Nuklearsprengköpfe (reentry vehicles) zu bestrahlen, wenn genügend hohe Pellet-Ausbeuten erzielt werden können.³⁶ Die Mikroexplosionssysteme werden die Beschleuniger- und Speicherringanlagen ergänzen, indem sie intensive Pulse thermonuklearer Neutronen liefern. Das Gesamtziel der Simulierung von Kernwaffenwirkungen ist es, Waffen und Kommunikationssysteme gegen die Auswirkungen eines Nuklearkrieges widerstandsfähig zu machen.

In Tabelle 5 sind einige Mikroexplosionsanlagen aufgeführt, die entweder bereits im Betrieb oder im Bau oder vorgeschlagen sind. Unter diesen sind diejenigen, die Laser- und Protonenstrahlen benützen, die am weitesten fortgeschrittenen. Interessant ist, daß die Elektronenbeschleuniger, die nunmehr für Fusionsysteme benützt werden, zuerst entwickelt wurden, um Kernwaffenwirkungen zu studieren, daß jedoch die Grundlagenforschung in Physik heute noch immer die Rechtfertigung

für den Bau von hochintensiven Protonen- und Schwerionen-Beschleunigern liefert.

Viele Länder, darunter die meisten industrialisierten, befassen sich aktiv mit Plasmaphysik und thermonuklearer Fusionsforschung. Diese Art von Forschung wird unvermeidlich zu einer wachsenden Verbreitung der Kenntnisse in Wasserstoffbomben-Physik führen. Insbesondere sind die Kompressions- und Zündungsmechanismen von Mikro-Wasserstoffbomben in Mikroexplosionssystemen denjenigen in Wasserstoff- oder Neutronenbomben ähnlich. Die Möglichkeit, diese Mechanismen im Laboratorium zu studieren, macht es für mittelgroße Mächte möglich, auf diesem Gebiet beträchtliche Kenntnisse zu erwerben.

7. Zusammenfassung

Wegen des beträchtlichen technologischen Fortschritts der letzten paar Jahre werden Teilchenbeschleuniger und Thermonuklear-Fusionsanlagen für die Verbreitung von Kernwaffen von wachsender Bedeutung sein:

- Wahrscheinlich werden innerhalb ungefähr zehn Jahren Anlagen mit Hybridfusionsreaktoren oder Beschleuniger-Brütern anfangen, spaltbares Material (Plutonium, Uran 233) oder Fusionsmaterial (Tritium) in sehr großen Mengen zu erzeugen.
- Kurzfristig wird der Bau von neuen großen Beschleunigern und Mikroexplosionsanlagen die Entwicklung neuer Kernwaffen erleichtern, da dann Experimente, die zur Zeit nur mit unterirdischen Kernexplosionen durchgeführt werden, im Laboratorium gemacht werden können.
- Schließlich wird die wachsende Fusionsforschung mehr und mehr zur Verbreitung der Kenntnisse in thermonuklearer Waffenphysik beitragen.

Die Auswirkungen dieser neuen Technologien auf den Atomsperrvertrag und den eventuellen totalen Atomversuchsstopp müssen sorgfältig erwogen werden.

Die derzeitige Debatte über die Risiken der Nuklearwaffenverbreitung konzentriert sich hauptsächlich auf die Probleme der Atomkrafterzeugung durch Spaltungsreaktoren. Diese Debatte muß auf die neuen Technologien ausgedehnt werden, auch auf jene, die wirtschaftlich gesehen noch nicht gewinn-

bringend sind, die jedoch Verwendung finden können für die Erzeugung von spaltbarem Material und für das Studium der Physik der Kernwaffen. Eine Ausdehnung der internationalen Sicherheitsmaßnahmen auf Teilchenbeschleuniger und Fusions-technologien würde dann als dringend geboten erkannt werden.

