

Teilchenbeschleuniger und Fusionstechnologien fördern die Verbreitung von Kernwaffen.

André Gsponer G I P R I

Am Horizont zeichnen sich neue Technologien ab, die deutliche Folgen für den Atomsperrvertrag und den eventuellen totalen Atomversuchstop haben. In der vorliegenden Abhandlung bespricht André Gsponer vom GIPRI (Geneva Peace Research Institu-

te) einige der Folgen von Teilchenbeschleuniger- und Fusionstechnologien. Gegenwärtig unterliegen weder Entwicklung noch Anwendung dieser neuen Technologien einer internationalen Kontrolle.

I. Einleitung

Kernenergie kann auf zwei Arten freigesetzt 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 Anreicherungstechnologien für die Proliferation haben, sind schon in vielen Artikeln untersucht worden (1).

**) Proliferation: Abkürzung für Verbreitung von Kernwaffenmaterial.*

vertikale Prol.: Weiterentwicklung von Kernwaffen in Staaten, die solche Waffen schon besitzen.

horizontale Prol.: Entwicklung oder Kauf von Kernwaffen in Staaten, die sie noch nicht hatten.

Proliferationsaspekte der Fusionsreaktoren sind ebenfalls besprochen worden (2); sie werden im vorliegenden Artikel aufgegriffen und zusammen mit denen der Beschleunigungstechnologien behandelt.

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

Starke Neutronenquellen sind nötig, um Fusionsmaterial (Plutonium-239, Uranium-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 Uranium-233 oder 13 Gramm Tritium pro Jahr eine Quelle von mindestens 8×10^{16} Neutronen pro Sekunde.

Solche Intensitäten gibt es bereits im Innern der Kernspaltungsreaktoren, in welchen bei der Spaltung von Uran-235 frei werdende 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 kaum 1% des vorhandenen Uran-238 in Plutonium umgewandelt werden. Schnelle Brutreaktoren können im Prinzip bis zu 71% des Uran-238 in Plutonium verwandeln, jedoch hat die Brutertechnologie

grosse technische und wirtschaftliche Probleme.

Bei der Verwendung von Fusionsreaktoren oder Teilchenbeschleunigern als Neutronenquellen können ebenfalls bis zu 70% 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 wenige 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 Spaltungsreaktoren (thermische Reaktoren) sind die Schwerwasser- und graphitmoderierten 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 können, ist ihr Proliferationsrisiko besonders gross.

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 (500-1500 MeV)-Teilchenbeschleunigern oder Fusionsreaktoren 10 bis 20 mal mehr spaltbares Material produzieren.

Betreiber ein, schon 1974 habe es ein ebenfalls korrosionsbedingtes Leck in einem der beiden anderen Kondensat-Tanks gegeben. Aussagen über die Schwere des damaligen Unfalls könnten nicht gemacht werden, da keinerlei Aufzeichnungen mehr vorhanden seien!

Zunächst hatte es den Anschein, als ob diese Enthüllungen schwerwiegende Konsequenzen für die Weiterführung des japanischen Atomprogramms haben könnten. Am 25. April gab Minister Tanaka bekannt, eine öffentliche Abhörung zum geplanten Bau einer AKW in Maki, Präfektur Niigata, werde verschoben, bis eine vollständige Auswertung des Unfalls in Tsuruga im Hinblick auf nötige Revisionen der Genehmigungspraxis erfolgt sei. Es wurde auch eine Verschiebung anderer Anhörungen, wie der zu dem Projekt Shimane 2 und Genkai 3, erwartet. Anfang Mai forderte der Bürgermeister von Tsuruga, Takagi, ein Moratorium für sämtliche neuen Atomkraftwerksprojekte, solange zu befürchten sei, dass Elektrizitätsgesellschaften Strahlenunfälle verheimlichten. Im Bereich der Stadt hätte dies Tsuruga 2 - mit 1160 MWe der grösste Druckwasserreaktor Japans, die kommerzielle Inbetriebnahme war für März 1986 geplant - und dem um Stadtteil Shiraki angesiedelten 280 NWe-Prototyp-Schnellbrüter Monju, der 1987 kritisch werden sollte, betroffen. Bei Tsuruga 2 stand die 1. Teilerichtungs-genehmigung kurz bevor, nachdem sich die Japanische Atomenergie-Gesellschaft mit den lokalen Fischern auf eine Kompensationszahlung von 2,5 Milliarden Yen (25 Millionen DM) für die Aufgabe der Fischereigründe geeinigt hatte.

