

# SCHNELLER BRÜTTER

Eine Informationsbroschüre  
über

FUNKTIONSWEISE

UNFRILGEFÄHREN

PLUTONIUM



Diese Broschüre stellt die Gefährlichkeit schneller Brutreaktoren und der mit ihrem Betrieb verbundenen Plutoniumökonomie dar. Sie erläutert die Wichtigkeit der Brüter für die Atomenergiepläne. Sie wurde von Naturwissenschaftlern der Universität Freiburg erstellt, die den Kampf gegen das Atomenergieprogramm der BRD durch ihre Mitarbeit im Arbeitskreis Umweltschutz und in der Freiburger Bürgerinitiative gegen Atomenergieanlagen unterstützen.

Diese Broschüre ist Vital Michalon gewidmet. Er wurde am 31. Juli 1977 bei einer Demonstration gegen den Schnellen Brüter in Malville vom französischen Staat ermordet.

Arbeitskreis Umweltschutz  
an der Universität Freiburg  
in Zusammenarbeit mit Mitgliedern  
der Freiburger Bürgerinitiative  
gegen Atomenergieanlagen

**Impressum:**  
Arbeitskreis Umweltschutz an der Universität Freiburg  
Wilhelmstraße 15  
7800 Freiburg

Bundschuh Druckerei u. Verlag, Wilhelmstr. 15, Tel. 0761/32056

**Druck:** Bundschuh-Druckerei u. Verlag, Wilhelmstr. 15

1. Auflage: September 1977, 3.000 Exemplare  
2. Auflage: November 1977, 3.000 — 6.000 Exemplare

**Zu beziehen über:**  
Buchladen Jos Fritz  
Wilhelmstraße 15  
7800 Freiburg i. Br.

Bürgerinitiative gegen Kernenergieanlagen  
Wilhelmstraße 15, 7800 Freiburg i. Br.  
Konto: J. Schrempf, Öffentliche Sparkasse Freiburg, Nr. 2061968

**Einzelpreis:** 2.— DM + Porto  
**Bürgerinitiativen:** 1,50 DM + Porto

## Inhalt:

<b>Warum Schnelle Brüter?</b>	3
<b>Funktionsweise eines Schnellen Brütters</b>	10
Warum will man brüten?	10
Erläuterung von Kernspaltung und Brutprozess	10
Technische Verwirklichung eines Schnellen Brütters	13
Aufbau eines Schnellen Brütters	14
Kasten: Elementare Bausteine der Atome	12
<b>Unfallfahren in Schnellen Brüttern</b>	17
Jeder Störfall in einem Schnellen Brüter kann sich bis zur Zündung einer kleinen Atombombe hochschaukeln	18
Störfälle, die zum Zusammenschmelzen des Reaktors führen	23
Die Gefährlichkeit des Kühlmittels Natrium	28
Der Unfall des EBR-1 Versuchsreaktors	29
Der Unfall am Fermi-Reaktor	31
<b>Gesundheitsschäden durch Plutonium</b>	32
Wie gelangt Plutonium zum Menschen?	33
Plutonium-Verseuchung bei schweren Unfällen	36
Plutonium am Arbeitsplatz	39
Der Streit um die „heißen Teilchen“ (hot particles)	41
Kasten: Plutonium im Menschen	34
Kasten: Krebserkrankungen bei Plutonium-Arbeitern oder: Die neutrale Wissenschaft	41
<b>Erklärungen von Wissenschaftlern</b>	43
Offener Brief von Genfer Wissenschaftlern (CERN)	43
Erklärung von 28 Teilnehmern der „Internationalen Physik-Tagung Enrico Fermi“ in Varenna	44
<b>Literatur</b>	46

## mögliche u. geplante

# Standorte für Schnelle Brüter

im Bau oder in der

2. Ausbaustufe geplant

bis 1990 x

in der 3. bis 5.

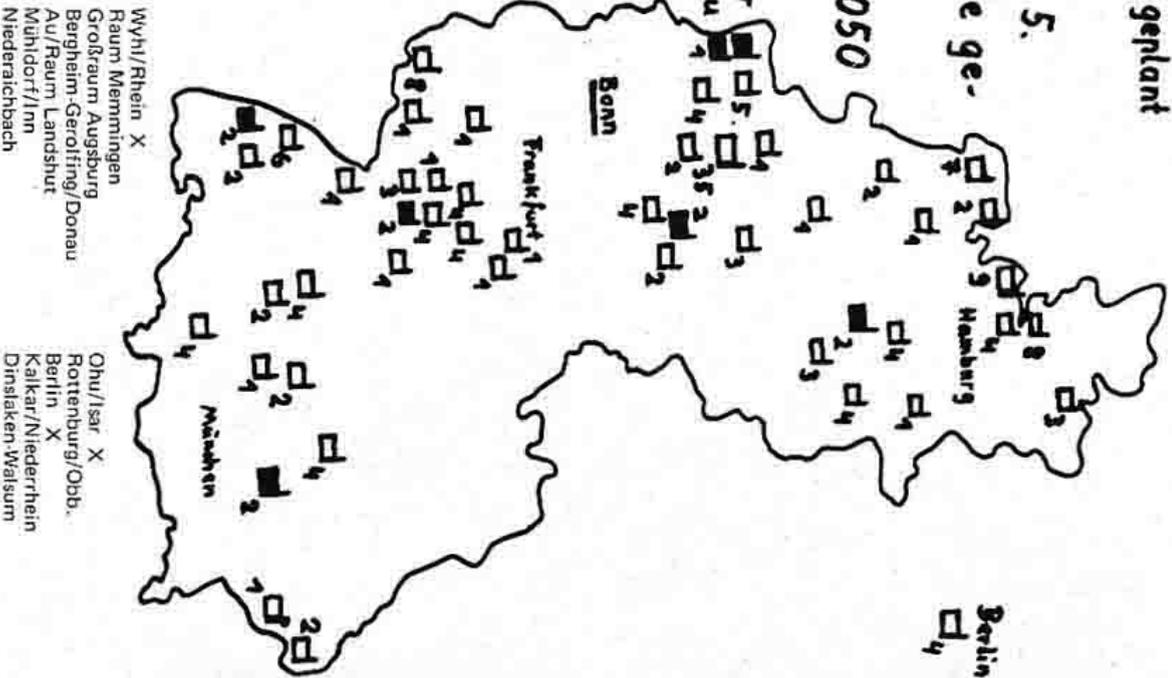
Ausbaustufe ge-

plant von

1990 bis 2050

### Standorte:

Wybeisum/Emden  
 Cridumersteiel  
 Sprenge bei Kiel  
 Strande bei Kiel  
 Marne/Elbe  
 Brunsbüttel/Elbe  
 Stade  
 Emsdetten/Münster  
 Lingen  
 Herford  
 Oldenburg  
 Wunstorf/Hannover  
 Lehrte/Hannover  
 Wolfsburg  
 Schöningen/Salzgitter  
 Würgassen  
 Borken/Kassel  
 Korbach-Ittertal X  
 Dörnighelm/Main  
 Stockstadt/Main  
 Saarlouis  
 Völklingen/Saar  
 Raum Ider-Oberstein  
 Gelnheim-Griesheim  
 Lampertheim/Hessen  
 Erbach/Odenwald  
 Heilbronn  
 Esslingen-Plochingen  
 Spaeyer-Otterstadt  
 Leopoldshafen X  
 Kappel/Rhein



Wyhl/Rhein X  
 Raum Memmingen  
 Großraum Augsburg  
 Berghain-Gerolfing/Donau  
 Au/Raum Landshtut  
 Mühldorf/Inn  
 Niederaichbach

Ohu/Isar X  
 Rottenburg/Obb.  
 Berlin X  
 Kalkar/Niederrhein  
 Dinslaken-Walsum

### Warum Schnelle Brüter?

Die bisher in Angriff genommenen Atomenergieanlagen sind nur die Spitze eines Eisbergs. Wenn wir die Atomindustrie und die Regierungen gewähren lassen, dann wird es in wenigen Jahren zwangsläufig zum Bau und Betrieb von Wiederaufarbeitungsanlagen und Schnellen Brüttern kommen. Die Schnellen Brüter verdienen in zweifacher Hinsicht unsere besondere Beachtung: erstens sind sie um einiges gefährlicher als die bisherigen Atomkraftwerke und zweitens treffen wir die Atomindustrie an einem empfindlichen Nerv, da sie auf Gedeih und Verderb auf die Schnellen Brüter angewiesen ist. Für die Atomindustrie werden die Brutreaktoren in wenigen Jahren lebenswichtig, denn ohne sie sind die abbauwürdigen Uranreserven dann verbraucht. Ein Übersichtsartikel aus der Zeitschrift „Umschau in Wissenschaft und Technik“ kommt beispielsweise zu folgendem Ergebnis (1): „Aufgrund wachsender Nachfrage wird der Bedarf der westlichen Länder (an Uran, d. Verf.) für 1980 auf etwa 50.000 Tonnen pro Jahr und für 1985 auf etwa 80.000 bis 100.000 Tonnen geschätzt. Im Jahr 2000 wird mit einem jährlichen Verbrauch zwischen 200.000 und 300.000 Tonnen gerechnet. Nach dieser Schätzung sind bis 1990 die sicheren Uranreserven der Preisklasse bis 15 Dollar verbraucht. Bis 1995 sind die sicheren Reserven bis 30 Dollar aufgezehrt und im Jahre 2000 wären die derzeit bekannten, also die sicheren und zusätzlichen Reserven der westlichen Welt verbraucht – wenn nicht die Brüter bis dahin den Uranvorrat wesentlich strecken.“

Von der vor Jahren gepriesenen Unabhängigkeit der Energieversorgung durch die Nutzung der Atomenergie ist nicht viel geblieben. In der Bundesrepublik gibt es fast keine abbauwürdigen Uranreserven. In dem oben erwähnten Artikel heißt es (1): „Die Bundesrepublik verfügt über 5.000 Tonnen. Gemessen am derzeitigen Bedarf von jährlich etwa 2.000 bis 3.000 Tonnen Uran sind die heimischen Vorräte ohne Bedeutung.“

Trotz aller mit dem Brüterbau verbundenen Schwierigkeiten ist gerade die westeuropäische Atomindustrie deshalb mit ihrer ganzen Existenz auf diesen Reaktortyp angewiesen. Deutlich drückte das der ehemalige Leiter von Interatom, der westdeutschen Brüterfirma, K. Trabe auf der Reaktortagung 1976 aus. Er sprach dort von „schwerwiegenden offenen Fragen“ und stellte fest (2): „Solche offenen Fragen müssen gelöst werden für Wiederaufarbeitung und für Brüter, sonst hätte sich die ungewöhnliche technische, wirtschaftliche und auch politische Anstrengung zur Einführung der Kernenergie langfristig nicht gelohnt.“

In welche Sackgasse die Atomenergie ohne die gefährlichen Brüter führt, schreibt er im gleichen Aufsatz (2): „Wenn Kernenergie nur wie bisher in thermischen Reaktoren erzeugt würde, dann würde die Elektrizitätserzeugung durch Kernenergie vielleicht schon innerhalb eines, mit hoher Wahrscheinlichkeit innerhalb weniger Jahrzehnte zu ähnlichen Versorgungsengpässen, Verteuerungen und politischen Zwangssituationen führen, wie sie zunächst am Beispiel der Kohle, in jüngerer Zeit des Erdöls augenfällig demonstriert wurden.“

Welche Ausmaße der Bau von Schnellen Brüttern nach den Plänen der Atomindustrie annehmen soll, beschreibt eine Studie des Kernforschungszentrums Jülich anschaulich (3). Um die Strahlenbelastung der Bevölkerung in der Zukunft zu berechnen, haben die Wissenschaftler für 1990 zwölf und bis 2050 fünfundvierzig Schnelle Brüter auf mögliche Standorte in der BRD verteilt (s. Abb. 1).

Bisher gibt es vom Typ des Schnellen Brütters nur verhältnismäßig kleine Versuchsreaktoren (s. Tab. 1). Die Erfahrungen, die mit diesen gemacht wurden, sind alarmierend: Im ersten Brutreaktor, EBR-1 (USA), schmolz nach relativ kurzer Zeit der Reaktorkern zusammen. Der erste Brüter mittlerer Größe (sogenannter Demonstrationsreaktor), der Enrico Fermi Reaktor bei

Reaktor	Land	Leistung <small>Mega Watt therm. elektr.</small>	Bemerkungen
EBR 1	USA	2 elektr.	1965 stillgelegt
Dounrey	Großbrit.	15 elektr.	1963 in Betrieb
EBR 2	USA	20 elektr.	1967 in Betrieb
BR 5	UdSSR	10 therm.	1968 in Betrieb
Enrico Fermi	USA	66 elektr.	1972 stillgelegt
Rapsodie	Frankreich	40 therm.	1967 in Betrieb
BN 350	UdSSR	150 elektr.	1976 in Betrieb
SEFOR	USA	20 elektr.	1972 stillgelegt
BOR 60	UdSSR	12 therm.	1975 in Betrieb
Fast-Flux Test Facility	USA	400 therm.	in Bau
KNK 2	BRD*	20 elektr.	1976 in Betrieb
Phénix	Frankreich	250 elektr.	1973 in Betrieb
PEC	Italien	116 therm.	in Bau
SNR 300	BRD*	300 elektr.	in Bau
JOYO	Japan	100 therm.	in Bau
BN 600	UdSSR	600 elektr.	in Bau
FBTR	Indien	15 elektr.	in Bau
Clinch River BR	USA	380 elektr.	in Planung
Superphénix	Frankreich	1.200 elektr.	in Bau
Monju	Japan	300 elektr.	in Planung
SNR 2	BRD*	1.300 elektr.	in Planung
BN 1500	UdSSR	1.500 elektr.	in Planung
PLBR	USA	1.200 elektr.	in Planung

\*Bundesrepublik Deutschland

Tabelle 1: Die wichtigsten Schnellen Brüter (9c)

Detroit, USA, schmolz schon im Probebetrieb teilweise zusammen. Nur durch Zufall kam es dabei nicht zu einer Katastrophe, mittlerweile ist er stillgelegt (siehe auch spätere Unfallbeschreibung). Wie es den anderen, später in Betrieb genommenen Demonstrationsbrütern erging, schreibt die Frankfurter Allgemeine Zeitung vom 13. Juni 1977: „Der englische Brutreaktor ist nie aus den Schwierigkeiten herausgekommen, und er hat auch nur einen Bruchteil der vorgesehenen Leistung erreicht. Inzwischen wurde er stillgelegt, und die englische Regierung hat die Brütereaktoren aufgegeben. Ein sowjetischer Natriumbrüter läuft nach schwerem Schaden seit Jahren nur mit zwei Drittel seiner Leistung. Der französische Natriumbrüter Phénix, der zwei Jahre lang einigermassen betriebend gearbeitet hat, liegt nach einem Schaden am Dampferzeuger seit Oktober vorigen Jahres still.“

Die Schwierigkeiten wurden gerade zu Anfang der Brütereentwicklung total unterschätzt. Noch 1970 hoffte die westdeutsche Atomindustrie, den ersten Demonstrationsbrüter in Kalkar schon 1975 in Betrieb nehmen zu können (4). Heute wird die Fertigstellung für 1982 oder 1983 erwartet (5). Die Kosten werden mittlerweile auf über 3 Milliarden DM geschätzt und haben sich damit gegenüber den ursprünglichen Plänen etwa vervierfacht (5).

Die bisher aufgetretenen Probleme haben das Brüterprogramm enorm verlangsamt. Trotzdem gibt die Atomindustrie nicht auf. K. Traube kommentierte diese Entwicklung in seinem oben erwähnten Referat folgendermaßen (2): „Außer vielleicht in Frankreich rechnet man daher im allgemeinen erst ab Anfang der 90er Jahre mit massiven Bestellungen von Brüterkraftwerken und in den 80er Jahren zunächst mit dem Bau jeweils einiger nationaler „Vorläufer“.“

Die sehr hohen Entwicklungskosten und die besondere Bedeutung des Brütters für die Zukunft der Kernenergie haben auf europäischer Ebene zwischen Frankreich und der Bundesrepublik zu einer engen

Zusammenarbeit geführt. Gleichzeitig hat sich eine scharfe Konkurrenz zu den Vereinigten Staaten entwickelt. Die Neue Zürcher Zeitung, eine Zeitung der internationalen Finanzwelt, schrieb beispielsweise am 5. März 1975 in einem Artikel über das Brüterprojekt der USA in Clinch River: „Das Projekt des amerikanischen Brutreaktors stellt auch eine Herausforderung an Europa dar. Die Erfahrung hat gezeigt, daß ein formeller Vorsprung von einigen Jahren, wie ihn Europa auf diesem Gebiet heute besitzt, auf die Dauer keine entscheidende Rolle spielt, sondern daß es vielmehr außer der nötigen technologischen Kompetenz auch auf das finanzielle Durchhaltevermögen und die kommerzielle Durchschlagkraft ankommt... Es ist deshalb schade, daß es nicht schon vor zehn Jahren gelang, die Entwicklung des natürlich umgekehrten Schnellen Brütters im Rahmen einer wirkungsvollen Zusammenarbeit aufzuzeichnen. Heute bleibt nur die Hoffnung, daß unter dem Druck der sich anbahnenden amerikanischen Konkurrenz es doch noch rechtzeitig gelingen wird, die bisher erfolgreichen europäischen Anstrengungen auf diesem Gebiet auf eine tatsächlich gemeinsame und auch in Zukunft konkurrenzfähige Linie zu bringen.“

Nach dem Fehlschlag mit dem Enrico Fermi-Reaktor wurde die Entwicklung des Brütters in den USA verlangsamt. Heute haben die westeuropäischen Staaten, insbesondere Frankreich, einen mehrjährigen Vorsprung vor den USA. So ist es verständlich, daß sie diesen Vorsprung aufholen wollen. Einerseits versuchen sie, die Entwicklung Schneller Brüter durch sogenannte kritische Äußerungen von Präsident Carter zu hemmen, andererseits unterstützen sie ihr eigenes Programm, indem der Kongress weitere Gelder bewilligt. Die Zusammenarbeit der westeuropäischen und französischen Atomindustrie ist auf dem Brütergebiet mittlerweile vollzogen. Nachdem 1968 die Bundesrepublik, Belgien und die Niederlande einen Vertrag über den gemeinsamen Bau des SNR-300 in Kalkar unterzeichnet hatten, kam es Anfang 1975 zu einem Vertrag