U
I
I
I
A
I
C
J
V
I
Z
V
I
S
E
I
V
S
A
I
F
I

1

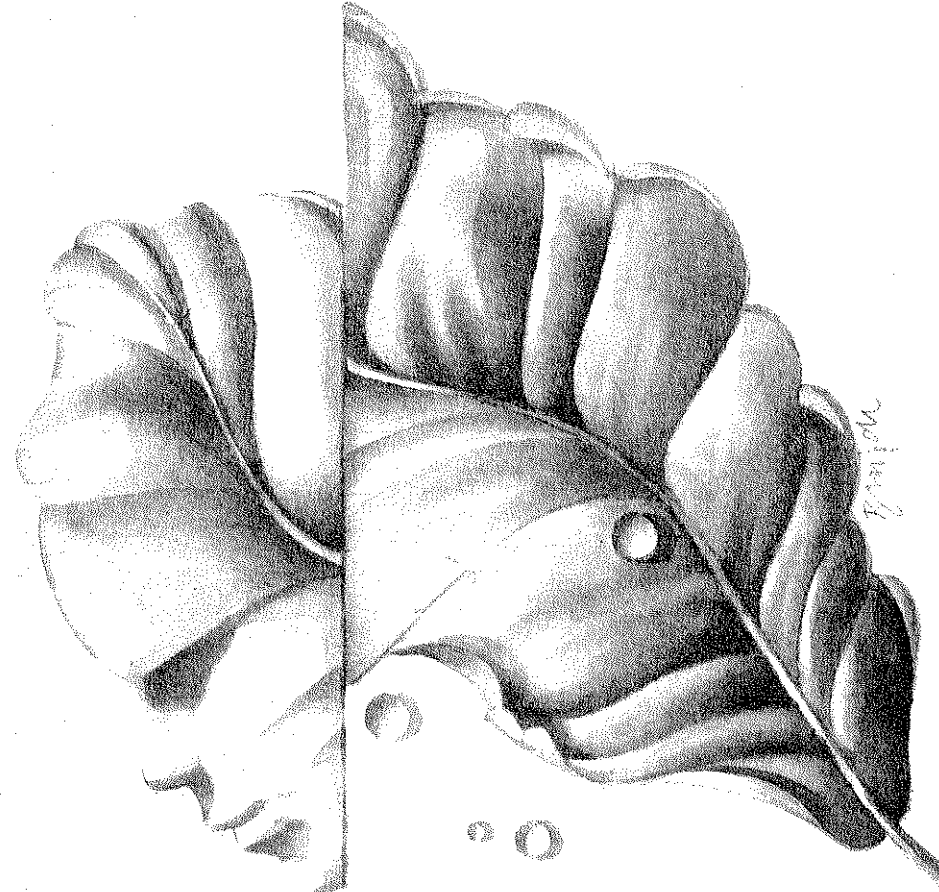
I
S
A
N
N
E
B

Ob Warnungen unerhört sind oder bleiben – diese Beiträge bekannter Wissenschaftler machen die immer noch andauernde, ja noch bedrohlicher werdende Gefahr deutlich, in der sich unser Leben befindet. Denkanstöße von Skeptikern aus der Zeitschrift ›Scheidewege‹.

Die Erde weint 10751

Die Erde weint

Frühe Warnungen vor der Verwüstung



Originalausgabe

DM 16.80

dtv



Klett-Cotta
im
Deutschen
Taschenbuch Verlag

1680



dtv

dtv/Klett-Cotta
Sachbuch

Die Beiträge dieses Bandes erschienen zuerst in
»Scheidewege – Zeitschrift für skeptisches Denken«

Inhalt

Vorwort 7

I Prolog

George Wald
Eine Welt zu gewinnen 13

II Konkrete Kritik

Jürgen Dahl
Auf Gedeih und Verderb – Zur Metaphysik
der Atomenergie-Erzeugung 21

André Gsponer
Teilchenbeschleuniger und Fusionstechnologien –
Schleichwege zur atomaren Rüstung 48

Klaus Michael Meyer-Abich
Die Menschheit und das Feuer – Zur Sozialverträglichkeit
der Energieversorgung seit Prometheus 63

Dieter Mollenhauer
Biologie an den Lebewesen vorbei 78

Hans Jonas
Laßt uns einen Menschen klonieren – Betrachtungen
zur Aussicht genetischer Versuche mit uns selbst 97

III Geistige Fundamente der Kritik

Wolfgang Hädecke
Die Welt als Maschine – Über Friedrich Georg Jüngers
Buch »Die Perfektion der Technik« 129