Gerichtsprozess vermieden

Doch bald zeigte sich, dass die Schärfe, mit der die Behörden zunächst auf das Bekanntwerden der Unfälle reagiert hatten, wohl in erster Linie zur Beruhigung der Öffentlichkeit hatte dienen sollen und dass sie nicht vorhatten, den Betreibern ernsthaft unbequem zu werden. Noch am 15. Mai, nach dem (zumindest bis auf Weiteres) letzten Bekanntwerden eines verheimlichten Unfalls, hatte das Industrieministerium ebenfalls eine Strafanzeige gegen die Japanische Atomenergie-Gesellschaft erwogen (von einer Regierungsstelle kommend, hätte dieser Schritt - trotz der lächerlich geringen Geldstrafen - erhebliches politisches Gewicht gehabt). Am 18. Mai, an dem Minister Tanaka persönlich das AKW Tsuruga inspizierte, war jedoch zu hören, dass man von einer Anzeige absehen werde. Das Industrieministerium hatte beschlossen, für das AKW - dessen Wiederinbetriebnahme ursprünglich für Ende Juni vorgesehen gewesen war-

nach Artikel 33 des Atomgesetzes eine Stilllegung für 6 Monate anzuordnen (es war das erste Mal, dass von diesem Artikel Gebrauch gemacht worden war). Die offizielle Begründung war, dass eine solche Verfügung die Betreiber mehr treffen werde als die Verurteilung zu einer geringfügigen Geldbusse. Der wahre Grund muss jedoch darin gesucht werden, dass die Regierung langwierige und publicityträchtige Prozesse, die eine starke Ausstrahlung auf andere Atom-



projekte haben und die Atomenergienutzung überhaupt in Frage stellen würden, vermeiden wollte. Um die in den ersten offiziellen Berichten noch angesprochenen offenen Fragen wurde es ruhig. Auch von einer Stilllegung aller Atomkraftwerke zum Zwecke einer gründlichen Sicherheitsüberprüfung war nicht mehr die Rede. Pragmatische Überlegungen, die Weiterentwicklung des Atomprogramms nicht ernsthaft zu behindern, waren stärker als das Bestreben, eine gründliche und vollständige Untersuchung durchzuführen. Mögliche Konsequenzen betr. die Verzögerung anderer Atomprojekte wurden nicht mehr diskutiert. Das derartige Überlegungen zu keinem Zeitpunkt sehr ernsthaft waren, ist daraus ersichtlich, dass die Kommission für nukleare Sicherheit zur Zeit der lebhaftesten Diskussionen um das AKW Tsuruga - am 1. Mai - der Wiederaufarbeitungsanlage in Tokai Mura, Präfektur Ibaraki, die Genehmigung zur Wiederaufnahme ihres Betriebes erteilt hatte. Die Anlage war Ende 1978 in Betrieb gegangen, musste schon nach wenigen Tagen wegen eines Lecks im hochaktiven Teil für fast 2 Jahre abgeschaltet werden, und war am 6. Februar 1981 nach einer Serie von Pannen erneut stillgelegt worden. Die abschliessenden Berichte zu Tsuruga der Agentur für natürliche Ressourcen und Ener-

gie und der Kommission für nukleare Sicherheit betonten, dass die Unfälle keinerlei Auswirkungen auf die Bevölkerung der Umgebung bewirkt hätten.