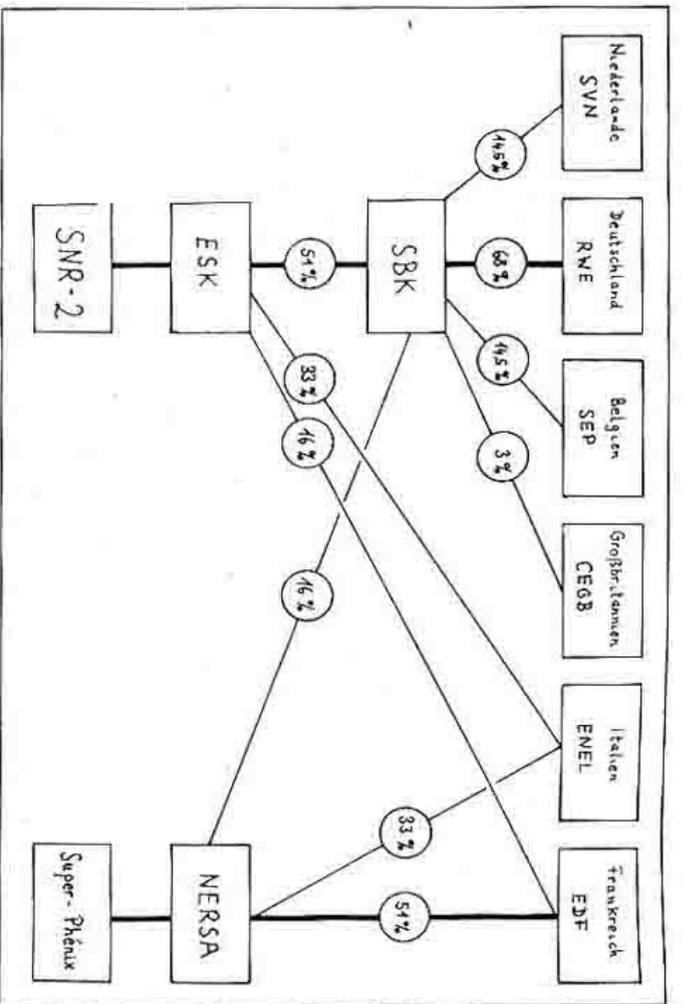


Abb. 2: Verflechtung der westeuropäischen Atomindustrie im Bau von Schnellen Brütern

zwischen Frankreich, Italien, Großbritannien, Belgien, der BRD und den Niederlanden über eine Zusammenarbeit für die Prototypen der kommerziellen Brutreaktoren (s. Abb. 2) (6). Damit ist für die Atomindustrie ein wichtiger Schritt in einer europäischen Zusammenarbeit unter der Führung des französischen und westdeutschen Kapitals vollzogen. Ein weiteres Abkommen festigt diese Zusammenarbeit: Am 5. Juli schloß die Bundesregierung mit Frankreich einen Vertrag über die gemeinsame Weiterentwicklung und den Absatz Schneller Brutreaktoren, der die deutsche Seite zur Bereitstellung von 200 bis 250 Millionen Mark jährlich verpflichtet (FAZ 6.7.1977). Über den Inhalt der Vereinbarung wurde absolutes Stillschweigen vereinbart. Das kritisierte selbst der Verband der Wissenschaftler an Forschungsinstituten (VWF), dem unter anderen die Direktoren der Kernforschungszentren Karlsruhe und Jülich angehören, in einem

offenen Brief an den Bundeskanzler (FAZ 27.7.1977).

In den nächsten Jahren kommt es für die europäische Atomindustrie darauf an, ihren Vorsprung vor der amerikanischen Konkurrenz zu behaupten. Es wird noch erhebliches Kapital in den Schnellen Brüter gesteckt werden, damit er konkurrenzfähig gegenüber dem Leichtwasserreaktor wird. Diese Entwicklungskosten werden aus Steuergeldern bezahlt. In Abbildung 3 sind die staatlichen Ausgaben für die Brütere in den wichtigsten Staaten dargestellt. Nach Traube (2) bilden die Brütereausgaben jeweils „den klaren Schwerpunkt der Förderung der friedlichen Kernenergieverwendung außer in der Bundesrepublik, wo die Hochtemperaturreaktorförderung von gleicher Größenordnung ist.“ Aus der Abbildung 3 ist auch ersichtlich, daß die westeuropäischen Staaten zur Zeit nur gemeinsam ähnlich viel Kapital aufbringen, wie die amerikanische Konkurrenz.

In nächster Zeit ist mit einer Verschärfung des Konkurrenzkampfs auf dem Brütere markt zu rechnen. Dies verlangt Abstriche bei der Sicherheit der Brutreaktoren zugunsten der Wirtschaftlichkeit. Beispielsweise werden die Dampferzeuger im Superphenix in Malville nach einem Konzept gebaut, das in den kleinen Vorläufern aus Sicherheitsgründen nicht verwendet wurde, aber wesentlich billiger ist. K. Traube formuliert diese Notwendigkeit so (2): „Sicher ist eine Hauptaufgabe der Brütereentwicklung, die Kosten kommerzieller Großanlagen zu senken.“

Vor dem Hintergrund dieser Tatsachen, nämlich

1. der lebenswichtigen Notwendigkeit des Brütereprogramms für die Atomindustrie,
2. der sich verschärfenden Konkurrenz zwischen den USA und Westeuropa auf diesem Gebiet, sowie der sich daraus ergebenden Zusammenarbeit der westeuropäischen Staaten und

3. der besonders großen Gefährdung, die der Bevölkerung mit der Durchsetzung des Brütereprogramms droht,

sind die Mittel einzuschätzen, mit denen die Staatsapparate den wachsenden Widerstand der Bevölkerung zu unterdrücken versuchen. Über Wylh, Brokdorf und Grohnde ging der westdeutsche Staatsapparat mit ständig zunehmender Brutalität gegen demonstrierende Atomkraftwerksgegner vor. Bei der Demonstration französischer Umweltschützer gegen den Superphenix in Malville, die von Deutschen, Italienern und Schweizern unterstützt wurde, setzte der französische Staat die bislang brutalsten Mittel ein. Zum ersten Mal wurde dabei ein Atomenergiegegner ermordet. Diese Broschüre soll sowohl die Entschlossenheit der Atomenergiegegner stärken, als auch noch mehr Menschen für unseren Kampf gewinnen.

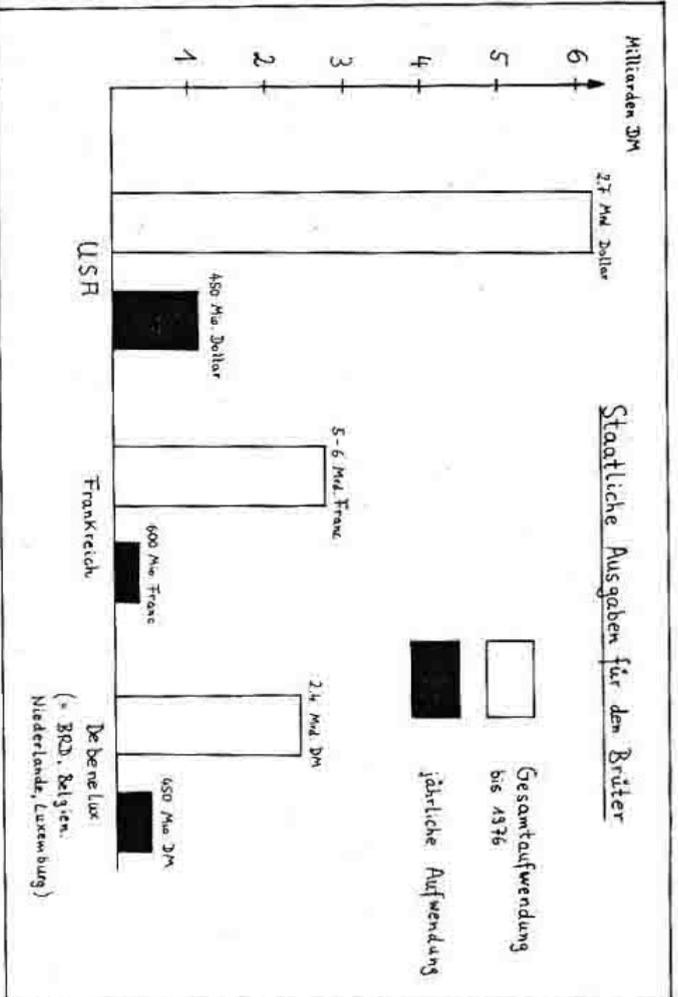


Abb. 3: Staatliche Ausgaben für den Schnellen Brüter

# Bedeutung des Schnellen Brütens im atomaren Brennstoffkreislauf

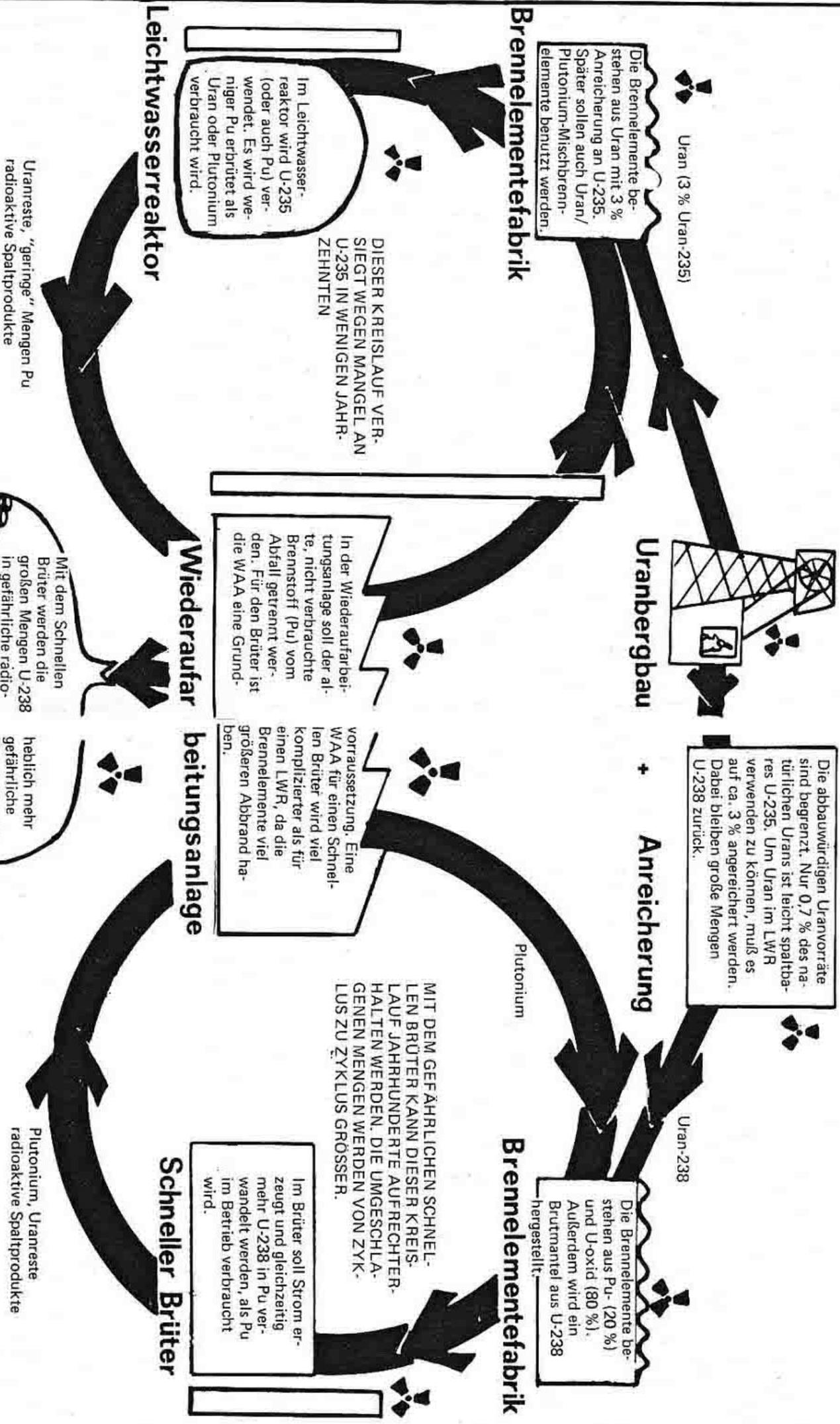


Abb. 4

## Funktionsweise eines Schnellen Brütters

### Warum will man brüten?

Die begrenzten Uranvorkommen auf der Welt zwingen die Reaktorbauer, neue Wege zu beschreiben, um die vorhandenen Vorräte besser auszunützen. Das in der Natur gefundene Uran kommt in zwei verschiedenen Isotopen (\*) vor: nämlich dem Uran-238 (99,3 %) und dem Uran-235 (0,7 %). In den heute üblichen Leichtwasserreaktoren wird allein der geringe Anteil von Uran-235 zur Gewinnung von Energie verwendet. In einem kostspieligen Verfahren muß dabei das Uran auf einen Gehalt von ca. 3,5 % Uran-235 angereichert werden. Schon lange gibt es Pläne, auch das Uran-238 mit in den Energiegewinnungsprozeß einzuschließen. Dies versucht man mit einer neuen Generation von Reaktoren, den Schnellen Brütern (Schnelle Brüter), vgl. Abb. 4.

### Erbütterung von Kernspaltung und Brutprozess

Bei einem Schnellen Brüter erfolgt die Energiegewinnung aus der Kernspaltung von Plutonium-239-Atomen (genau so, wie beim Leichtwasserreaktor die Energie aus der Spaltung des Uran 235 gewonnen wird,) wie man der Abb. 5 entnehmen kann, zerplatzt ein Plutonium-239-Atom beim Empfang eines Neutrons in zwei radioaktive Bruchstücke (Spaltprodukte) und durchschnittlich drei Neutronen. Bei diesem Prozeß entstehen Wärmeenergie. Die ebenfalls entstandenen Neutronen reagieren mit neuen Pu-239-Atomen und lösen so eine ganze Kette von weiteren Reaktionen (Kettenreaktion) aus. Dar-  
eben beschriebene Prozeß dient zur Gewinnung von Energie und findet beim Schnellen Brüter im Zentrum des Reaktors, im sogenannten „aktiven Material“ statt. Dieses aktive Material befindet sich in der Mitte der Brennelemente: es besteht aus einem Gemisch von Plutonium und Uran (im Superphenix 17% PuO<sub>2</sub> und 83% UO<sub>2</sub>)

\*) Spezielle physikalische Begriffe werden im Kasten über elementare Bausteine der Atome erklärt.

Das Uran-238 ist als Spaltmaterial für Kernreaktoren nicht geeignet. Hat es jedoch ein Neutron eingefangen, so erfolgt eine Umwandlung der Bausteine des Atomkerns; dabei geht ein Neutron in ein Proton über, wobei ein Elektron aus dem Kern geschleudert wird ( $\beta$ -Strahlung). Der Kern besitzt nun ein Proton mehr und hat sich aus dem Uran in das Element Neptunium verwandelt. Erfolgt im Kern eine solche Umwandlung nochmals, dann entsteht das Element Plutonium-239 (s. Abb. 5). Bei diesem Prozeß entsteht also Pu-239, aus dem wie oben beschrieben, durch Kernspaltungen Energie produziert wird. Insgesamt gesehen gewinnt man also auch aus dem Uran-Isotop 238 Energie. Das Erzeugen von neuem Brennstoff bezeichnet man als Brutprozess. Neuer Brennstoff wird sowohl im aktiven Material, als auch im Brutmantel (100% UO<sub>2</sub>) erzeugt, der den aktiven Teil umhüllt.

Der Brutprozess findet in jedem Reaktor, auch in den herkömmlichen Leichtwasserreaktoren statt. Im Leichtwasserreaktor verwendet man abgebrenste, also langsame Neutronen, um die Spaltprozesse in Gang zu bringen. In dieser Betriebsart entstehen aus jedem vom Brennstoff eingefangenen Neutron durchschnittlich 2,1 Spaltneutronen; diese Spaltneutronen reichen nicht aus, um mehr Brennstoff zu erzeugen als durch Kernspaltungen verbraucht wird. Die Bruttore kann man definieren als:

Bruttore = Anzahl von erbrüteten spaltbaren Kernen  
Anzahl von verbrauchten spaltbaren Kernen  
Anschaulich kann man das anhand von Abb. 6 verstehen.

Es läßt sich also sagen, daß ein heute üblicher Leichtwasserreaktor einen Brutfaktor kleiner als 1 hat. Um nun möglichst viel Plutonium zu erzeugen, versucht man in Schnellen Brütern Brutfaktoren größer als 1 zu erzielen. Das bedeutet also, daß der Schnelle Brüter mehr Kernbrennstoff erbrütet, als er verbraucht.

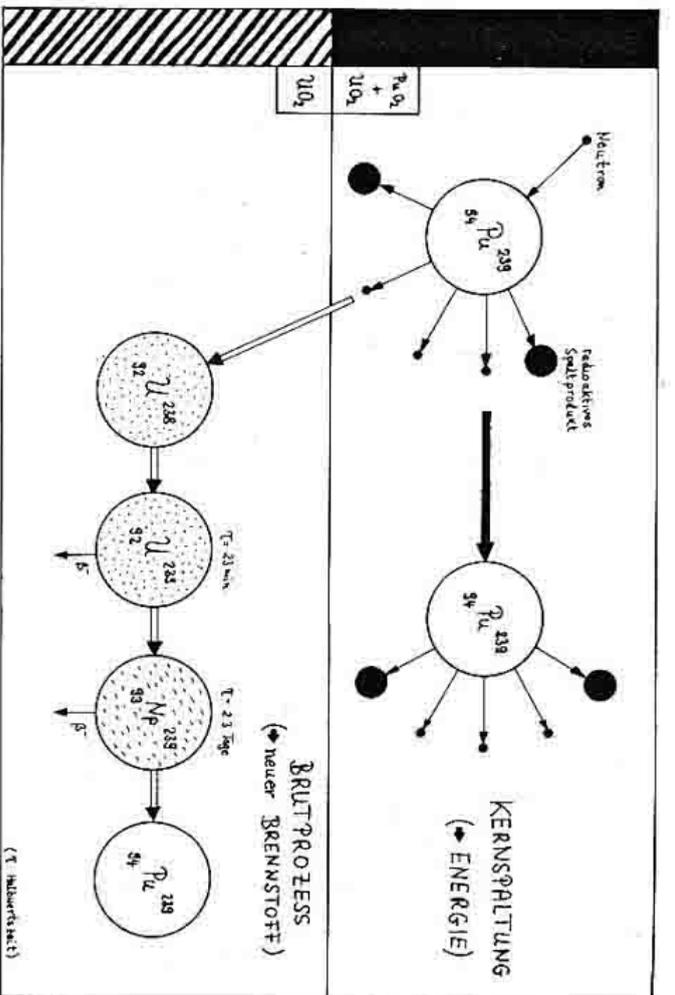


Abb. 5: Kernreaktionen im Brutreaktor

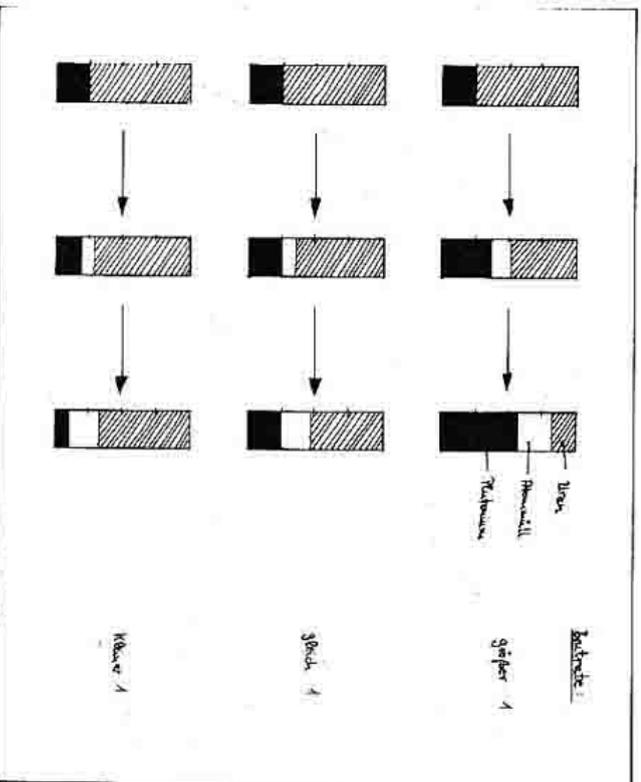
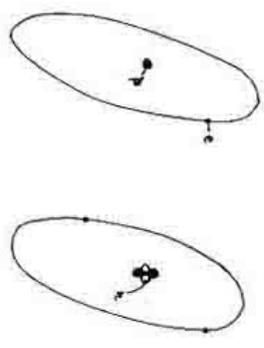


Abb. 6: Was ist Bruttore?