Max Himmelheber
Der Explosionsmythos – Über einen wissenschaftlichen
Anschauungszwang 162

Mai 1987
Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co. KG,
München
© Ernst Klett Verlage GmbH & Co. KG, Stuttgart
Umschlaggestaltung: Celestino Piatti
Umschlagabbildung: Stephan Bundi, Bern
Gesamtherstellung: C. H. Beck'sche Buchdruckerei,
Nördlingen
Printed in Germany · ISBN 3-423-10751-0

Ivan Illich	
Die Gesellschaft in den Fängen der Bedürfnismacher	179
Dietrich Dörner	
Ut desint vires . . . Über den Umgang mit sehr komplexen Systemen	188
Erwin Chargaff	
Ein Monument für Albert Einstein – Einige Überlegungen über den Nachruhm des Naturforschers	209
IV Gegenentwürfe	
Kurt Egger	
Traditioneller Landbau in Tansania – Modell ökologischer Ordnung?	229
E. F. Schumacher	
Menschliche Technologie	257
Martin Wagenschein	
Rettet die Phänomene!	265
Günter Altner	
Tannensterben und Mystik – Notizen zu Notizen von Ludwig Hohl	283
Theodor Binder	
Die Erde weint – Begegnungen mit der indianischen Welt .	293
Anhang	
Anmerkungen	304
Die Autoren	312
Quellennachweis	317

Vorwort

Die fünfziger und sechziger Jahre des 20. Jahrhunderts sind gekennzeichnet durch das weltweite Erwachen eines neuen Bewußtseins, für das sich heute die Bezeichnungen Umweltbewußtsein oder ökologisches Bewußtsein herausgebildet haben. In zahlreichen, voneinander unabhängigen Personen, Zellen und Zirkeln entstand die Erkenntnis von einer Gefährdung der Lebenswelt durch menschliche Tätigkeit und deren Bestimmtheit aus einseitig wissenschaftlichem Denken und seinen wirtschaftlichen und militärischen Anwendungen.

Eine zunehmende Reihe von Publikationen befaßte sich mit der Krisensituation und ihren Ursachen. Als markantes Beispiel sei hier Rachel Carsons ›Stummer Frühling‹ (1965) erwähnt. Im deutschen Sprachraum sind hier in erster Linie zu nennen: ›Abendländische Wandlung‹ von Jean Gebser (1942), ›Die Perfektion der Technik‹ von Friedrich Georg Jünger (1953), ›Die Natur und das Göttliche‹ von Walter Heitler (1974); vor allem aber ist hier auf das gewichtige und umfassende Werk ›Die Wissenschaft und die gefährdete Welt‹ von Friedrich Wagner (1964) hinzuweisen. Zugleich organisierten sich zahlreiche Gruppen, Verbände und Zusammenschlüsse von Menschen, die im Sinne des neuen Bewußtseins praktisch tätig wurden oder geistige Vertiefung und Fortführung suchten.

Die Gründung der Zeitschrift ›Scheidewege‹ durch Friedrich Georg Jünger und mich (1971) geht auf die Tätigkeit von drei voneinander unabhängigen Kreisen zurück, denen ich angehören durfte. Zunächst ist ein kleiner Freundeskreis des Freiburger Rechtshistorikers Franz Beyerle zu nennen, mit Friedrich Georg Jünger als der entscheidenden geistigen Kraft, als nächstes der 1965 gegründete Verein ›Das Symposium – Gesprächskreis für die Verantwortung der Wissenschaft‹ mit den führenden Köpfen Walter Heitler, Heinrich Zoller und Joachim Illies. Von den drei erwähnten Gruppen die geschlossenste, von der starke und nachhaltige geistige Ausstrahlungen ausgingen, war die von Friedrich Wagner gegründete ›Gesellschaft für Anthropoökologie‹. Sie war ein freier Zusammenschluß von Wissenschaftlern und Philosophen ohne besondere Rechtsform und lebte weitgehend aus dem Geist von Friedrich Wagner, dessen umfassendes Werk ›Die Wissenschaft und die gefährdete Welt‹