Als eher groteskes Detail am Rande mutet es an, dass aufgrund eines elementaren Verfahrensfehlers des Industrieministeriums (man hatte auf die Durchführung eines vom Atomgesetz vorgeschriebenen öffentlichen Hearings einfach vergessen) der Stilllegungsbescheid nicht wie geplant am 20. Mai, sondern erst mit rd. 2 Wochen Verspätung in Kraft treten konnte. Allein in dieser Zeit, während die Beamten der Genehmigungsbehörde sich noch bemühten, die Verfahrensfragen in den Griff zu bekommen, fanden übrigens zwei weitere Unfälle statt: Am 22. Mai 1981 ein Leck im AKW Mihama 1 (Präfektur Fukui) verbunden mit Austritt von radioaktivem Gas, und am 28. Mai ein Leck in einer Rohrleitung des Versuchsreaktors Fugen, ebenfalls am Standort Tsuruga. Dabei ist das Jahr 1981 keineswegs untypisch für das japanische Atomprogramm. Am 4. Juni 1981 veröffentlichte das Ministerium für internationalen Handel und Industrie die Zahlen für 1980 - in diesem Jahr fanden 25 Unfälle in Atomkraftwerken statt, wobei der "Zwischenfall" in Tsuruga im Dezember noch nicht berücksichtigt war (und wieviele andere vertuschte Pannen ebenfalls nicht?).

Japan liegt heute mit seinem ambitionierten Atomprogramm weltweit gesehen in der Spitzengruppe. Es ist das einzige Land, das die militärische Anwendung der Atomenergie direkt erfahren hat. Es war - zu Recht - ein nationaler Skandal, als durch den ehemaligen US-Botschafter in Tokyo, Reischauer, im Mai 1981 bekannt wurde, dass in den letzten Jahrzehnten atombewaffnete US-Kriegsschiffe - mit Wissen der japanischen Regierung - routinemässig japanische Häfen anliefen, obgleich dies im Widerspruch zu der offiziellen japanischen Politik steht, keine Atomwaffen auf dem Staatsgebiet und in den Territorialgewässern zu dulden. Das militärische Potential der zivilen Atomkraftnutzung dagegen - insbesondere der Wiederaufarbeitung, bei der waffenfähiges Plutonium abgetrennt wird - und deren sonstige Probleme und Risiken sind bisher kaum auf nationaler Ebene diskutiert worden. Es wird sich zeigen, wie weit sich in dieser Hinsicht nach "Tsuruga" etwas ändert. Jedenfalls ist es auch für die europäische Anti-AKW-Bewegung von grosser Bedeutung, die Entwicklung in Japan aufmerksam zu verfolgen.

Recherchen: Fumiko Oda
Text: Helmut Hirsch
(Gruppe Ökologie
Hannover)

ren als Spaltungsreaktoren gleicher Leistung. Systeme zu diesem Zweck bestehen jedoch bis jetzt noch nicht und einstweilen sind die nötigen Technologien noch nicht weit verbreitet.

Tabelle 1: NEUTRONENQUELLEN

FUER PLUTONIUMPRODUKTION

Beispiel	Netto-Plutoniumausbeuten (kg Pu/a)
Dichter Plasma-Focus mit Uran-Mantel (20)	50
Schneller Brüter (1)	200
Leichtwasserreaktor (1)	300
Schwerwasserreaktor (1)	500
1000 MeV-Protonenbeschleuniger mit Target aus natürlichem Uran (8)	3'000
Fusions-Fissions-Hybridreaktor mit Uran-Mantel (19)	3'000
Hybridreaktor mit Beryllium-Uran-Mantel (19)	9'000

Während alle nuklearen Anlagen eines Mitgliedstaates des Atomsperrvertrages 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).

III. Beschleuniger zur Erzeugung von spaltbarem Material

Plutonium-239 wurde zum ersten Mal 1941 in Berkeley erzeugt durch Bombardierung eines Beryllium-Targetes mit in einem Cyclotron beschleunigten Deuteronen gewonnen wurden. Von jenem Zeitpunkt ab 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 Fünfzigerjahren durch eine Gruppe in Berkeley unternommen in einem Geheimprojekt genannt MTA (*materials testing accelerator* - Materialprüfungsbeschleuniger). Das Ziel war, verbrauchtes Uran (i.e. 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 Fünfzigerjahren ist die Beschleunigertechnologie beträchtlich entwickelt worden. Zur Zeit verfügt man über die 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 (6). Gemäss Berechnungen könnte ein 1000 MeV Protonenstrahl von 300 mA genügend Uran-233 pro Jahr produzieren, um ein Dutzend Uran-Thorium Reaktoren des Typs CANDU (1000 MWe) zu beliefern (7).