**Elementare Bausteine der Atome**

Alle natürlich vorkommenden Stoffe bestehen aus einer Kombination von Grundelementen (Beispiel: Eisen, Uran). Insgesamt gibt es 92 Elemente. Die kleinste Einheit eines Elements ist das **Atom**. Das Atom seinerseits besteht aus einem Kern und einer **Elektronenhülle**:

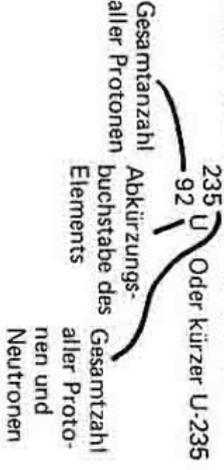
a) **Elektronen** (e) sind sehr leichte Teilchen, die jeweils genau eine negative Elementarladung tragen.



Wasserstoff Helium weitere Elemente

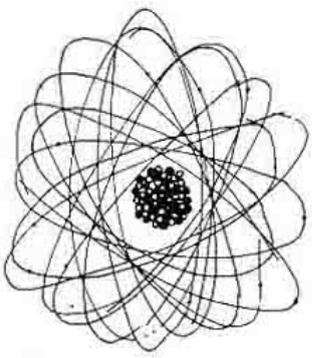
Für das chemische Verhalten der Elemente ist nur die Anzahl der Elektronen (bzw. der Protonen) wesentlich. Man hat für Atome mit gleicher Protonenzahl aber unterschiedlicher Neutronenzahl einen speziellen Namen eingeführt: **Isotope**. Fügt man z.B. dem Wasserstoff (H-1) ein Neutron zu, entsteht der schwere Wasserstoff, das Deuterium.

Notierung erklärt am Beispiel Uran:



**B) Der Kern besteht aus zwei Sorten von schweren Teilchen:**

- 1) **Protonen** (p) mit einer positiven Elementarladung
  - 2) **Neutronen** (n) die keine elektrische Ladung haben
- Proton und Neutron sind ca. 2.000 mal schwerer als ein Elektron. Die positive Ladung des Kerns wird durch die gleiche Anzahl von Elektronen in der Hülle ausgeglichen. So kann man folgendes Bild der Atome zeichnen:



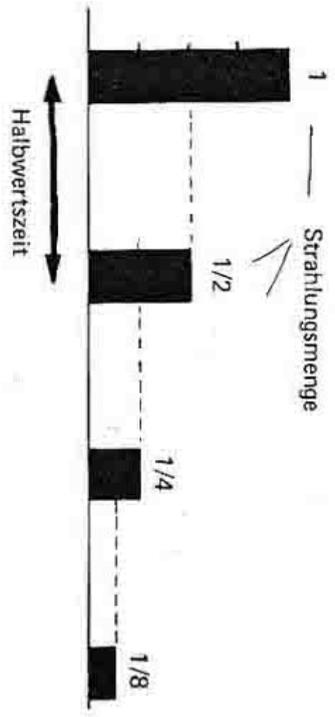
Uran

**Radioaktivität:** Wenn das Verhältnis von Neutronen- und Protonenzahl ungünstig ist, zerfällt der Kern und sendet Teilchen aus. Der Zerfall kann durch keine chemische Reaktion beeinflusst werden. Man unterscheidet drei verschiedene Strahlungen:

- 1) **Alphastrahlung** besteht aus Heliumkernen, also aus zwei Neutronen und zwei Protonen; sie ist sehr energiereich. Alphaeteilchen sind die gefährlichsten der drei Strahlungsarten, da sie in Körperzellen die stärksten Zerstörungen hervorrufen.

- 2) **Betastrahlung** besteht aus schnellen Elektronen, die aus dem Kern herausgeschleudert werden ( $\beta$ -Strahlung). Zu dieser Strahlung kommt es, wenn sich im Kern ein Neutron in ein Proton umwandelt ( $n \rightarrow p + e$ ). Bei diesem Prozeß wird die Protonenzahl um 1 erhöht und es entsteht ein neues chemisches Element.

**3) Gammastrahlung** ist Strahlung hoher Energie, vergleichbar mit der Röntgenstrahlung.



Nach der doppelten Halbwertszeit ist die Strahlungsintensität dann auf  $1/4$  der anfänglichen Intensität abgesunken usw. Die Aktivität radioaktiver Stoffe wird in Curie angegeben. Ein Curie bedeutet 37 Milliarden Zerfälle pro Sekunde. Ein Nanocurie ist ein Milliardstel Curie. Für Plutonium-239 heißt das zum Beispiel: 16,3 Gramm Plutonium haben eine Aktivität von 1 Curie. Sie senden also pro Sekunde 37 Milliarden Alpha-teilchen aus.

**Halbwertszeit:** Die Halbwertszeit ( $t_{1/2}$ ) ist die Zeitspanne, in der die Strahlung eines radioaktiven Elements auf die Hälfte abgesunken ist.

Durchdringt radioaktive Strahlung irgend ein Material, dann wird ein Teil der Energie der Strahlung absorbiert. Die absorbierte Energiemenge ist abhängig von der Masse des Materials, das die Strahlung durchdringt. Diese Dosis wird in Rad gemessen. Die biologische Wirksamkeit radioaktiver Strahlung wird in Rem gemessen. Dabei wird berücksichtigt, daß eine gleiche Dosis Alpha-, Beta- oder Gammastrahlung unterschiedliche Schäden im Gewebe anrichtet.

**Technische Verwirklichung eines Schnellen Brütters**

Um eine große Bruttoreate zu erzielen, braucht man so viele Neutronen wie möglich. — Bei Spaltung durch langsame Neutronen werden pro eingefangenen Neutron von  $\text{U-235}$  2,07 Neutronen frei, bei  $\text{Pu-239}$  2,12 Neutronen. Erfolgt jedoch die Spaltung mit schnellen Neutronen, so sind die Werte für  $\text{U-235}$  2,33 und für  $\text{Pu-239}$  2,96 (7).

Als Konsequenz muß man beim Schnellen Brüter mit schnellen (nicht abgebremsten) Neutronen arbeiten. Für schnelle Neuro-

nen ist jedoch die Wahrscheinlichkeit (Wirkungsquerschnitt) mit den Plutonium-Atomen zusammenzutreffen, um etwa 400 mal kleiner als für langsame Neutronen (7). Um ähnlich effektiv arbeiten zu können wie im Leichtwasserreaktor, muß man in einem schnellen Brüter das aktive Material viel enger packen. Folgen:

1. Die schnellen Neutronen bringen erheblich mehr Schwierigkeiten zur Steuerung der Kernreaktion.
2. Die große Anzahl von Neutronen führt zur Versprödung des einhüllenden Materials (Brennstäbe).

3. Durch die große Energieproduktion auf kleinem Raum wirkt sich jede Störung des Kühlflusses viel schneller aus, als im Leichtwasserreaktor (Zusammenschmelzen des Kerns).

4. Die hohe Konzentration von Plutonium ergibt die Möglichkeit, einer atomombenähnlichen Explosion (Bei Leichtwasserreaktoren nicht möglich).

Die Verwendung von schnellen Neutronen im Brüter hat noch eine Auswirkung im Leichtwasserreaktor ist es möglich, die entstehende Wärme (Energie) mit Wasser abzutransportieren. Wasser ist ein Moderator, das heißt es bremst die Neutronen ab. Bei einem schnellen Brüter muß das aber gerade vermieiden werden und Wasser fällt als Kühlmittel aus. Man verwendet im schnellen Brüter flüssiges Natrium (400°C bis 500°C) als Kühlmittel. Natrium reagiert aber sehr heftig, wenn es mit Wasser oder Luft in Berührung kommt und bringt deswegen große technische Probleme mit sich.

Diese Probleme werden in den folgenden Kapiteln genauer ausgeführt.

#### Aufbau eines Schnellen Brütters

Der gesamte Aufbau eines schnellen Brütters ist in Abb. 7 zu sehen. Das Herz des Reaktors ist der Reaktorkern (Core) mit den Brennstäben. Die Brennstäbe (ca. 8 mm dick) sind in der Mitte mit dem aktiven Material (■) gefüllt und nach beiden Enden hin mit Brutmaterial (□) beschickt. In diesem Teil des Reaktors laufen die oben beschriebene Wärme wird mit flüssigem Natrium wegetransportiert. Aufgrund der extremen Betriebsbedingungen ist immer ein Bruchteil der Brennstäbe (bis zu 8%) defekt (B)! Das hat zur Folge, daß radioaktive Spaltprodukte aus den Brennstäben austreten und das Kühlmittel versuchen.

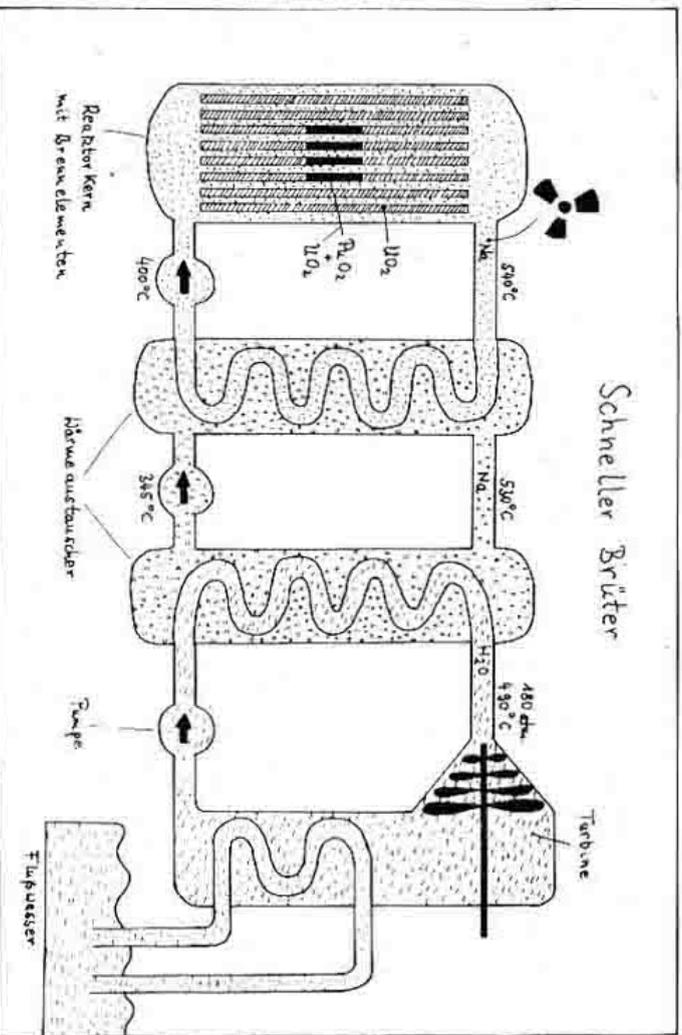


Abb. 7: Aufbau eines Schnellen Brütters

Elektr. Leistung [MW]	Druckwasserreaktor (Fessenheim)	Brüterreaktor (Super Phenix)	Brüterreaktor (SNR-300, Kalkar)
therm. Leistung [MW]	940	1200	327
Wirkungsgrad (brutto) [%]	2775	3000	760
Volumen des Reaktorkerns [m <sup>3</sup> ]	34	40	43
Dicke der Brennstäbe [mm]	26	10.8	1.6
Brennstabtemp. [°C] innen/außen, max.	10.7 *	8.65	6
spaltbares Material [Tonne]	2400°/350°	—	2720°/685°
benötigte Anreicherung [%] innen/außen	80 UO <sub>2</sub>	30.6 4.6 PuO <sub>2</sub> 26 UO <sub>2</sub>	4.84 1.24 PuO <sub>2</sub> 3.6 UO <sub>2</sub>
Abbrand [MWd/t] mittlere Leistungsdichte [KW/l]	3.5 U-235	14.5/18.5 Pu-239	23.5/33.5 Pu-239
Brüterfaktor	31.500	70.000	57.000
Kühlmittel des Primärkreislaufes [Tonnen]	110	300	400
Kühlmitteldurchsatz [m <sup>3</sup> /sec]	0.5	1.25	1.0
Kühlmittel des Sekundärkreislaufes [Tonnen]	H <sub>2</sub> O	3300 Na	Na
	H <sub>2</sub> O	19.5	4.3
	* 1200 MWel Kernkraftwerk Biblis	1700 Na	Na

Tab. 2: Vergleich Druckwasserreaktor – Schneller Brutreaktor (9)

Wegen der Gefährlichkeit von heißem Natrium und wegen der radioaktiven Verseuchung muß beim schnellen Brüter ein weiterer Kühlkreislauf eingebaut werden; dieser wird ebenfalls mit Natrium betrieben. Beide Kreisläufe sind über einen Wärmetauscher miteinander verbunden. In diesem Wärmetauscher wird die Wärme

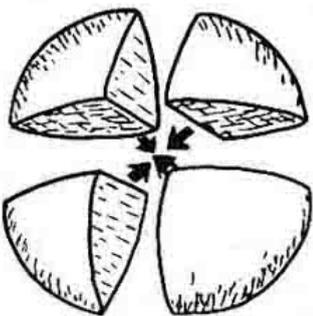
aus dem ersten Kreislauf auf den zweiten Kreislauf übertragen, ohne dass die beiden Flüssigkeiten in Kontakt kommen. Der zweite Kreislauf heizt in einem weiteren Wärmetauscher entgegenströmendes Wasser so weit auf, dass sich Wasserdampf bildet. Mit dem Wasserdampf wird eine normale Turbine betrieben und elektrisch

scher Strom erzeugt. Nachdem der Wasserdampf an der Turbine vorbeigeströmt ist, wird er mit Hilfe von Flusswasser abgekühlt und in Form von Wasser wieder dem dritten Kreislauf zugeführt.

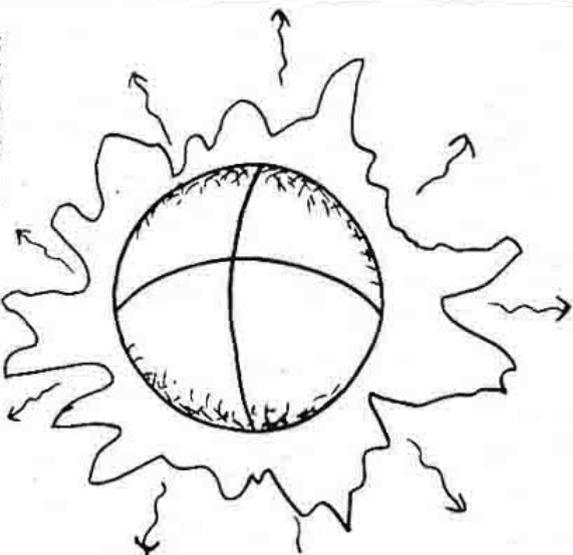
Eine kritische Stelle bei diesem Aufbau sind die Wärmeaustauscher, die mit Wasser und Natrium betrieben werden. Schon kleine

Lecks können Explosionen zur Folge haben. Weiterhin erfordert der Betrieb von schnellen Brüttern den Bau von Wiederaufbereitungsanlagen, um das erbrütete Plutonium wieder in den Reaktoren zu verwenden. Dabei wird zwangsläufig Plutonium freigesetzt; und Plutonium ist eines der gefährlichsten Gifte das man kennt.

### Was ist eine kritische Masse?



keine kritische Masse:  
4 x 2,5 kg Pu-239



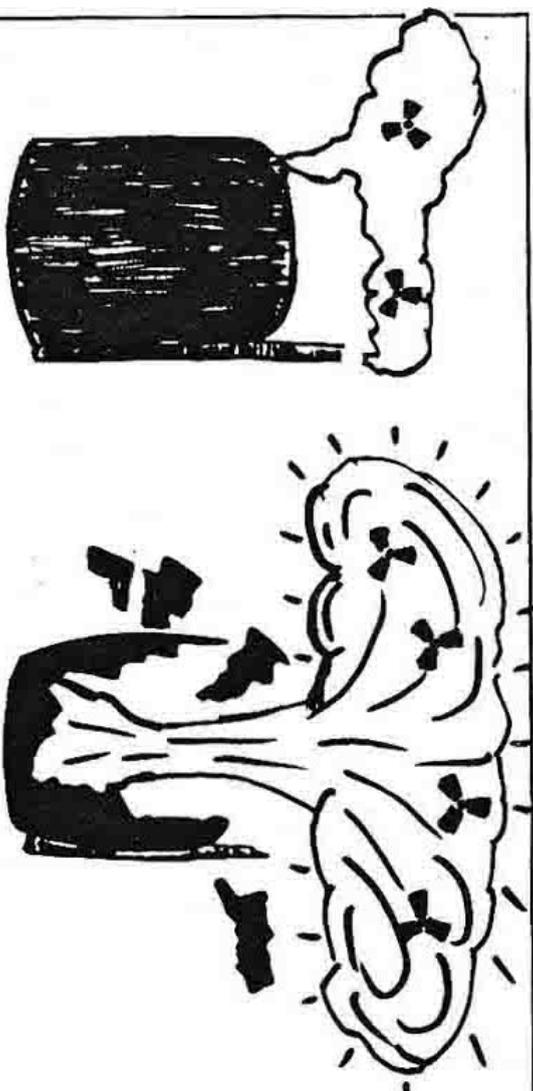
Kritische Masse:  
10 kg reines Plutonium-239

Abb. 8

### Unfallgefahren in schnellen Brüttern

Schon bei einem gewöhnlichen Atomkraftwerk, dem Leichtwasserreaktor, kann durch einen Unfall eine große Menge von Radioaktivität freigesetzt werden. Durch Überdruck oder durch Dampferlosion wird bei einem Zusammenschmelzen des Reaktorkerns die Schutzhülle beschädigt, und der geschmolzene Reaktorkern dampft in wenigen Stunden aus. Eine atomombenähnliche Explosion ist wegen des zu geringen Anteils an U-235 (ca. 3,5% bei einem Leichtwasserreaktor) ausgeschlossen. Bei einem „Druchgehen“ des Reaktors verdampft das als Kühlmittel benutzte Wasser sofort. Ohne Moderation (Neutronenabbremsung) durch das Wasser erstickt die Kettenreaktion im hohen Anteil von schlecht spaltbarem U-238. Ganz anders

beim Schnellen Brüter: Die hohen Plutoniumkonzentrationen können beim Zusammenschmelzen des Reaktorkerns zur Bildung „Kritischer Massen“ führen. (Abb. 8). Die Folge ist eine atomare Explosion, die möglicherweise den Reaktor zerstört und unmittelbar große Mengen Radioaktivität freisetzt (Abb. 9). Im Falle eines Ausdampfens werden von einigen besonders gefährlichen radioaktiven Stoffen, z.B. Strontium und Plutonium, nur wenige Prozent freigesetzt (10). Eine atomare Explosion dagegen erzeugt so viel Energie und so hohe Temperaturen, daß auch diese Stoffe fast vollständig in die Umwelt gelangen können (11). Hinzu kommt, daß ein Schneller Brüter ungefähr zehnmal mehr Plutonium enthält als ein vergleichbarer Leichtwasserreaktor.