Der physikalische Prozess, mit dem mit Teilchenbeschleunigern Neutronen produziert werden, heisst "Spallation": wenn ein beschleunigtes Teilchen auf einen komplexen Atomkern stösst, werden dem Kern Neutronen und Protonen entzogen. Wenn die Energie dieser Spaltungsprodukte genügt, um eine weitere Spallation

hervorzurufen, veranlasst dieser Mechanismus eine Nuklear-"Kaskade", und es werden viele Neutronen freigesetzt. Für ein natürliches Uran-Target beträgt die Anzahl der auf diese Weise in einer Kaskade erzeugten Neutronen etwa 100 pro einfallendes 1000 MeV-Proton (8).

In Tabelle 2 sind die wichtigsten intensiven Spaltungs-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 Entwicklungsarbeit an Produktionssystemen für spaltbares Material. Solche Systeme werden oft "Beschleunigungsbrüter" oder sogar "elektrische Brüter" genannt, weil man sie als Umwandler der den Beschleunigern antreibenden Elektrizität in Plutonium mit einem Wirkungsgrad von prinzipiell zirka 1200% (7,8) betrachten kann.

In Referenz 6 sind Einzelheiten einiger Beschleunigungsbrüter-Projekte in Kanada und den Vereinigten Staaten und andere mögliche Verwendungen von Teilchenbeschleunigern im Kernbrennstoff-Zyklus beschrieben. Man ist der Ansicht, (6) 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

Tabelle 2: SPALLATIONSNEUTRONENQUELLEN FÜR DIE FORSCHUNG

Anlage	Land	Neutronenausbeute (10 ¹⁵ n/s)	Stand
ZING-P	USA	0.2	In Betrieb
KENS	Japan	0.3	In Betrieb
IPNS-1	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-11	USA	90	Vorgeschlagen
WNR-RING	USA	10-200	Im Bau
SIN (Pb/Bi,U)	Schweiz	70-130	Vorgeschlagen

Fall sein für Länder, die wenig Uran oder relativ viel Thorium besitzen. Es ist interessant, festzustellen, dass die Bundesrepublik Deutschland (9) und die Schweiz (10) sich auch für derartige Systeme interessieren.

Die Beschleunigung des Konzepts einer Spallationsneutronenquelle im Bericht des Ausschusses des Bundesministers für Forschung und Technologie schliesst mit dem Paragraf: "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 GeV-Bereich mit Strömen bis zu 100 mA 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" (9).

Im Jahresbericht 1979 des Schweizerischen Institutes 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 Achtzigerjahren 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, welches die theoretisch erwarteten Leistungsdaten der geplanten Spallationsquelle experimentell absichern soll". Am SIN spricht man auch von hohen praktischen Interesse, das die Spallationsquellen für die Energietechnologie bedeuten (10).

Viele Nieder- und Hochenergiebeschleuniger funktionieren in der ganzen Welt, oder sind im Bau begriffen. Tabelle 3 zeigt, auf welche Länder die hauptsächlichlichen Teilchenbeschleuniger verteilt sind (11).

Tabelle 3: HOCHENERGIE-TEILCHEN-BESCHLEUNIGER UND SPEICHERRINGE

Land	Beschleuniger	Speicher- ringe	Tot.
USA	13	4	17
USSR	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

Tabelle 4: BESCHLEUNIGER (ZYKLOTRONE) IN DER DRITTEN WELT

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

In Tabelle 4 sind die in der dritten Welt im Betrieb oder noch im Bau befindlichen Kreisbeschleuniger aufgeführt (12). China hat sich kürzlich auf ein sehr grosses Entwicklungsprogramm in Hochenergiephysik und Beschleunigerbau festgelegt (13). 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 (14).

IV. 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 USA, USSR und anderen Ländern enorme Elektronenbeschleuniger gebaut worden, die Elektronenstrahlpulse kurzer Dauer (25 bis 100 ns), relativ niedriger Energie (1 bis 14 MeV), und starker Intensität (0.1 bis 1.6 MA) erzeugen (15).