**Ausdampfen eines Leichtwasserreaktors**  
Nach einem Kernschmelzen führt Überdruck oder Dampferlosion zum Bruch der Sicherheitshüllen. Über mehrere Stunden dampfen Teile der Radioaktivität aus.

**Atomare Explosion im Schnellen Brüter**  
Eine atomare Explosion zerstört die Schutzhülle und führt zur katastrophalen Freisetzung der gesamten Radioaktivität in kürzester Zeit.

Abb. 9: Konsequenz einer Kernschmelze

**Jeder Störfall in einem Schnellen Brüter kann sich bis zur Zündung einer kleinen Atombombe hochschaukeln.**

Zu einer ungesteuerten Kettenreaktion und damit einem „Durchgehen“ kommt es durch ein Zusammenreffen einer genügend großen Menge spaltbaren Materials, beim Schnellen Brüter vor allem Plutonium-239 (Abb. 8). Je größer die Plutoniummenge ist und je wuchtiger sie zusammengepreßt wird, umso stärker wird die atomare Explosion. Z.B. wird eine Atombombe deshalb mit einer gewöhnlichen Bombe gezündet. Bei jedem Störfall im Reaktorkern des Schnellen Brütters bestehen viele Möglichkeiten für „kleinere Explosionen“ atomarer oder konventioneller Art, die eine verheerende nukleare Explosion zünden können. Schon im Normalbetrieb wird im Reaktorkern die Grenze der thermischen Belastbarkeit der verwendeten Baumaterialien

erreicht. In einem Liter des Reaktorkerns werden mehrere hundert Kilowatt Wärme erzeugt; die Temperaturen betragen in den wenige Millimeter dicken Brennstäben im Inneren über 2.000° und außen ca. 600°C. (Angaben s. Tab. 2) Bei Störungen im Reaktorkern oder der Kühlung besteht die Gefahr eines Zusammenschmelzens. (Abb. 10, wir gehen weiter unten noch genauer auf solche auslösenden Ereignisse ein). Gelingt es nicht, die Überhitzung unter Kontrolle zu bekommen, so kommt es innerhalb weniger Minuten zum Zusammenschmelzen des Reaktorkerns. Er erhitzt sich dabei auf (ca. 3.000°C. Dies kann sodann geschehen, wenn die Kettenreaktion erst einmal zum Stillstand kommt. Denn wie beim Leichtwasserreaktor reicht die Nachzerfallswärme, die aus den Spaltprodukten stammt, vollkommen dazu aus (12). Wenn es einmal zu einem solchen

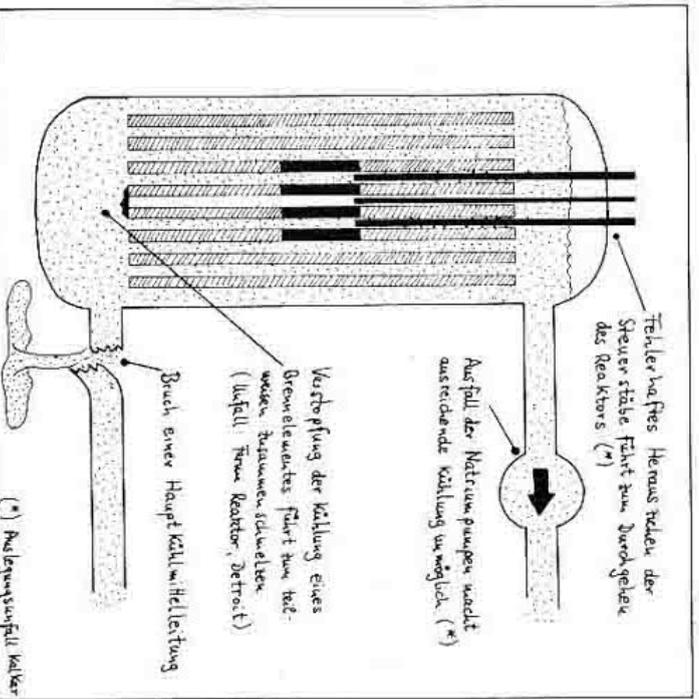


Abb. 10: Störfälle, die zum Zusammenschmelzen des Reaktorkerns führen können

Zusammenschmelzen gekommen ist, ist der Reaktor vollkommen außer der Kontrolle der Techniker und Ingenieure. Das im Reaktorkern vorhandene spaltbare Material kann sich dabei zur „kritischen Masse“ zusammenballen. Nur 2% Volumenreduzierung reichen dazu aus (13). Die Folge wäre eine „Leistungsexkursion“, ein lawinenartiges Anwachsen der Kernreaktion. Weil das spaltbare Material bei diesem Prozeß nur relativ langsam zusammengepreßt wird und die einsetzende Kettenreaktion gleich zu Beginn das Brennmaterial wieder auseinanderprengt, ist diese Leistungsexkursion“ verhältnismäßig gering. Solche kleineren Exkursionen werden heute auch von der Atomindustrie offiziell als möglich angesehen. So müssen in Kalkar von den Erbauern des dortigen Schnellen Brütters (SNR-300) Vorkehrungen gegen solche Exkursionen getroffen werden. Nach einer atomaren Leistungsexkursion (sog. Bethe-Tart-Störfall) mit der Sprengkraft von 40 kg TNT muß das Abführen der Nachzerfallswärme noch möglich sein und nach einer Explosion von 90 kg TNT darf der Sicherheitsbehälter nicht beschädigt sein (14). Zum Vergleich: eine durchschnittliche Bombe im 2. Weltkrieg hatte 50 kg TNT. Besonders gefährlich wird es allerdings erst dann, wenn durch eine solche kleine erste Leistungsexkursion eine um vieles verheerendere zweite Leistungsexkursion gezündet wird.

Die Möglichkeit einer solchen zweiten Leistungsexkursion wird sowohl von Wissenschaftlern der Atomindustrie als auch solchen, die der Atomindustrie kritisch gegenüberstehen, erwogen (15). Dies würde je nach den Umständen dazu führen, daß atomare Explosionen von einigen 100 bis einigen 1.000 kg TNT stattfinden können. Von den Schutzmaßnahmen würde nichts mehr stehen bleiben. Die Atomindustrie und die Genehmigungsbehörden versuchen deshalb mit allen Mitteln eine solche zweite Explosion wegzudiskutieren oder zum sogenannten Restrisiko zu zählen. Das geht so: man nimmt an, daß die erste Explosion so heftig ist, daß sie den Reaktorkern vollständig auseinanderprengt. Daraufhin will man annehmen, daß die Brennstoffstücke so weit voneinander entfernt sind,

daß sie nur „die kritische Masse zu einer zweiten Explosion mehr aufbringen“.

Schließlich nimmt man noch an, daß die Schutzhülle dabei jedoch intakt bleibt. Nimmt man eine weniger heftige erste Explosion an, so ist die gefährliche zweite Explosion wahrscheinlicher. Die Wissenschaftler der Atomindustrie sind damit in der absurden Situation, eine nur geringe erste Leistungsexkursion zu fürchten und müssen alle Rechenkünste aufbieten, um sie als unwahrscheinlich darzustellen (16).

Anschließend an eine geringe erste Leistungsexkursion gibt es aber im Schnellen Brüter eine Vielzahl von Möglichkeiten für eine heftige zweite Leistungsexkursion. Folgende Mechanismen sind denkbar, die Stücke der Brennelemente wieder zu einer kritischen Masse zusammenzubringen:

- Natriumdampfexplosion (Abb. 11)
- kleinere Leistungsexkursionen am Rande des Reaktorkerns (Abb. 12)
- Herunterfallen schwerer Brennstoffteile (Abb. 13)

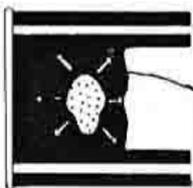
Wie eine zweite Explosion gezündet werden kann, wollen wir am Beispiel der Natriumdampfexplosion kurz erläutern:

Wenn ein Teil des geschmolzenen Brennstoffs, der eine Temperatur von 3.000 bis 5.000 Grad hat, durch eine erste kleine nukleare Explosion in das Natrium, das eine Temperatur von 800 – 1.000° hat, hineingeschleudert wird, dann verdampft das Natrium explosionsartig. Die dadurch entstehende Druckwelle kann die Brennstoffteile in viel stärkerem Maße verdrängen als dies bei der ersten Explosion möglich ist. Dabei entsteht eine kritische Masse. Sie explodiert umso heftiger, je größer die Wucht ist, mit der sie zusammengepreßt wird. Solche Natriumdampfexplosionen werden in dem Lehrbuch über Reaktortechnik von D. Smidt (Mithrad der Reaktorsicherheitskommission) beschrieben (18). Smidt kommt zu dem Ergebnis, daß solche Explosionen starke Auswirkungen auf die Baustruktur haben können.

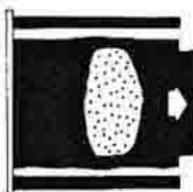
Die viel wichtigere Frage – ob dadurch nämlich eine verheerende zweite Explosion gezündet werden kann – untersucht Smidt jedoch nicht. In einem internen Bericht des „Argonne National Laboratory“ (dem Labor, das mit der Sicher-

### Natriumdampfexplosion

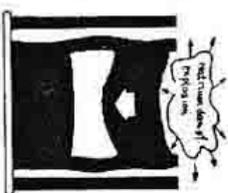
geschmolzener Brennstoff  
(darin Brennstoffdampf)



Nach einem Schmelzen des Kerns bildet sich eine kritische Masse. Es kommt zu einer Explosion von einigen kg TNT.



Dadurch wird die geschmolzene Brennstoffmasse auseinandergeschleudert. Der obere Teil kommt mit dem Kühlmittel Natrium in Berührung.



Kommt geschmolzener Brennstoff (schweres Metalloxid) bei Temperaturen von 3 000 – 5 000 °C mit flüssigem Natrium von 800 – 1 000 °C in Berührung, so kommt es zu einer Natriumdampfexplosion. Durch eine solche Explosion wird möglicherweise der nach oben fliegende Brennstoff mit großer Geschwindigkeit wieder in den Reaktorkern zurückgeschleudert.

Wegen der großen Wucht, mit der die kritische Masse gebildet wird, kann es zu einer verheerenden zweiten nuklearen Explosion kommen. Mit einer Stärke von ca. 4 500 kg TNT würde ihr keine Schutzhülle standhalten.



Ereignisablauf nach R. Webb "Accident Hazards of Nuclear Power Plants" (13)

Abb. 11 Natriumdampfexplosion

### Kleinere Leistungsexkursion am Rande des Reaktorkerns erzeugt verheerende nukleare Explosion

a) Am Rand des Reaktorkerns kommt es zu einer örtlichen Überhitzung. Dies kann zum Beispiel, wie beim Fermireaktor, durch Verstopfen der Kühlmittelkanäle geschehen.



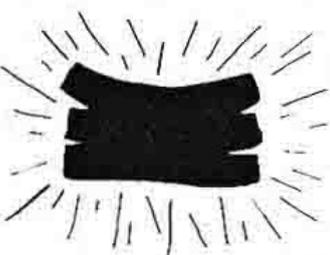
b) Die Brennstäbe schmelzen teilweise zusammen, dadurch konzentriert sich der Brennstoff und bildet eine überkritische Masse.



c) Die Folge ist eine Leistungsexkursion mit einer "kleinen" Explosion.



d) Die Explosion sprengt den Rest des Reaktorkerns mit hoher Geschwindigkeit zusammen. Die Folge ist eine atombombenähnliche Explosion.



Für den Reaktor in Kalkar schätzt R. Webb die Explosionsstärke folgendermaßen ab: Für den Fall in Abb. d) ergibt sich mindestens eine Explosionsstärke von 5 000 MWsec (= ca. 1 200 kg TNT), aber im ungünstigsten Fall ein Wert von 24 000 MWsec (= ca. 5 500 kg TNT) (11).

Abb. 12 Kleinere Leistungsexkursion am Rande des Reaktorkerns

heißforscherung für schnelle Brüter von der amerikanischen Atomindustrie beauftragt ist) wird für einen Testreaktor von 400 MW thermischer Leistung die Stärke für eine solche, durch eine Natriumdampfexplosion hervorgerufene atomare Explosion abgeschätzt. Sie entspricht einer Explosionsstärke von 525 TNT (19). Für einen größeren Reaktor sind entsprechend schwerere Explosionen zu befürchten, da hier mehr Brennstoffmasse vorhanden ist. Der jetzt im Bau befindliche Reaktor in Kalkar ist doppelt, der Superphenix siebeneinhalb mal so groß.

R. Webb, ein amerikanischer Experte für schnelle Brüter und Gegner des Brüterprogramms, macht ebenfalls Abschätzungen über die Explosionsstärke in einem solchen Fall. Bei einem Brüter von 1.000 MW elektrischer Leistung kommt er auf 4.500 kg TNT (20). Einer solchen Explosion würde keine Betonwand oder Schutzhülle standhalten.



Diese Schilderungen eines Unfalls in einem schnellen, natriumgekühlten Brüter haben in vielen Punkten spekulativen Charakter, doch sie zeigen deutlich, wo die Schwierigkeiten liegen. Die großen Natriummengen und relativ geringe erste atomare Explosionen sind mögliche Zündsätze für atomarenähnliche Explosionen.

Welche Schwierigkeiten bei einer exakten Vorhersage eines Unfallablaufes bestehen, beschreibt R. Webb: „Wegen der extremen Kompliziertheit kann eine Vorhersage einer Leistungsexkursion nur mit zahlreichen mathematischen Vereinfachungen gemacht werden. Der Fehler dieser Vereinfachungen kann nur in maßstabgetreuen Versuchen bestimmt werden, die alle Reaktorsysteme und Komponenten einschließen, denn sie alle beeinflussen die Bewegung des Brennstoffes und der Kühlung. Ein angemessenes Testprogramm ist jedoch wegen der immensen Kosten und der extremen Gefährlichkeit

### Herunterfallen schwerer Brennstoffteile

Der Reaktorkern wird von einer ersten Explosion auseinander gesprengt. Durch die Schwerkraft fällt ein Teil des Brennstoffes auf den Boden des Reaktorbehälters zurück. Die Wucht des Aufpralls löst eine zweite, heftigere nukleare Explosion aus. R. Webb schätzt für Kalkar im Fall einer solchen Explosion eine Explosionsstärke von über 600 kg TNT (2.700 MWsec) (11). – Auf solche Art erzeugte, zweite Explosionen werden auch von Wissenschaftlern der Atomindustrie untersucht (z. B.: „Argonne National Laboratory“ (17))

Abb. 13

nicht durchzuführen“ (21). Welchen Stand die Sicherheitsuntersuchungen der Atomindustrie haben, zeigt ein Auszug aus einem Referat von Sicherheitsexperten des Kernforschungszentrums Karlsruhe. Das Referat wurde für die Reaktortagung 1977 erstellt. Die Autoren meinen, daß „auf der Basis heutiger Kenntnisse milde Störfallabläufe realistisch erscheinen . . . .“. Keine exakten Ergebnisse, sondern nur Vermutungen. Weiter heißt es, daß solche Untersuchungen „für die Nachexkursionsphase bisher kaum quantitativ angegangen . . . .“ wurden. Nicht einmal Rechnungen können vorgelegt werden für die besonders wichtige Phase vor der zweiten Explosion. Mit experimentellen Untersuchungen an kleinen Modellen steht es noch schlechter. „Für die erforderlichen Testeinrichtungen laufen z. Z. (1977) umfangreiche Planungen. Also: die Experimente sind erst in der Planung – sie wurden bisher praktisch nicht durchgeführt. „Nach einer experimentellen Absicherung von Einzelphänomenen hofft man . . . letztlich zeigen zu können, daß hypothetische Störfälle . . . beherrschbar sind“ (22). Diese Hoffnung reicht offensichtlich der Atomindustrie aus, um ihr Reaktorprogramm durchzuführen.

### Störfälle, die zum Zusammenschmelzen des Reaktorkerns führen.

Im vorigen Kapitel wurde beschrieben, wie ein Schneller Brüter reagiert, wenn den Technikern der Spaltprozess außer Kontrolle geraten ist: Schmelzen und atomarenähnliche Explosionen sind die Folge. Jetzt soll die Frage beantwortet werden, welche Störfälle im Brüterreaktor dazu führen, daß die Spaltung außer Kontrolle gerät. Dazu ist es notwendig, etwas genauer auf die Steuerung eines Reaktor einzugehen. Man erkennt dann, daß Sekunden entscheiden, ob ein kleiner Zwischenfall zu einer Katastrophe wird. Niemand kann dann garantieren, daß in so kurzer Zeit die richtige Entscheidung getroffen und der richtige Handgriff getan wird. Verschiedene Unfälle in schnellen Brütern zweiglen eher das Gegenteil.

Wie die Steuerung eines Reaktors funktioniert:

Überläßt man eine kritische Masse spaltbaren Materials sich selber, so nimmt die Zahl der Neutronen, die neue Atome spalten können, ständig zu. Dies deshalb, weil bei der Spaltung eines Atoms ein Neutron verbraucht wird, dagegen zwei bis drei Neutronen entstehen. Mit der Zahl der Spaltungen pro Sekunde wächst die freierwerdende Energie lawinenartig an.