Die klassische Methode der Erzeugung von intensiven Kurzpulsen von Neutronen geht

über sogenannte "fast burst reactors". Diese Reaktoren bestehen aus hyperkritischen Spaltmaterialanordnungen, die durch Elektronenbeschleuniger bestrahlt 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 Spallations-target zu schießen. Ein solcher Speicherring befindet sich im Bau in den USA, in Los Alamos, für die Anlage der Waffen-Neutronenforschung (Weapons Neutron Research - WNR (16)). Der Bau eines ähnlichen Speicherrings ist für die in der Bundesrepublik Deutschland geplante Spallations-Neutronenquelle vorgeschlagen worden (9).

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 Gammastrahlbeimischung. Andererseits liefern Elektronenbeschleuniger intensive Röntgen- und Gammastrahlen 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 100'000 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 frei werdenden Neutronenenergie durch Wechsel des Targetmaterials zu verändern, die Spallations-Neutronenquellen für das Studium der Neutronenstrahlen-Auswirkungen besonders nützlich sein (17).

Im Zusammenhang mit der WNR-Anlage hat R.P. Fullwood den Einfluss der Beschleunigertechnologie auf die vertikale Proliferation 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" (16).

V. 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 Einschliesssysteme", 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 Trägheitseinschliesssysteme, 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 MeV), 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" (18). Das sind Reaktoren, die die neutronenreichen Fusionsreaktionen mit den energiereichen Spaltungsreaktionen verbinden. Ein Hybridreaktor mit minimaler Wärmeleistung und maximaler Neutronenausbeute zur Konversion von fertigem 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 5 und Referenz 19).

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 sein. 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 (20).

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 USA (21) finanziert, und Frankreich hat kürzlich seine gesamte Mikroexplosionsforschung der nationalen Verteidigung unterstellt (22).

Es sind wohl die militärischen Anwendungen, die die Höhe der Finanzierung der Fusionsentwicklung rechtfertigen; denn die Möglichkeit, eines Tages Energie 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 Fusionsreaktor mit magnetischem Einschluss gebaut werden kann, und die Chance für einen Mikroexplosionsfusions-Reaktor in der gleichen Periode sind 'ausserst fernliegend'. Andererseits könnte ein magnetischer Fusions-Fissions Hybridreaktor in etwa zehn Jahren gebaut werden und diese Möglich-

Tabelle 5: BEISPIELE VON MIKROEXPLOSIONSFUSIONSANLAGEN

Anlage	Land	Strahlen	Leistung (TW)	Inbetriebnahme
Nova	USA	Laser	250	(1983)
Antares	USA	Laser	100	(1983)
Shiva	USA	Laser	25	1978
Helios	USA	Laser	10	1978
Delfin	USSR	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	USSR	Elektronen	100	(1984)
Proto II	USA	Elektronen	8	1977
Angara-1	USSR	Elektronen	2	1976
PBFA II	USA	Protonen	100	(1986)
PBFA I	USA	Protonen	30	1980
HIDE (LBL)	USA	U ⁺⁴ Ionen	40	

keit einer Energie produzierenden Alternative sollte daher weiter verfolgt werden" (23).

Es ist durchaus wahrscheinlich, dass die Hybridreaktoren zu einem horizontalen Proliferationsproblem werden könnten. Insbesondere könnten diese Anlagen jährlich 1000 bis 10'000 Kilogramm Material produzieren, welches dann in den Handel gelangen könnte (18, 19). 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, 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" (24). 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" (24).

VI. Anwendung der Mikroexplosionsfusion auf die 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 Wirkung 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" (25).

Auf dem Gebiet der physikalischen Waffenforschung kann Mikroexplosionsfusion zum Studium von Zustandsgleichungen bei hohen Energiedichten, Implosionendynamik und exosphärischen Kernexplosionsphänomenen verwendet werden (26). Man hofft, durch dieses Stu-

dium thermonukleare Zündungs- und Explosionsphysik besser zu verstehen. Tatsächlich ist es heutzutage möglich, diese Art von Mechanismen mit unterirdischen Kernexplosionen zu studieren, welche Röntgenstrahlen genügende Intensität liefern, um das Fusionsmaterial zusammenzudrücken und zu entzünden. Eine mögliche Folge der Mikroexplosionsforschung könnte in einer weiteren Verkleinerung der Wasserstoff- und Neutronenbomben liegen.

Auf dem Gebiet der simulierten Waffenwirkungen hat die Mikroexplosionstechnologie kurz-, mittel- und langfristige Anwendungen. Kurzfristig wird man die Auswirkungen kurzer 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 (*re-entry vehicles*) zu bestrahlen, wenn genügend hohe Pellet-Ausbeuten erzielt werden können (26). Die Mikroexplosionssysteme werden die Beschleuniger und Speicherringanlagen ergänzen, indem sie intensive Pulse thermonuklearer Neutronen liefern. Das Gesamtziel der Simulierung von Kernwaffenwirkung ist es, Waffen und Kommunikationssysteme gegen die Auswirkung eines Nuklearkrieges widerstandsfähig zu machen.

In Tabelle V 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 Elek-

tronenbeschleuniger, die nunmehr für Fusionsysteme benützt werden, zuerst entwickelt werden, 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.

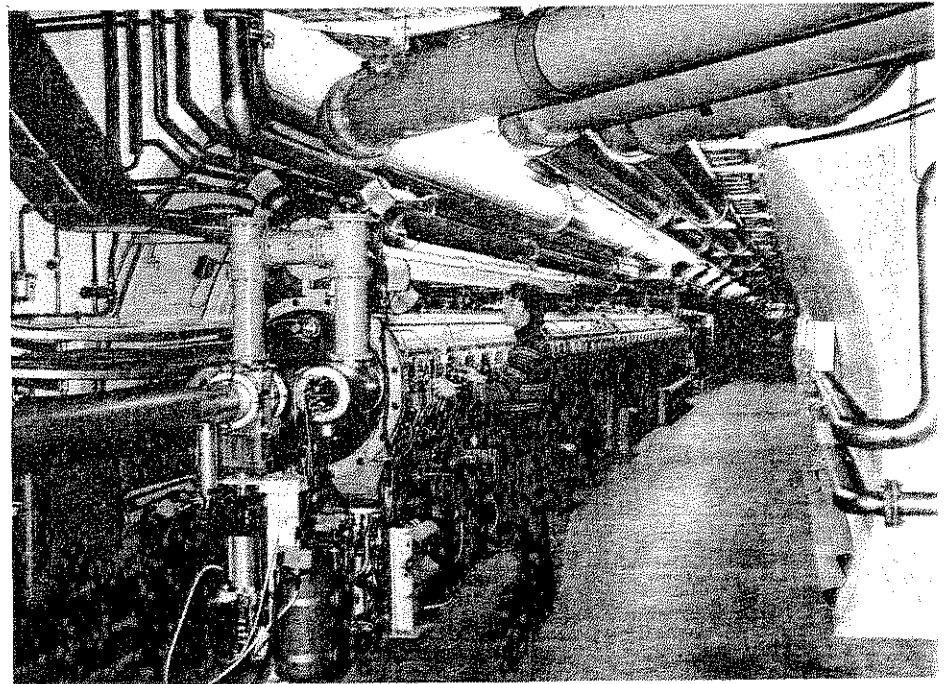
Viele Länder, darunter die meisten industrialisierten, befassen sich aktiv mit Plasma-physik und thermonuklearer Fusionsforschung. Diese Art von Forschung wird unvermeidlich zu einer wachsenden Verbreitung der Kenntnisse in Wasserstoffbomben-Physik führen. Insbesondere sind die Kompressions- und Zündungsmechanismen 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.

VII. Zusammenfassung

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

- Wahrscheinlich werden innerhalb von 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



Beschleuniger im CERN bei Genf

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.

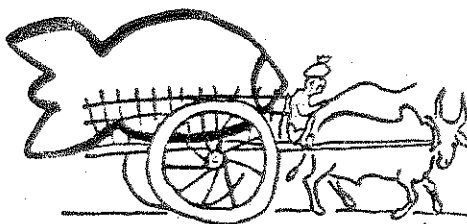
Die derzeitige Debatte über die Risiken der Nuklearwaffenverbreitung konzentriert sich hauptsächlich auf die Probleme der Atomkrafterzeugung durch Spaltungsreaktoren. Diese Debatte muss auf die neuen Technologien ausgedehnt werden, auch auf jene, die wirtschaftlich gesehen noch nicht gewinnbringend sind, 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 Fusionstechnologien würde dann als wichtiges Studienobjekt erkannt werden.