Ein vereinfachtes Beispiel:

Ist das Verhältnis von freierwerdenden zu verbrauchten Neutronen 2 : 1 und werden zu Anfang (1. Generation) 1.000 Atome gespalten, so werden 2.000 Neutronen frei, die (vernachlässigt man einmal die Neutronenverluste) 2.000 weitere Atome in der 2. Generation spalten, wobei 4.000 Neutronen freiwerden usw. Nach 10 Spaltungsgenerationen hat man bereits 1.024.000 Neutronen. Um einen Reaktor in gleichbleibendem Zustand zu erhalten, fängt man einen Teil der Neutronen durch neutronenauffangende Materialien (die Steuerstäbe) ab, so daß pro Spaltung (bei abgerechneten Neutronenverlusten) nur noch ein Neutron für die nächste Spaltungs generation übrigbleibt. Da aber die Zeit zwischen zwei Spaltprozessen viel zu kurz ist, um die Neutronenvermehrung noch bremsen zu können, läßt man die Steuerstäbe stets soweit im Kern, daß im Durchschnitt pro Spaltprozess weniger als ein Neutron für eine neue Spaltung zur Verfügung steht. Der Reaktor würde jetzt schnell ausgehen (die freien Neutronen werden immer weniger), wenn nicht die Spaltprodukte des Urans bzw. Plutoniums durch ihren radioaktiven Zerfall selbst noch Neutronen beisteuern würden. Diese machen das Verhältnis von verbrauchten zu freien Neutronen wieder zu eins. Dieser kleine Neutronenanfall (er beträgt 0,7% im Leichtwasserreaktor und 0,3% im Brüter) entsteht erst etwa  $\frac{1}{2}$  min nach der zugehörigen Uran- bzw. Plutonium-Spaltung. Deshalb heißen diese Neutronen im Gegensatz zu den unmittelbaren Spaltneutronen auch „verzögerte Neutronen“ (Abb. 14).

# WAS IST EIN VERZÖGERTES NEUTRON ?

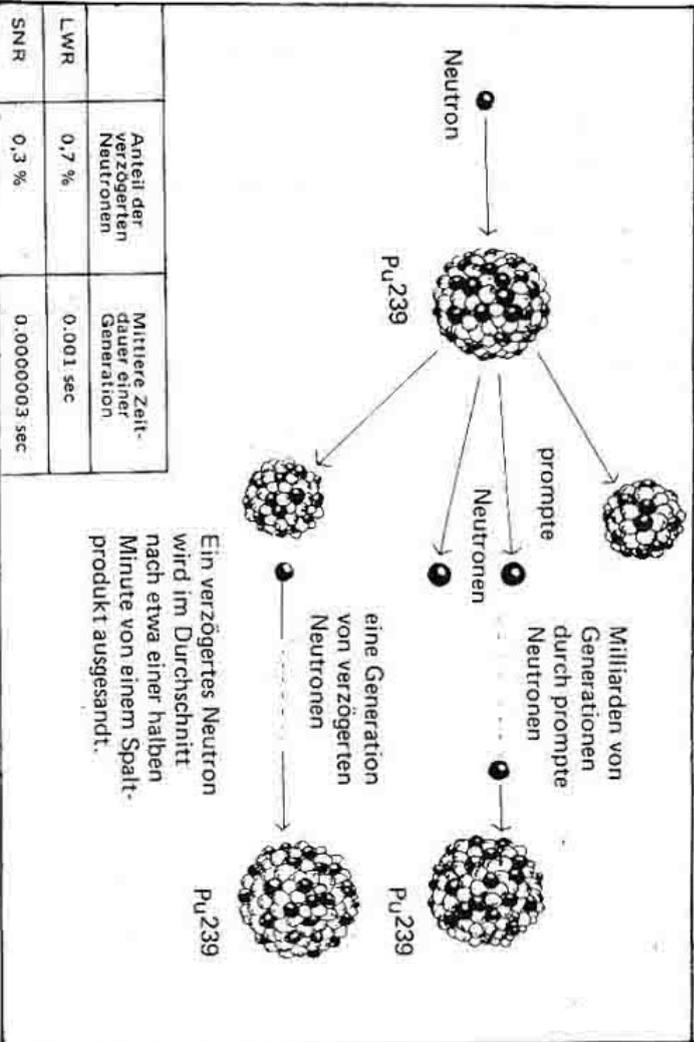


Abb. 14: Was ist ein verzögertes Neutron?

Da jetzt diese verzögerten Neutronen den Reaktor erst kritisch machen (d.h. die Kettenreaktion läuft erst bei ihrem Freiwerden ab), haben die Techniker über eine halbe Minute Zeit zwischen der Messung der Neutronendichte im Reaktor und dem entsprechenden Ausfahren oder Einschleiben der Steuerstäbe. Im Unterschied zum Leichtwasserreaktor wirft der Schnelle Brüter jedoch bei der Steuerung zusätzliche schwerwiegende Probleme auf:

1. Da beim schnellen Brüter über die Hälfte weniger verzögerte Neutronen entstehen als beim Leichtwasserreaktor, muß man, damit der Reaktor kritisch bleibt, durch Herausziehen der Steuerstäbe viel näher an die Grenze heran, wo der Reaktor allein durch die unmittebar entstehenden Spaltneutronen kritisch wird. Wird diese Grenze aber überschritten, gerät die Kettenreaktion explosionsartig außer Kontrolle.
2. Wie eingangs gesagt, arbeitet ein schneller Brüter mit schnellen Neutronen. Dies bedeutet aber auch, daß die Zeit zwischen zwei Spaltgenerationen, die beim Leichtwasserreaktor etwa 1/1000 sec beträgt, beim Brüter noch 10.000 mal kürzer ist. Ein einmal ausgelöstes unkontrolliertes Anwachsen der Kettenreaktion und damit der Leistung geht beim Brüter also viel schneller und ist daher schlechter beherrschbar. Nun wird oft von den Befürwortern das Argument angeführt, daß eine sehr schnell ansteigende Leistungsexkursion auch sehr schnell wieder abfällt und daher wegen der kurzen Zeitdauer nur wenig

Energie frei wird, so daß unter diesem Gesichtspunkt der Schnelle Brüter gegenüber anderen Reaktoren einen Vorteil zu haben scheint. Dieses Argument stimmt aber nur zu einem kleinen Teil. Zwar gibt es beim Schnellen Brüter wie beim Leichtwasserreaktor physikalische Faktoren, die das Anwachsen der Kettenreaktion umkehren. Jedoch ist es beim Leichtwasserreaktor einfach, den Reaktor so zu konstruieren, daß die Leistungsexkursion auf jeden Fall frühzeitig beendet wird. Untersuchungen in den 60er Jahren haben dagegen gezeigt, daß es nicht möglich ist, den Reaktor des Schnellen Brüters so zu konstruieren, daß alle Faktoren, die eine Leistungsexkursion beeinflussen, bremsend wirken. Wissenschaftler des Kernforschungszentrums Karlsruhe bestätigen diese Ergebnisse schon 1970 (23).

## Was passiert, wenn bei einer Leistungsexkursion das Kühlmittel verdampft?

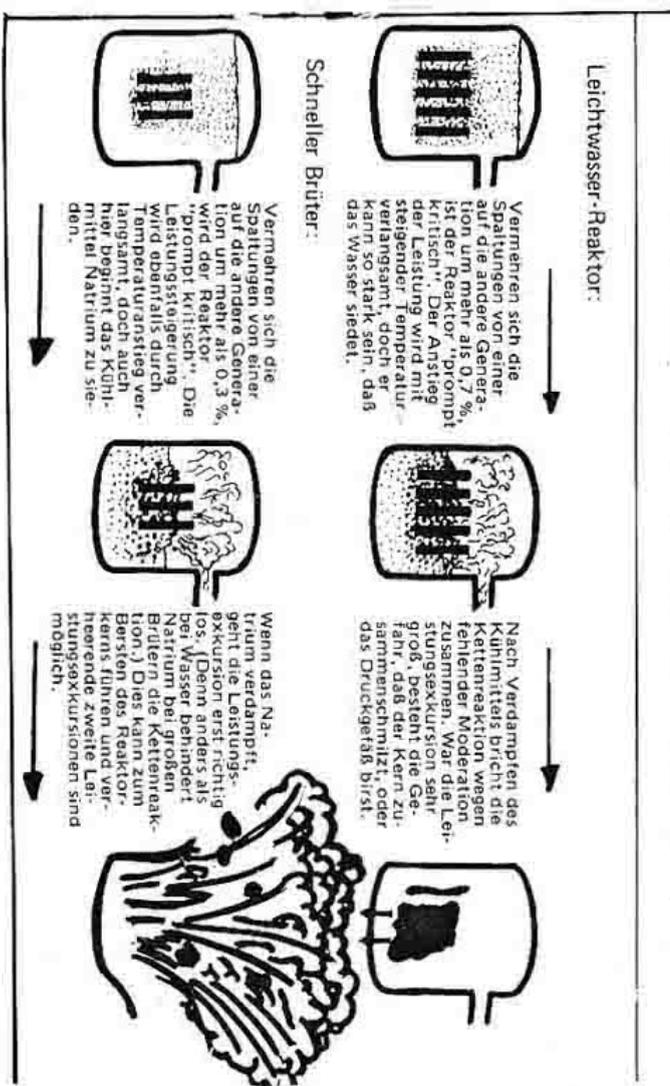


Abb. 15: Kühlmittelverdampfen beim Druckwasserreaktor und beim Brüter

Worum es dabei geht, wollen wir an einem sehr wichtigen Faktor (dem sog. Blaskoeffizienten) verdeutlichen: Kommt es beim LWR zu einer unkontrollierten Kettenreaktion, beginnt das Wasser um die Brennstäbe zu siedeln. Ohne flüssiges Wasser aber bricht hier die Kettenreaktion sofort zusammen (Blaskoeffizient negativ). In der Fachsprache nennt man diesen Sachverhalt zusammen mit anderen brensenden Faktoren die „inhärente Sicherheit des Leichtwasserreaktors“. Beim Schnellen Brüter aber ist das genaue Gegenteil der Fall. Verdampft das Natrium um die Brennstäbe, so geht die Kettenreaktion erst richtig los (Blaskoeffizient positiv). Deshalb ist zusätzlich zum geringen Sicherheitsabstand ein Durchgehen des Reaktors beim Brüter ungleich gefährlicher als beim LWR, (Abb. 15).

Was kann zum Kernschmelzen führen?

Ein Durchgehen des Reaktors bis zum Aus-einanderbersten des Kerns wird beim SNR-300 in Kalkar von den Behörden als Aus-legungsstörfall (=Größter Anzunehmender Unfall, der noch beherrscht werden muß) angesehen. Man geht dabei davon aus, daß die Pumpen des Primärkreislaufs versagen, während gleichzeitig beide Abschaltssysteme (Steuerstäbe) nicht eingefahren werden können, d.h. der Reaktor weiterläuft (24). Man sieht, daß selbst Hersteller und Be-treiber es durchaus für möglich halten, daß drei Systeme gleichzeitig versagen und ein Kern-Schmelzen bewirken. Wie aber im vorigen Kapitel gezeigt wurde, ist dabei durchgehende erste kleinere Exkursion eine starke Kernexplosion verursacht — und da-für ist der Reaktor nicht ausgelegt.

Doch gibt es neben den amtlich angenom-menen Voraussetzungen des GAU noch viele andere Unfallmöglichkeiten, die zum Schmelzen des Kerns führen können: So geschah es z.B., daß in einer kritischen Situation sowohl beim Fermi-Reaktor als auch beim EBR-1 die Steuerstäbe heraus-gezogen anstatt eingefahren wurden. Das war jedesmal ein entscheidender Faktor bei den Unfällen in diesen Reaktoren (25). So-wohl ein Fehler des technischen Personals, als auch Versagen der Steuerung selbst, kann Ursache sein.

Zusätzlich besteht die Möglichkeit, daß sich die Brennstäbe durch Überhitzen an einzel-nen Stellen so verbiegen, daß das spaltbare Material dadurch verdichtet wird. Aber be-reits eine Verdichtung um 2% genügt, um eine überkritische Masse zu erzeugen. Wie-der können die im vorigen Kapitel geschil-derten Abläufe die Folge sein. Das Verbie-gen der Brennstäbe hat jedoch noch eine andere Konsequenz: es kann bewirken, daß die Steuerstäbe nicht mehr eingefahren wer-den können, d.h. man kann den Reaktor nicht abschalten. Auch diese Unfallmög-lichkeiten sind nicht hypothetisch, sondern traurige Erfahrungen in der Geschichte des Schnellen Brütens, die reich an Beinahe-Katastrophen ist.

Wie schon erwähnt, rechnen die Betreiber selbst damit, daß die Primärkreisumpen versagen können. Was passiert aber, wenn z.B. die drei Dampferzeuger ausfallen? Dies wäre z.B. durch Lecks und nachfolgende Natrium-Wasser-Explosionen oder durch äußere Einwirkung (Flugzeugabsturz) mög-lich. Die Betreiber geben zu, daß nicht ge-klärt ist, ob ein solcher Fall nicht Rückwir-kungen auf die Zwischenwärmetauscher und damit auf den Primärkreislauf hat (26).

So etwa Druckwellen, die Rohre zerplatzen lassen, oder im schlimmsten Fall den Reak-torkern verformen. Aber selbst wenn dies nicht geschieht, ist die Kühlung des Reak-tors nicht mehr gewährleistet. In diesem Fall muß er Reaktor unter allen Umstän-den abschaltbar sein, wenn ein Kern-Schmelzen verhindert werden soll. Zur Ab-führung der dann weiter entstehenden Nachzerfallswärme steht beim SNR 300 ein Notkühlsystem zur Verfügung, das ge-rade in der Lage ist, die anfänglich entste-hende Nachzerfallswärme abzuführen. Das System ist zwar 6-fach vorhanden, hat aber durch die geringe Abführleistung keine Sicherheitsreserven mehr. Fällt also einer dieser 6 Notkühllaufe aus, so kann die Wärme bereits nicht mehr vollständig abge-führt werden, die Core-Temperatur wird an-steigen. Da im Innern der Brennstäbe ohne-hin eine Temperatur knapp unter dem Schmelzpunkt des Brennstoffes herrscht, genügt eine geringe Temperaturerhöhung, um diesen zum Schmelzen zu bringen. Eine weitere Schwäche des Notkühlsystems liegt darin, daß es voraussetzt, daß das Natrium im Reaktorkessel erhalten bleibt. Zwar ist der Kalkar-Reaktor so gebaut, daß das Natrium auch beim Bruch einer Primärleitung nicht aus dem Druckgefäß ausfließt. Man muß aber bedenken, daß diese Faktoren — Funktionen des Not-kühlsystems und genügend Natrium im Kern — über Wochen hin stabil bleiben müssen, damit es nicht zum Kern-Schmel-zen kommt.

Ausfließendes Natrium wird beim SNR 300 in großen Wannen aufgefangen. Auch hier kann ein Versagen nicht ausgeschlossen werden, speziell bei äußerer Einwirkung.

Die Folge wäre dann, daß das ausgeflosse-ne Natrium nicht mehr in den Primärkreis zurückgepumpt werden kann.

Aber nicht erst Natriumverlust oder Pum-penversagen führen zum Ausfall der Küh-lung. Es besteht z.B. die Möglichkeit, daß die Kühlmittelkanäle von Brennelementen verstopfen. Das wäre durch ein abgerisse-nes Blechstück (so beim Fermi-Reaktor), oder durch gelöste Schrauben möglich. Die Erfahrung zeigt, daß dieser Fall zumindest zu einer teilweisen Kern-Schmelze führt. Auch Betrüwerter sehen dieses Problem, wie ein Zitat aus dem Lehrbuch von D. Schmidt zeigt:

„Neben den bisher betrachteten, bei allen Reaktortypen vorkommenden Transienten (=Durchgehen des Reaktors d. Verf.) gibt es für den schnellen, natu-rumgekühlten Reaktor noch einen Son-derfall: Durch eine unentdeckte lokale Verstopfung einiger Kühlkanäle in einem Brennelement könnte es zu lokalem Sieden, lokalem Auströcknen (dryout), lokalem Brennstoffschmelzen und lo-kaler Brennstoff-Natrium-Reaktion mit mechanischen Auswirkungen kommen. Dadurch könnte eine Kavität mit posi-tivem Reaktivitätsbeitrag gebildet (d.h. die unkontrollierte Kettenreaktion setzt ein — d. Verf.) oder einige Ab-schaltstab-Führungsrohre verbogen wer-den“ (27).

Geht man davon aus, daß sich aufgrund eines Pumpenausfalles der Kern überhitzt hat, so kann das Wieder-Anlaufen der Pumpen, das in diesem Augenblick win-schenswert erscheint, den Unfall eher noch vergrößern: die Wucht des anströmenden Natriums kann den weichen Kern zusam-mendrücken, wobei die Folge wieder eine kleinere Atomexplosion wäre.

Es ließen sich noch viele Möglichkeiten auf-zählen, wie es in einem schnellen Brüter zu einem katastrophalen Unfall kommen kann. Gegen einige dieser Möglichkeiten wurden von den Erbauern auch Vorkehrungen ge-troffen. Aber diese sind z.T. ungenügend (das Notkühlsystem), oder wurden und-werden nicht eingerichtet, weil sie ökono-misch nicht tragbar sind. Bezeichnend da-

für ist ein Zitat von Wissenschaftlern der US-Reaktorfirma General Electric:

„Aus unserer Sicht ist es unwahrschein-lich, daß man in der Lage sein wird, eine Kernenergieanlage für den schlimm-sten möglichen Unfall, den die Naturge-setze zulassen, auszuliegen und gleichzei-tig ein ökonomisch interessantes System zu erhalten, auch wenn ein zusätzlicher ausgedehnter Aufwand an Forschung und Entwicklung getrieben würde.“ (28)

Viele der bestehenden Probleme, für die es keine Schutzmaßnahmen gibt, werden einfach unter den Tisch gewischt oder dem „Restrisiko“ zugeschlagen, das ohne Be-weis als vernachlässigbar ausgegeben wird. (Z.B. die berüchtigte zweite Explosion des überkritischen Kerns). Zudem wurden vie-le Schutzmaßnahmen erst geplant und ein-gebaut, als es bereits zu einem Unfall ge-kommen war, den man nicht vorausgese-hen hatte. Glücklicherweise kam es bis jetzt nie zu einer Katastrophe, wenn man auch oft genug nahe daran war. Bei den neuen großen Brütern kann man sich darauf nicht verlassen. So ist es einerseits unmög-lich, bei diesen Gefahren noch aus der Er-fahrung lernen zu wollen, denn „Erfahrung“ kann eine unüberschaubare Katastrophe be-deuten. Andererseits kann man nicht alle Ereignisabläufe in einem Reaktor kennen und Gegenmaßnahmen treffen. Eher das Umgekehrte gilt: die meisten Gefahren-möglichkeiten kennt man eben nicht. Und das ist gerade das Gefährliche.

Kein Computer ist in der Lage, ohne sehr große Vereinfachungen die Verhältnisse im Druckgefäß vor und nach einem Störfall wiederzugeben und kein Mensch wäre in der Lage, ein solches Rechenprogramm auf-zustellen. Entsprechende Experimente, die die Verhältnisse im echten Reaktor wieder-geben, sind viel zu gefährlich und undurch-führbar.

So baut die Reaktorindustrie ihr Sicherheits-konzept zu großen Teilen auf Vermutungen, Abschätzungen und Vereinfachungen auf. Bei einem solchen Vorgehen sind Schwie-rigkeiten natürlich leicht zu vertuschen. Wir können auch nicht erwarten, daß die-

genien, die am Verkauf der Reaktoren gut verdienen, ein Interesse daran haben, die anstehenden Probleme schonungslos offen zu liegen. Vor allem dann nicht, wenn das ihr ganzes Programm in Frage stellen würde.

**Die Gefährlichkeit des Kühlmittels Natrium**  
Eine weitere große Gefahrenquelle stellt die Verwendung von flüssigem Natrium als Kühlmittel dar. Während für Wasser als Kühlmittel seit mehr als 200 Jahren Erfahrungen existieren und trotzdem noch Kesselexplosionen, Ventilversagen und Undichtigkeiten auftraten, weiss man über Kühlung mit Natrium noch wenig. Zudem ist flüssiges Natrium in seiner Gefährlichkeit nicht mehr mit dem Wasserdampf der Leichtwasserreaktoren zu vergleichen.

**Natriumbürde**  
Mit Luft in Berührung gebracht brennt flüssiges Natrium bereits bei 140°C unter grosser Hitzeentwicklung, wobei hochgiftige Dämpfe von Natriumoxid entstehen. Sie wirken stark ätzend und dringen, auf die Haut gebracht, tief ins Gewebe ein. Bei der grossen Natriummenge, die in Brutreaktoren benötigt wird (ca. 5.000 Tonnen das sind 4,5 Mio. Liter im Superphenix in Malville) stellt die Möglichkeit solcher Brände eine unglaubliche Gefahrenquelle dar: trotz zahlreicher Untersuchungen auf diesem Gebiet existiert bis jetzt keine Mittel, um eine grössere Menge brennendes Natrium zu löschen (29). Dazu kommt noch die entstehende riesige Wolke von Natriumoxid, die weite Teile der Umgebung verlichtet und Menschen schwerste Schäden zufügen kann.

**Natrium — Wasserverreaktion**  
Ein weiterer Gefahrenherd ist die Reaktion von Natrium mit Wasser. Die Dampferzeuger sind hierfür die empfindlichsten Stellen, weil hier flüssiges Natrium und Wasserdampf nur durch die Wände des Wärmeaustauschers getrennt nebeneinander vorliegen. Um zu zeigen, um welche Dimensionen es hier geht, nehmen wir den Prototyp der zukünftigen Reaktoren, den

Superphenix in Malville als Beispiel: Er soll vier Dampferzeuger haben, von denen jeder 22 m hoch und 3 m im Durchmesser ist. Durch jeden dieser Türme fließen pro Sekunde 3,3 Tonnen (fast 3.000 Liter) flüssiges Natrium, das dabei eine Wärmeleistung von 750 MW abgibt. Dabei entstehen 6.400 Liter Wasserdampf. Schon die kleinste Leckstelle kann unter diesen Bedingungen grosse Unglücksfälle nach sich ziehen, denn bei der Reaktion von Natrium mit Wasser entsteht soviel Wärme, dass sich das Natrium leicht selbst entzündet. Zudem wird dabei ein grosses Volumen Wasserstoff frei, der mit dem Sauerstoff der Luft bekanntlich ein sehr explosives Gasgemisch bildet. So gehören die Dampferzeuger zu den empfindlichsten Teilen der Anlage und bereiten selbst den Wissenschaftlern im Dienste der Atomindustrie einiges Kopfzerbrechen. Das zeigt folgendes Zitat aus einem Vortrag von K. Traube (30): „Phenix (der kleine Bruder des Superphenix — d. Verf.) hat damit wohl recht augenfällig die bereits mit den Versuchsreaktoren gewonnene Erfahrung bestätigt, daß Natriumbürden im Kraftwerksbetrieb so zuverlässig arbeiten können wie andere Kraftwerkstypen. Das läßt sich so pauschal leider für die beiden anderen Prototypen, den russischen BN-350 und den britischen PFR nicht behaupten. Beide haben wegen Schäden an ihren Dampferzeugern noch nicht ihre volle Leistung erreichen können. Es sollte gleich hinzugefügt werden, daß Phenix durch eine einfache, aber nicht auf wirtschaftliche Grossanlagen extrapolierbare (=übertragbare) Dampferzeugerbauart ebenfalls den Beweis für die betriebstechnische Eignung zukünftiger Dampferzeuger schuldig geblieben ist.“ Dies ist ein Beispiel der für die Atomindustrie so typischen Verschiebungstaktik. Im Klartext besagt dieses

Zitat, daß funktionierender Dampferzeuger für Großreaktoren noch gar nicht existieren. Die Schwierigkeiten bei den angeführten Brüttern sind ebenfalls verhängnisvoll: Beim russischen BN-350 wurden durch Lecks in den Dampferzeugern und nachfolgende Natrium-Wasserverreaktion drei der

sechs Sekundärkreisläufe zerstört, der englische PFR hatte gleich zu Beginn schwere Schäden an seinen drei Dampferzeugern und konnte immer nur für kurze Zeit auf Teillast eingeschaltet werden (siehe Kapitel: Warum Schnelle Brüter?)

Daß die Reaktorindustrie mit noch mehr Schwierigkeiten bei den Dampferzeugern rechnen wird durch folgendes Zitat aus dem gleichen Aufsatz von Traube augenfällig demonstriert: „Während sowohl Kalkar (BRD) als auch Clinch River (im Bau befindlicher Brüter in den USA) die Dampferzeuger in viele kleine Einheiten aufzösen, will man bei Superphenix . . . den Schritt zu einer einzigen großen Einheit wagen (!) . . . Auf lange Sicht ist der bei Kalkar und anderen Prototypen gewählte Ausweg kleiner Modulen (=Einheiten) . . . wohl zu aufwendig. Das führt langfristig zu der Forderung absoluter Leckfreiheit, eine Forderung, die wohl in dieser Schärfe im Wärmetauscherbau kaum je gestellt worden ist.“

Also: der Rentabilität wegen wird die Atomindustrie wenige große statt vieler kleiner Dampferzeugereinheiten verwenden. Damit vergrößert sich aber wegen der riesigen Dimensionen auch das Ausmaß eines eventuellen Unfalles. Gleichzeitig wird das Auskoppeln eines defekten Dampferzeugers problematischer, es erfordert z.B. eine drastische Verringerung der Reaktorleistung. Für so große Dampferzeuger, wie sie in Malville verwendet werden, ist zudem eine vorherige Erprobung gar nicht mehr möglich und ihre Funktionsfähigkeit muß sich im Betrieb erweisen. Eine derartige Fahrlässigkeit dürfte in der Geschichte der Technik einmalig sein.

**Radioaktives Natrium**  
Ein Punkt, der die erwähnten Probleme noch vergrößert, ist die Tatsache, daß das Natrium des Primärkreislaufes durch Neutronenebeschuss aktiviert wird, wobei die radioaktiven Isotope Na-24 und in kleinerem Umfang Na-22 entstehen. Die dadurch entstehende Radioaktivität ist so hoch, daß selbst einige Tage nach Abschalten des Re-

aktors nur kurzzeitige Reparaturen am Primärkreislauf möglich sind. Zusätzlich ist das Primärkühlmittel von Korrosionsprodukten wie Mn-54, Co-60 und Co-58 stark verseucht. Modelversuche (31) haben ergeben, daß die Gamma-Aktivität, die allein von diesen Metallen verursacht wird, in 30 cm Abstand von der Isolierung der Hauptkühlmittelleitung noch 1,7 — 1,9 rem pro Stunde beträgt. Für die Reparaturarbeiten wurde diese bedeuten, daß sich ein Arbeiter nur 2 — 3 Stunden pro Jahr in dieser Zone aufhalten darf, um die zugelassene Jahresdosis nicht zu überschreiten. Um zu zeigen, daß es sich beim oben gesagten nicht nur um Spekulationen handelt, sollen Reaktorunfälle von US-Brüttern dargestellt werden.

#### Der Unfall des EBR-1 Versuchsreaktors (Nov. 1955)

Der EBR-1 war ein kleiner Versuchsreaktor an dem grundlegende Erfahrungen für den Bau von Schnellen Brüttern gewonnen werden sollten. Als Brennstoff war nicht Plutonium sondern hochangereichertes Uran-235 verwendet worden. Der Reaktor war aus Sicherheitsgründen sehr klein dimensioniert, wobei der Kern ein Volumen von nur 7 l hatte, der Reaktor eine thermische Leistung von 1,4 MW (Volumen des Superphenix: 10.000 l und 3.000 MW therm. Leistung). Als der Reaktor routinemäßig angefahren bzw. aufgeheizt wurde, zeigten die Temperaturmeßgeräte verwirrende Werte an. Es schien eine „Exkursion“ ein plötzlicher, starker Reaktivitätsanstieg stattzufinden. Für solche Fälle waren Regelstäbe vorgesehen, die sehr schnell in den Reaktor eingeschossen werden konnte. Durch das Versehen eines Technikers wurde diese Sicherung einige Sekunden zu spät eingeschaltet, sie blieb wirkungslos. Jede fünftel Sekunde verdoppelte sich die Leistung des Reaktors, die Zeiger der Instrumente sprangen über ihre Skalen. Erst das schnelle Entfernen des äußeren Mantels aus U-238, der als Neutronenreflektor wirkte, brachte den Reaktor wieder unter Kontrolle. In der Ventilation wurde Radioaktivität registriert.

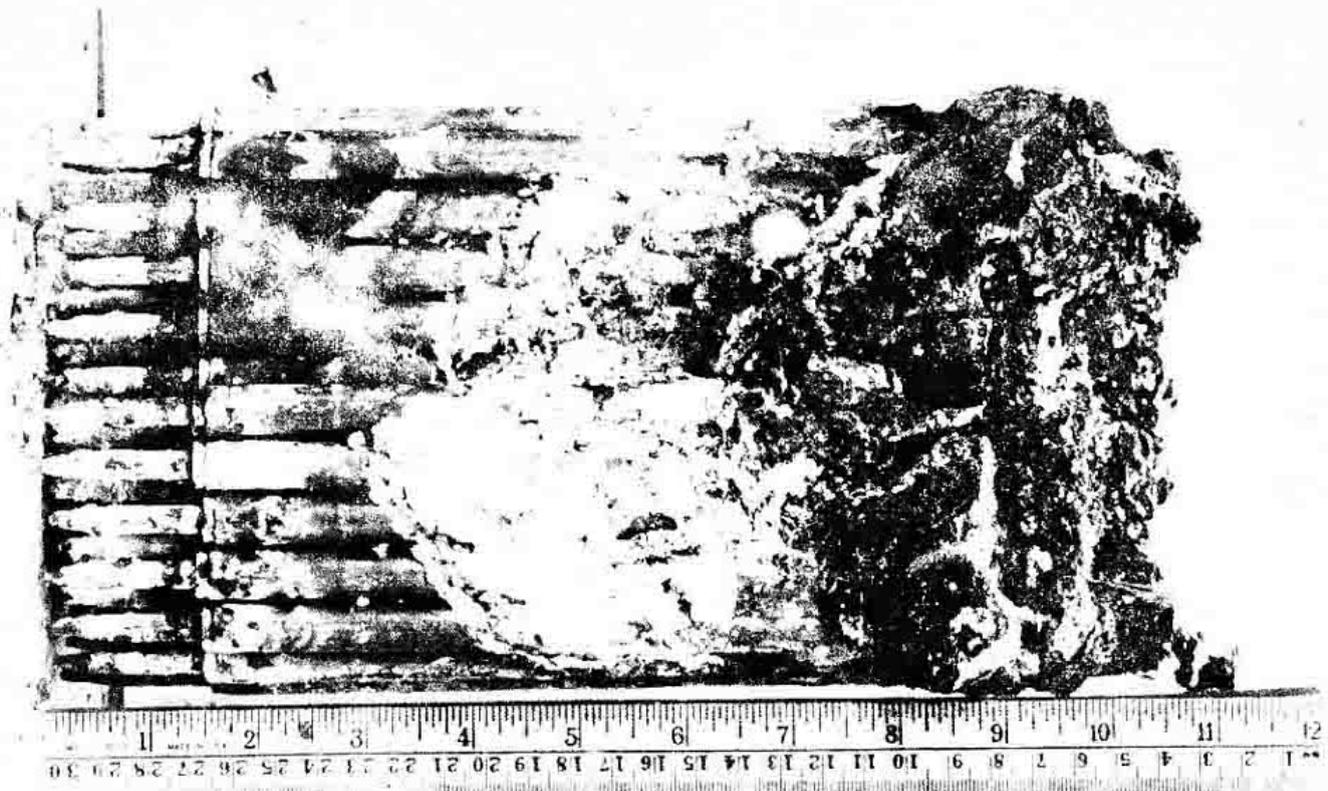


Abb. 16: Das geschmolzene Core des EBR-1

striert.

Fast der halbe Kern des Reaktors war geschmolzen, und hätte es nicht die Möglichkeit gegeben, den äußeren U-238-Mantel zu entfernen (bei großen Reaktoren ist dies nicht möglich!), wäre 1/2 Sekunde später der Spaltprozeß endgültig außer Kontrolle gewesen. Als Unfallursache stellte sich heraus, daß sich die Brennstäbe wegen der Wärmeausdehnung beim Aufheizen des Reaktors verbogen hatten. Dadurch wurde der Brennstoff enger zusammengepreßt, die Reaktivität stieg stark an.

Trotz aller Geschicklichkeit und Vorsorge konnten hier menschliche Fehler nicht ausgeschlossen werden. Hätte es sich beim EBR 1 um einen großen kommerziellen Brutreaktor gehandelt, hätte der Unfall katastrophale Ausmaße angenommen.

#### Der Unfall am Fermi-Reaktor (Okt. 1963)

Trotz der schlechten Erfahrungen am EBR-1 wollte die AEC (US-Atombehörde) das Projekt eines großen Brutreaktors zügig in die Tat umsetzen. Ihr eigenes Beraterkomitee lehnte den Bau des Fermi-Reaktors (nahe der Stadt Detroit) aus Sicherheitsgründen ab. Der Brief wurde aber sowohl der Öffentlichkeit als auch dem US-Senat vorenthalten. Der Reaktor wurde gebaut, obwohl inzwischen 2 wissenschaftliche Studien vorlagen, die die Folgen eines Reaktorunfalles am Fermi-Projekt abschätzten: 40.000 – 100.000 Soforttote, 200.000 – 300.000 Schwergeschädigte. Trotz dieser Voraussagen und trotz inzwischen zahlreicher Proteste erlaubte der Oberste Gerichtshof der USA den Bau. Nach vielen anfänglichen Pannen ereignete sich im Oktober 63 ein erster Zwischenfall. Wieder zeigten die Meßinstrumente verwirrende Werte an, die Kerntemperatur war stark erhöht. Der Reaktor wurde ab-

geschaltet, als alle Anzeichen auf ein Schmelzen des Kerns hindeuteten. Niemand wußte, was im Reaktor passierte und ob sich ein Folgeunfall riesigen Ausmaßes ereignen konnte. Die entsetzliche Ungewißheit dauerte Wochen. In einem Handbuch für Kernkraftwerksingenieure heißt es dazu:

„Bei einem schnellen Reaktor darf man nicht voraussetzen, daß die Entwicklung eines Reaktorunfalles mit dem allgemeinen Schmelzen oder dem thermischen Versagen von Spaltstoffelementen abgeschlossen ist. Man muß im Gegenteil damit rechnen, daß der erstere Teil des Unfalles erst an dieser Stelle beginnt.“

Sowohl McCarthy, der leitende Ingenieur des Projekts, als auch Nobelpreisträger Hans Bethe, der Berater des Fermi-Teams, hatten eine Schmelzen des Kerns für unmöglich gehalten. Beide waren Experten, beide hatten sich geirrt. Kleinere Strahlungsmissionen traten aus dem Reaktor aus, aber kein Mensch in Detroit, der nächstliegenden Großstadt, hatte eine Ahnung von der drohenden Gefahr.

Nach monatelanger Detektivarbeit schließlich wurde die Ursache gefunden: ein im Reaktorkessel eingenietetes Blech hatte sich gelöst und für zwei der 105 Brennelemente den Kühlfluß blockiert. Obwohl der Reaktor nur mit 15% seiner Leistung lief, schmolzen die Elemente zusammen. Nach der Neuinbetriebnahme 1970 gab es erneute Unfälle (Natrium-Wasser-Explosionen z.B.) bis der Reaktor endgültig stillgelegt wurde. Heute ist der Fermi-Reaktor eine strangbewachte, radioaktiv verseuchte Ruine, die nicht abgetragen werden kann. (32).

## Gesundheitsschäden durch Plutonium

Wie wir gezeigt haben, können die riesigen Mengen von Plutonium-239, die in einem Schnellen Brüter enthalten sind, in die Umwelt entweichen. Plutonium ist eines der stärksten Gifte, das wir kennen. Es ist wesentlich giftiger als Cyankali! Wird ein Gebiet durch Plutonium verseucht, dann sind die Folgen für die dort lebenden Menschen noch verheerender als die Auswirkungen der TCDD-Verseuchung in Seveso (Italien, 1976)! Schon ein Millionstel Gramm Plutonium-239 kann im Körper eines Menschen tödliche Schäden verursachen. Deshalb können Untersuchungen über seine Giftigkeit nur an Tieren ausgeführt werden oder an Arbeitern, die durch ihre Tätigkeit mit Plutonium verseucht werden.

In den USA ließ man 62 Jagdhunde (Beaglehunde) geringe Mengen an Plutonium ( $^{239}\text{PuO}_2$ ) einatmen (5 Milliardstel bis 1 Millionstel Gramm pro Gramm Lunge). Nach 200 Tagen waren 40 Hunde an Lungenversagen gestorben. Nach 4 1/2 Jahren hatten alle der 22 noch lebenden Hunde Krebsgeschwülste in der Lunge (33).

Die amerikanischen Wissenschaftler W.J. Bair und R.C. Thompson — beide Mitglieder der „Internationalen Strahlenschutzkommission“ (ICRP) — schreiben dazu (34):

„Diese Daten sind schwer zu interpretieren, weil selbst bei der geringsten Menge von eingeatmetem  $\text{PuO}_2$ , die getestet wurde, das Auftreten von Lungentumoren praktisch 100% war... Wenn man die Lebenserwartung von Beaglehunden in diese Ergebnisse mit einbezieht, dann kann man daraus den Schluß ziehen, daß eine Menge von mehr als 1 Nanocurie pro Gramm den vorzeitigen Tod durch Lungenkrebs verursachen kann.“

Das heißt 20 Milliardstel Gramm Plutonium-239 (etwa 1 Nanocurie) pro Gramm Lungengewebe bewirken, daß ein Jagdhund vor Ablauf seiner natürlichen Lebenserwartung an Lungenkrebs stirbt! Nach R.C. Thompson ist der Mensch noch um ein Vielfaches empfindlicher als diese

Hunde (35). Die noch größere Gefährdung von Kindern oder des Embryos im Mutterleib beispielsweise ist überhaupt nicht abzuschätzen.