REFERENZEN

1. Nuclear Energy and Nuclear Weapon Proliferation, SIPRI, Taylor & Francis Ltd, 1979.
2. D. Westervelt and R. Pollock, *Laser fusion and fusion hybrid breeders: Proliferation implications*, *ibid.*, p.161.
R. Gillette, "Laser fusion: An Energy Option, but Weapons Simulation is First" *Science*, 4. April 1975, p. 30.
J.P. Holdern, "Fusion power and nuclear weapons: a significant link?", *Bull. of the Atomic Scienc.*, March 1978, p.4.
3. B. Jasani, in Ref. 1, p.121.
4. B. Jasani, in Ref. 1, p. 7.
5. G.T. Seaborg, IAEA Bulletin, Dec. 1962, p. 15.
6. P. Grand, "The use of high energy accelerators in the nuclear fuel cycle", *Nature* 278, 19. April 1979, p. 693.
7. "Could accelerators replace fast breeder reactors?", *CERN Courier*, 18. May 1978, p. 152.
8. H. Takahashi et al., "Nuclear fuelbreeding by using spallation and muon catalysis fusion reactions". *Atomkernenergie - Kerntechnik*, 36, 1980, p. 195.
9. Bericht des ad hoc Ausschusses "Mittelfusionsreaktor" BMFT, Teil LL, *Spallations-neutronenquelle*, Bonn, 1979.
10. J.P. Blaser, "What accelerators for future nuclear and meson physics?", *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, NS-26, 1979. W. E. Fischer et al., *Studie über eine kontinuierliche Spallations-neutronenquelle am SIN*, SIN Villigen, Dez. 1978.
11. *Catalogue of High-Energy Accelerators*, CERN, July 1980.
12. J. A. Martin, "Cyclotron-1978" *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, NS-26, April 1979.
13. "China: The eight-year plan" *Nature*, 274, 1979, p. 836. "The proton synchrotron for China", *CERN Courier*, 19, April 1979, p. 59
14. *Report on the national workshop on advanced high-energy accelerators in India*, 8-11 October 1972, Bombay, Jan. 1980.
15. H.H. Fleischmann, "High-current electron beams" *Physics Today*, May 1975, p. 35.
16. R.R. Fullwood, *Design Study for a Medium-Energy, Intense, Proton-Storage Ring (WNR Ring)* LA-4946, Los Alamos, 1972.
17. J.M. Carpenter et al., "Pulsed spallation neutron sources", *Physics Today* December 1979, p. 42.
18. V. Kuleshov, *Fusion-fission hybrid reactors*, in Ref. 1, p.155.
- H.A. Bethe, "The fusion hybrid", *Nature*, May 1979, p. 44.
19. J.D. Lee, "Tandem mirror fusion-fission hybrid studies" *Atomkernenergie- Kerntechnik*, 36, 1980, p. 36.
20. V.A. Gibkov, "Feasibility of developing a hybrid reactor based on the dense plasma focus device", *Atomkernenergie - Kerntechnik*, 36, 1980, p. 167.
21. D. Dickson, "Military in clash over US nuclear fusion research", *Nature*, 281, 11. October 1979, p. 414.
22. Décret n° 80-247 du 3 avril 1980 relatif aux activités d'études et de recherches dans le domaine de la fusion thermonucléaire par confinement inertiel, Paris, 3 avril 1980.
23. M.K. Matzen, "Topical fusion" *Nature* 284, 17 April, 1980, p. 598.
24. A.W. Maschke, "Heavy ion Fusion development plan", *Proceedings of the Heavy Ion Fusion Workshop*, Argonne, September 1978, ANL-79-41.
25. "Budget for fusion also rises 9%", *Physics Today*, May 1980, p. 114.
26. A.J. Toepfer and L.D. Posey, *Application of inertial confinement fusion to weapon technology*, Sandia Labs., SAND-77-0913, Dec. 1978.

A. Gsponer
Gipri, Genf

Der Verfasser möchte Herrn Dr. Bhupendra Jasani, einem Forscher am SIPRI in Stockholm, für viele anregende Gespräche danken und dafür, dass er das Manuskript gelesen hat.



Abu, New Delhi