Das bedeutet, daß auch die geringsten Spuren dieses Giftes eine tödliche Bedrohung für den Menschen darstellen.

Die unvorstellbar starke Giftigkeit des Plutoniums beruht auf der radioaktiven Strahlung, die es aussendet. Es strahlt Alphateilchen aus; die gefährlichste Strahlung überhaupt. Die Alphateilchen haben eine geringe Reichweite (0,04 Millimeter im Gewebe) und können von außen die Haut nicht durchdringen. Plutonium gelangt aber mit der Atemluft oder der Nahrung in den Körper hinein. Dort zerfällt es dann; das heißt es erzeugt die Alphateilchen im Körper selbst. Diese treffen die Zellen in direkter Nachbarschaft der Plutoniumatome und können bewirken, daß sie zu wuchern beginnen und schließlich einen Tumor bilden: Krebs.

Einmal im Körper eingelagert, bleibt Plutonium über Jahrzehnte dort und bildet so eine ständige Quelle für die tödlichen Alphateilchen. Auch diese Tatsache fand man wieder durch Versuche mit Jagdhunden (36). Ungefähr 100 Hunde mußten geringe Mengen von Plutoniumdioxid einatmen. Nach zehn Jahren befand sich noch 80% des Plutoniums, das sich ursprünglich in den Lungenbläschen abgelagert hatte, im Körper der Tiere. Es hatte sich jedoch auf weitere Körperorgane verteilt und auch diese in Mitleidenschaft gezogen: 10% waren in der Lunge verblieben, 45% war in Lymphknoten, 15% in die Leber und 5% in die Knochen gewandert. In all diesen Körperorganen erzeugt es wieder Krebs (Leukämie, Knochenkrebs, Leberkrebs usw.). Beim Menschen ist die Verweildauer im Körper noch wesentlich länger als bei Hunden (37).

## Wie gelangt Plutonium zum Menschen?

Beim Normalbetrieb, vor allem aber bei möglichen Unfällen entweicht Plutonium (und andere radioaktive Stoffe) aus dem Reaktor in der Hauptsache an die Luft. Mit der Atemluft gelangt es in die Lunge und von dort in andere Körperorgane.

Aus der Luft lagert es sich langsam auf dem Boden ab und verbleibt dort für Jahrzehnttausende. Wie alle radioaktiven Stoffe zerfällt auch Plutonium unter Aussendung radioaktiver Strahlung (Alphateilchen) in andere wiederum radioaktive Substanzen (z.B. Americium und Curium). Dieser Zerfall geht so langsam vor sich, daß nach 24.390 Jahren noch die Hälfte der ursprünglichen Menge vorhanden ist. Die Zerfallsprodukte Americium und Curium — in geringem Umfang auch Plutonium selbst — werden von Pflanzen aus dem Boden aufgenommen und erreichen mit der Nahrung wieder den Menschen.

Noch gefährlicher ist es jedoch, wenn das an Staubpartikel gebundene Plutonium vom Wind aufgewirbelt und dann eingeatmet wird. Gefährlicher deshalb, weil eingeatmetes Plutonium im Körper bleibt, zum größten Teil wieder ausgeschieden wird.

Die amerikanischen Wissenschaftler C.J. Johnson, R.R. Tidball und R.C. Severson (38) führten Messungen über die Plutoniumkonzentration in Staub in der Nähe des Rocky Flats Reaktors in Jefferson County, Colorado, durch, der zur Herstellung von Plutonium Atombomben dient. Durch verschiedene Unfälle wurden dort erhebliche Mengen Plutonium an die Luft abgegeben. Entsprechend den Windverhältnissen verteilt es sich auf dem Erdboden in der Umgebung des Reaktors (Abb. 17).

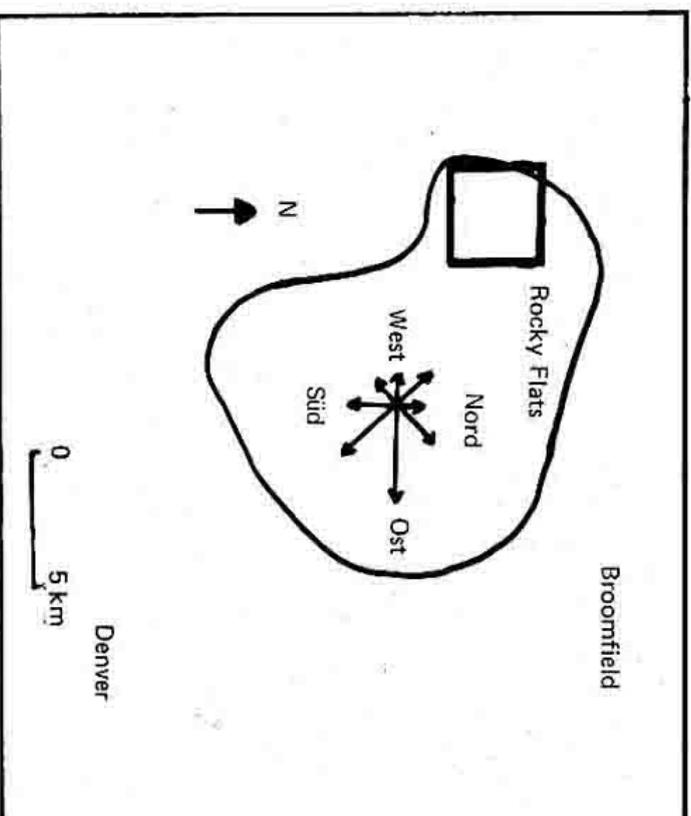
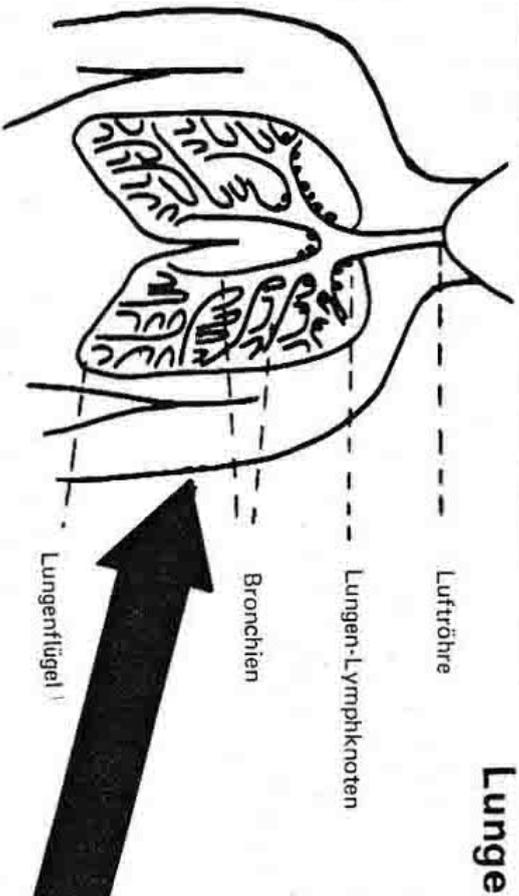


Abb. 17: Rocky Flats Plutonium-Fabrik, Colorado  
Ausbreitung des Plutoniums in Hauptwindrichtung  
(Ost und Südost).

# Plutonium im Menschen



Lunge

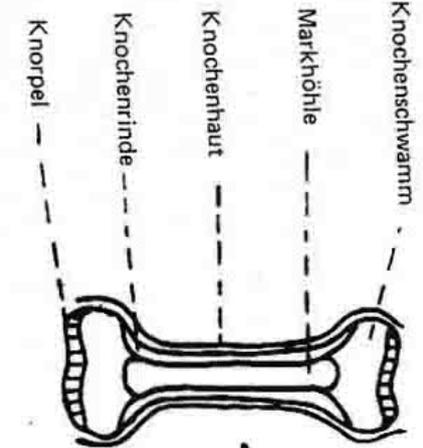
Lufttröhre

Lungen-Lymphknoten

Bronchien

Lungenflügel

Bevorzugter Aufenthaltsort des Plutoniums in der Lunge auf der Schleimhaut der Bronchien und der Verzweigungen der Bronchien. Bei bestimmter Teilchengröße Ablagerung in Lungenbläschen. Zellgewebe der Schleimhaut wird entweder völlig zerstört oder so geschädigt, daß die Zellen in Krebszellen umgebildet werden. So entsteht der am häufigsten auftretende Lungenkrebs, der Bronchialkrebs. Ins Zellgewebe der Lunge geratene Pu-Teilchen können durch Zellvorgänge in Lymphknoten gelangen, die außerhalb der Bronchien in den Zwickeln der Bronchialäste aufsitzen. Dort erzeugen sie sogenannten Lungen-Lymphknotenkrebs. Die Verweildauer des Plutoniums in der Lunge beträgt bei Tieren ungefähr 5 - 12 Jahre, beim Menschen kennt man die Verweildauer nicht genau. In den Lymphknoten bleibt das Plutonium sowohl bei Tieren als auch bei Menschen jahrzehntelang.



Knochen

Knochenhaut

Knochenrinde

Knorpel

Durch das Blut gelangt Plutonium bevorzugt in die Knochenhaut und ruft dort Knochenkrebs hervor.

Durch den Auf- und Abbau der Knochen wandert Plutonium im Knochen und kann Knochenkrebs hervorrufen. Plutonium kann jahrzehntelang in den Knochen eingelagert bleiben.

## Blut

Blut ist das Transportmittel für Plutonium. Plutonium gelangt besonders über die Lunge ins Blut, aber ebenso über Wunden in der Haut. Plutonium hält sich länger in menschlichem als in tierischem Blut auf (Die Gründe hierfür sind noch völlig unerforscht.) Blut verschleppt Plutonium in lebenswichtige Organe: Leber, Magen-Darm-System, Keimzellen, Knochen

## Haut

Die Alpha-Strahlung kann wegen ihrer kurzen Reichweite nicht in die Haut eindringen und die empfindlichen Zellteile der Haut schädigen. Verletzte Haut jedoch reagiert sehr empfindlich auf die Strahlung, so daß Hautkrebs gebildet werden kann.

## Magen - Darm - System

Plutonium wird fast völlig wiederausgeschieden. Gefahr: bei heranwachsenden Menschen kann sich Plutonium konzentrieren und frühzeitig Schäden anrichten. Besondere Gefahrenbereiche: Mund, Rachenraum, Speiseröhre, Magen, Darm

## Leber

Plutonium gelangt durch das Blut in die Leber und erzeugt in bestimmten Zellen Leberkrebs. Bei Tieren bleibt Plutonium ca. anderthalb Jahrzehnte in der Leber. Ungefähr die Hälfte des ursprünglich abgelagerten Plutoniums ist nach 8 Jahren abgebaut. Beim Menschen rechnet man für die Halbwertszeit des Plutonium in der Leber mit ca. 40 Jahren.

## männl. u. weibl. Keimzellen

Durch die Alpha-Strahlung Schädigung von Molekülen und damit Veränderungen der Erbinformation. Genetische Schäden durch Plutonium sind bisher wenig erforscht. Die Konzentrationen von Plutonium sind in den männlichen und weiblichen Keimzellen höher als in der Lunge (beobachtet an Tiersuchen).

Johnson und seine Kollegen stellten fest, daß das Plutonium hier in der Hauptsache an Staubteilchen mit einem Durchmesser von etwa 5 Mikrometer (5 tausendstel Millimeter) gebunden war. Diese Teilchen enthielten bis zu 380 mal mehr Plutonium als T eilchen gleicher Größe auf einem nicht verseuchten Gebiet\*). Das Verhältnissvolle: gerade Staubteilchen dieser Größe werden bevorzugt mit der Atemluft aufgenommen und im Lungengewebe eingelagert. Die plutoniumhaltigen Staubteilchen gefährden Kinder in besonders hohem Maße, da sie draußen spielen, mit staubigen Feinern essen und beim Spiel zusätzlich Staub aufwirbeln.

Über diese Wege (Nahrungskette und Staubteilchen) wird auch der Anteil des Plutoniums, der nicht sofort aus der Luft eingetragen wird, sondern sich am Boden lagert, ständig in den menschlichen Körper transportiert. So gefährdet einmal an die Umwelt abgegebenes Plutonium den Menschen über unabsehbar lange Zeit. Plutoniumverseuchte Gebiete sind deshalb über riesige Zeiträume unbewohnbar und über

noch längere Zeit landwirtschaftlich nicht nutzbar!

### Plutoniumverseuchung bei schweren Unfällen

Sehr hohe Freisetzung von Plutonium ist wegen der besonderen Unfallmechanismen beim Brüterunfall zu erwarten.

Wie hoch die Auswirkungen wären, wollen wir am Beispiel der Schnellen Brüter in Kalkar (im Bau) und Malville (ebenfalls im Bau) darstellen. Wir benutzen dabei ein Modell, das die Ausbreitung der radioaktiven Wolke berechnet. Es wurde von der Amerikanischen Physikalischen Gesellschaft entwickelt (39).

Die radiologischen Umrechnungsfaktoren wurden aus Arbeiten von Thorne und Venert (40), Cohen (41) und Gofman und Tamplin (42) entnommen. Für die Berechnung wurden die durchschnittlichen meteorologischen Werte der Amerikanischen Physikalischen Gesellschaft zugrundegelegt (1.100 m Durchschnittshöhe, 3,5 m pro Sekunde Windgeschwindigkeit, 0,2 m pro Sekunde Absinkgeschwindigkeit).

### Schäden durch Plutonium-Einatmung

Art des Schadens	Radiologische Umrechnungsfaktoren	SNR-300 100 % Freisetzung.	Superphenix 100 % Freisetzung.
Lungenkrebs	Thorne, Venert/ Cohen Thorne, Venert/ Gofman, Tamplin	42 000 820 000	77 000 1 500 000
Knochenkrebs	Thorne, Venert	16 500	30 600
Genetische Schäden	Thorne, Venert	1 700	3 100

Tab. 3

Die Schäden wurden bis zu einer Entfernung von 800 km aufsummiert (39).

Im Fall Kalkar wurde eine Bevölkerungsdichte von 300 Einwohner pro km<sup>2</sup>, im Fall Malville 150 Einwohner pro km<sup>2</sup> angenommen. Die Plutoniummenge wurde für Kalkar mit 28 000 Curie (1,24 Tonnen) Pu-239, für Malville mit 76 000 Curie (4,6 Tonnen) Pu-239 angenommen.

\*) Durch die Kernwaffentests ist Plutonium inzwischen überall in geringen Mengen vorhanden.

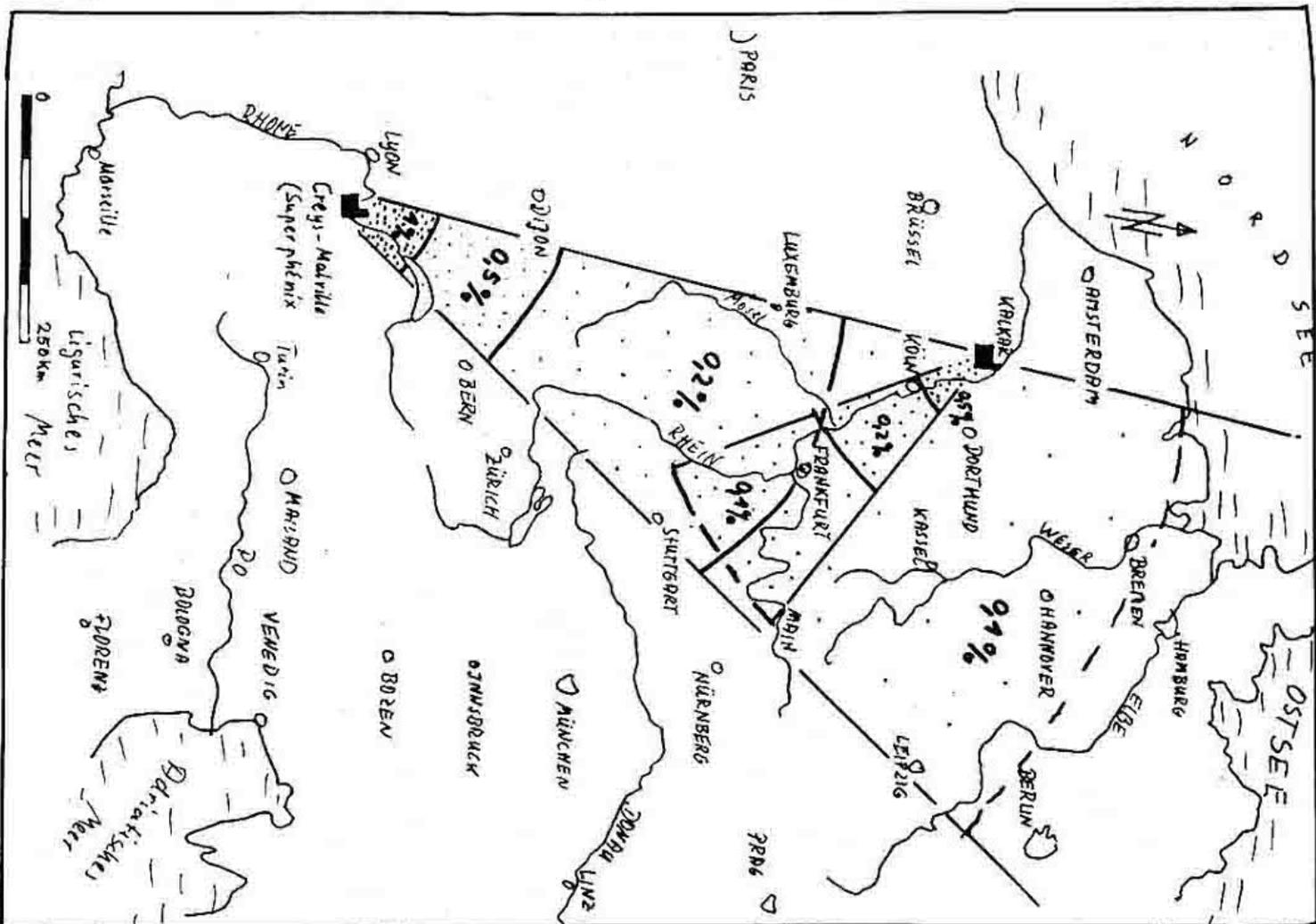


Abb. 19: Lungenkrebsrisiko für angenommene schwere Unfälle in Kalkar und Malville.

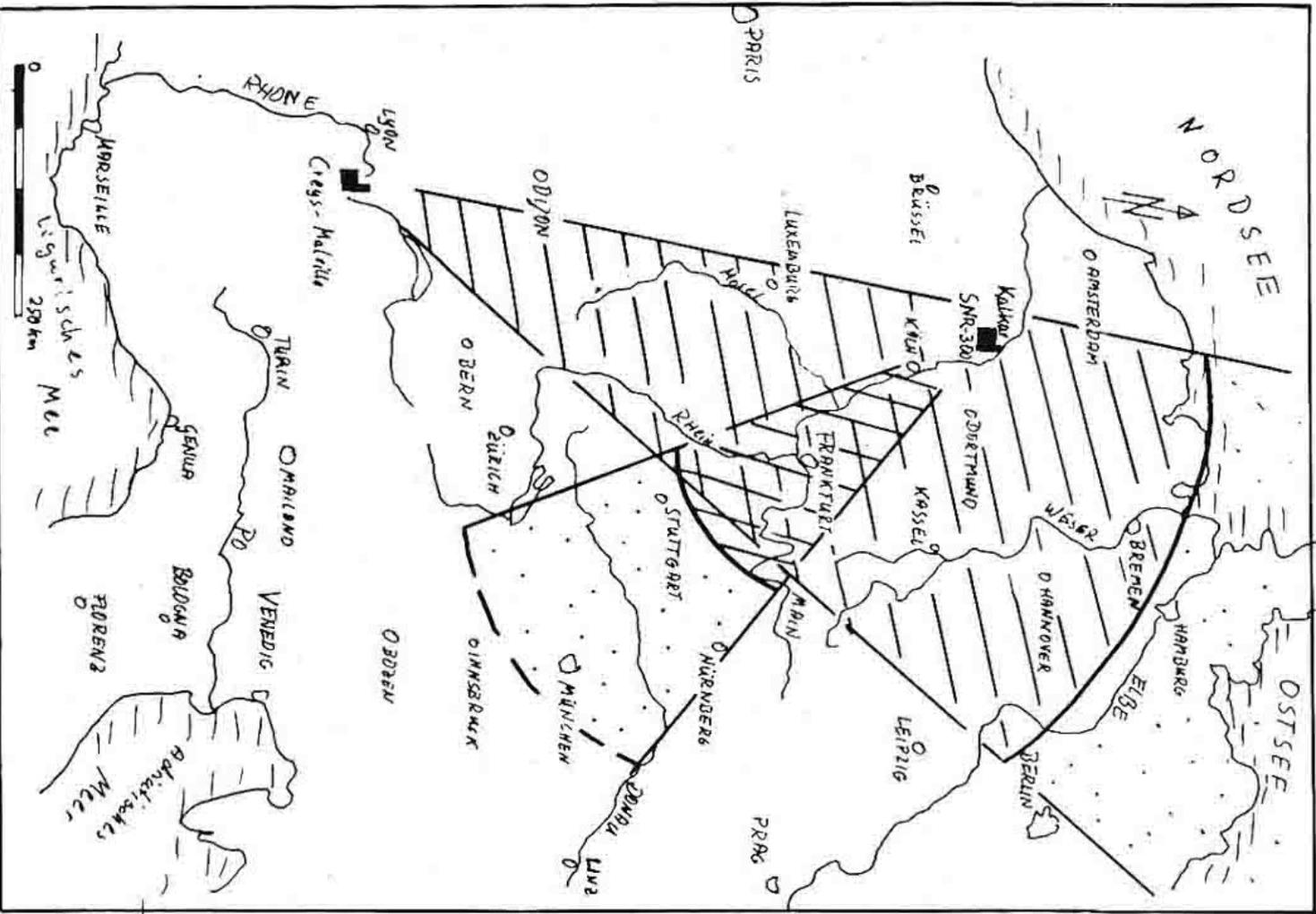


Abb. 20: Evakuierungsgebiet und landwirtschaftliches Sperrgebiet nach einem angenommenen schweren Unfall in Kalkar und Malville (Evakuierungsgebiet schraffiert, Sperrgebiet ge-

Ab-schätzung des Lungenkrebsrisikos in einem 300-Sektor nach dem Ausbreitungsmodell der APS

Lungenkrebsrisiko	1 %	0,5 %	0,2 %	0,1 %
Superphenix	140 km	250 km	560 km	930 km
SNR-300 Kalkar	40 km	80 km	180 km	340 km
7 600 Curie Pu				

Atmungsrate:  
Dosiskoeffizientfaktor:  
Dosiswirkungsfaktor:

0,23 ltr. pro Sek. (39)  
1,2 · 10<sup>9</sup> rem pro Curie (40)  
39 Lungenkrebsfälle pro Million man·rem; Faktor nach Cohen.  
Gofman-Tamplin Abschätzung ergibt 19,5 mal größeres Risiko!

Tabelle 4

In Tabelle 3 sind die unter diesen Voraussetzungen zu erwartenden Lungenkrebs-Toten und die Häufigkeit der gemischten Schäden zusammengefaßt. In Tabelle 4 sind die Lungenkrebsrisiken mit den radiologischen Faktoren von Cohen (Dosiswirkungsfaktor) angegeben. Benutzt man die Werte von Gofman, so ist das Risiko 19,5 mal größer. Das Lungenkrebsrisiko ist in Abb. 19 anschaulich dargestellt. Bei einem Unfall in Malville würden nach Cohen in Frankfurt (680.000 Einwohner) etwa 1.400, nach Gofman und Tamplin etwa 27.000 Menschen an Lungenkrebs sterben.

Die Auswirkungen des Plutoniums sind nicht auf Einatmung von Pu aus der vorüberziehenden Wolke beschränkt. Das Plutonium setzt sich am Boden ab und kann von dort noch nach Monaten und Jahren aufgewirbelt und eingeatmet werden. Deshalb ist ein vom Plutonium-Fall-Out versuchtes Gebiet über einen längeren Zeitraum nicht bewohnbar.

In der Rasmussenstudie werden Grenzwerte für Plutonium-239-Versuchung angegeben (43). In Abb. 20 sind die Entfernungen für die entsprechenden Grenzwerte aufgeführt.

**Plutonium am Arbeitsplatz**

Der Ausbau der Atomenergie führt dazu, daß in Zukunft eine Vielzahl von Arbeitern, Technikern und Ingenieuren an ihrem Arbeitsplatz in kerntechnischen Anlagen mit Plutonium in Berührung kommen (einatmen, Aufnahme durch kleine Wunden usw.). Aus diesem Grund hat die schon erwähnte „Internationale Strahlenschutzkommission“ (ICRP) Höchstwerte für die Aufnahme von radioaktiven Substanzen am Arbeitsplatz festgelegt. Für Plutonium-239 liegt dieser Grenzwert bei 40 Nano-Curie für die Arbeitszeit während des gesamten Lebens (50 Jahre). Für einen Plutoniumarbeiter bedeutet das: er darf während seines gesamten Lebens insgesamt weniger als 1 millionstel Gramm Plutonium in seinen Körper aufnehmen (genau 640 Nano-Gramm).

Mit der Frage, ob dieser Grenzwert einen Schutz für die Arbeiter bedeutet, beschäftigen sich auch die Mitglieder der „Internationalen Strahlenschutzkommission“ (ICRP) und der „Nationalen Strahlenschutzkommission“ (NCRP). (Beide Kommissionen sind verantwortlich für die Festlegung der Grenzwerte).

Zum Beispiel W.J. Bair und R.C. Thompson (44): „Unserer Ansicht nach werden die Plutonium-Grenzwerte innerhalb der nächsten wenigen Jahre geändert werden, und zwar in Richtung auf eine schärfere Kontrolle — das heißt: niedrigere erlaubte Grenzwerte, aber diese Veränderung wird wahrscheinlich nicht groß sein.“ Die englischen Radiobiologen M.C. Thorne und J. Vennart (45) vertreten eine ähnliche Auffassung und liefern außerdem Berechnungen über das Risiko. Sie errechneten für den Fall, daß 100.000 Arbeiter innerhalb von 50 Jahren dieser Menge von Plutonium in ihrem Körper ausgesetzt sind, jährlich 400 von ihnen an Krebs sterben werden. Dieses Risiko vergleichen sie mit der Anzahl von Todesfällen, die durch Aufnahmen der erlaubten Mengen von Radium-226 und Strontium-90 unter 100.000 Arbeitern jährlich zu erwarten sind. Das sind nach ihrem Rechenmodell 4 Todesfälle<sup>\*)</sup>. Sie kommen dabei zu folgendem Schluß: „Wenn wir davon ausgehen, daß das Risiko durch eine Belastung des gesamten Körpers mit 5 rem innerhalb eines Jahres für Arbeiter akzeptiert werden kann, dann müssen die jährlich erlaubten

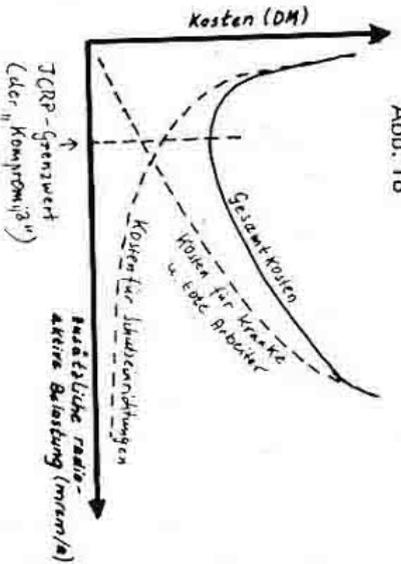


Abb. 18

\*) Radium-226 und Strontium-90 sind radioaktive Stoffe, denen die Arbeiter ebenso ausgesetzt sind wie dem Plutonium.

Aufnahmewerte für eingeatmetes unlösliches Plutonium um das fünffache heruntersetzt und diejenigen für Strontium-90 und Radium-226 je um das 50-fache erhöht werden.“

Das bedeutet nach ihren Berechnungen, daß von 100.000 Arbeitern, die diesen Konzentrationen ausgesetzt werden, jährlich an durch Plutonium erzeugtem Krebs nicht mehr 400 sterben würden, sondern 80. Dafür wird aber die Zahl der Krebstoten durch Radium und Strontium von 4 auf 200 ansteigen. Insgesamt gibt es also anstelle von 404 Toten dann „nur“ noch 280 auf 100.000 Arbeiter jährlich. Ein akzeptabler Wert? Zur Beantwortung dieser Frage steht man prinzipiell vor dem Problem: akzeptabel für wen? Die Atomindustrie geht davon aus, daß ihre Kraftwerke Gewinn bringen müssen, und zwar so viel wie möglich. Da Sicherheitseinrichtungen und Filter teuer sind, wägt man die Kosten gegeneinander ab, die einerseits durch die zu erwartenden Toten unter den Arbeitern und der übrigen Bevölkerung und andererseits durch den Einbau von Schutzeinrichtungen entstehen (Abb. 18).

Vorschlag der ICRP zur Bestimmung des Grenzwertes für die radioaktive Belastung von Arbeitern. Nach „Atomwille oder der Abschied von einem teuren Traum“, Arbeitsgruppe Wiederaufarbeitung an der Universität Bremen, ro ro aktuell A 4117.

### Krebskrankungen bei Plutonium-Arbeitern

oder

#### Die neutrale Wissenschaft

Die U.S. Transuranim Registry in Richland, Washington, registrierte bis heute 5.800 Arbeiter, die während ihrer Arbeit mit Plutonium in Berührung kamen. 819 von ihnen stimmten einer Autopsie (Untersuchung des Körpers nach ihrem Tod) zu. Inzwischen liegt der Bericht von Wissenschaftlern der U.S. Transuranim Registry über die ersten 30 Autopsien vor (46). Das Resultat: keine ungewöhnlichen Todesursachen!

Dr. Sidney M. Wolfe von der Forschergruppe für öffentliches Gesundheitswesen prüfte diese Ergebnisse nach und stellte fest: 11 der 30 Arbeiter hatten Krebs! Nach der Zahl der Krebskranken in der übrigen Bevölkerung hätten im Höchstfall 6 der Arbeiter Tumoren haben dürfen. Wolfe stellte weiterhin fest, daß nur einer der 11 an Krebs erkrankten einen höheren Plutoniumgehalt im Körper hatte, als erlaubt (40 nCi). Ein weiterer hatte etwas mehr als ein vierzigstel der erlaubten Menge (16 Milliardstel Gramm) und alle anderen weit weniger Plutonium in ihrem Körper! Wolfe schließt daraus, daß die erlaubte Belastung von Arbeitern durch Plutonium um etwa das Tausendfache zu hoch liegt! (47)

Die ICRP setzt also für jeden toten oder kranken Arbeiter einen Geldwert fest, den sie den Kosten der Atomindustrie gegenüberstellt. Den Grenzwert legt die Kommission dann so fest, daß sowohl die Kosten für Schutzmaßnahmen als auch die Kosten für das „Arbeitermaterial“ möglichst niedrig bleiben. Würde sie den Grenzwert erhöhen, dann müßten die Kraftwerksbetreiber zwar weniger Geld für den Einbau von Filtern und Schutzmaßnahmen aufwenden, die Kosten für die größere Zahl von toten oder kranken Arbeitern würden jedoch steigen. Wenn die ICRP umgekehrt den Grenzwert verringern würde, dann gäbe es zwar weniger Kranke und Tote, aber die Kosten für die Schutzmaßnahmen würden sprunghaft steigen. Das bedeutet: der

Strahlen„schutz“kommission geht es nicht in erster Linie darum, die Arbeiter und die übrige Bevölkerung zu schützen, sondern die Gesamtkosten so niedrig wie möglich zu halten. Übersteigt die Gefährdung der Arbeiter „zumutbare“ Risiken, dann heuern die Betreiber Obdachlose und Gelegenheitsarbeiter an, die aufgrund ihrer sozialen Stellung eine größere Bedrohung in Kauf nehmen müssen. So geschehen zum

Beispiel bei den Reinigungsarbeiten im Atomkraftwerk Gundremmingen nach dem letzten großen Unfall und mehrmals im Kernforschungszentrum Karlsruhe.

#### Der Streit um die „heißen Teilchen“ (hot particles)

Unlösliches Plutoniumdioxid (<sup>239</sup>PuO<sub>2</sub>), wie es aus Kernreaktoren in die Umwelt gelangt, wird mit der Atemluft in die Lunge transportiert. Dort liegt es nicht fein verteilt über die ganze Lunge vor, sondern konzentriert in kleinen Partikeln von bestimmter Größe und Aktivität — den hot particles (48) (Abb. 21).

Da die vom Plutonium-239 ausgesandten Alphateilchen im Gewebe nur eine sehr geringe Reichweite haben (0,04 Millimeter), werden nur die Zellen von ihnen getroffen, die in direkter Nachbarschaft der hot particles liegen. Wäre das Plutonium jedoch gleichmäßig über die gesamte Lunge verteilt, dann würden sie alle Zellen in gleichem Maß treffen.

Die amerikanischen Wissenschaftler Tamplin und Cochran stellten 1974 die Hypothese

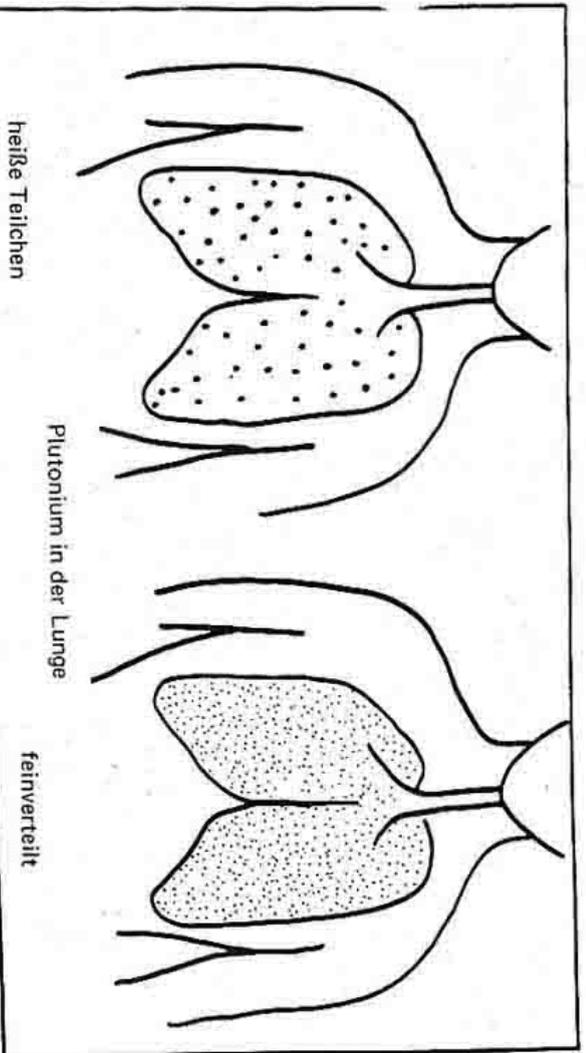


Abb. 21: Verteilung von Plutonium in der Lunge

auf, daß eine bestimmte Menge Plutonium konzentriert in hot particles ein wesentlich größeres Krebsrisiko darstellt, als die gleiche Menge über die ganze Lunge verteilt (49). Sie begründeten diese Aussage folgendermaßen:

Eine bestimmte Menge von Plutonium sendet auch eine ganz bestimmte Anzahl von Alphateilchen aus. Ist das Plutonium in hot particles konzentriert, dann treffen diese Alphateilchen viel weniger Zellen, als wenn es gleichmäßig über die gesamte Lunge verteilt vorliegen würde. Die wenigen Zellen werden jedoch von viel mehr Alphateilchen getroffen. Das heißt die Strahlendosis für die betroffenen Zellen ist im Fall der hot particle wesentlich größer als bei gleichmäßiger Verteilung des Plutoniums.

Über die Strahlendosis, die eine bestimmte Menge Plutonium erzeugt, wird das Krebsrisiko berechnet und daraus von der „Internationalen Strahlenschutzkommission“ (ICRP) die gesetzlichen Grenzwerte für die radioaktive Belastung des Menschen festgelegt. Die ICRP-Berechnungen gehen

davon aus, daß alle Lungenzellen die gleiche Strahlendosis erhalten. Der so festgelegte Grenzwert erlaubt eine etwa 2.000 mal größere Strahlenbelastung durch Plutonium, als wenn man das Rechenmodell von Tamplin und Cochran zugrunde legen würde! Die ICRP begründet diese Vorgehensweise damit, daß durch die hohe Strahlenbelastung in der Umgebung der hot particles die Zellen getötet würden und damit nicht mehr zu Krebszellen werden könnten. Um Krebs zu erzeugen müßte also die Strahlendosis so gering sein, daß die Zellen nicht getötet werden, gleichzeitig jedoch groß genug, um krebsartige Veränderungen in ihnen hervorzurufen. Das würde wiederum bedeuten, daß gleichmäßig im Körpergewebe verteilte Radioaktivität gefährlicher wäre als die gleiche Menge in hot particles konzentriert.

Welche der beiden Hypothesen wirklich zutrifft, kann nach den heute vorliegenden Forschungsergebnissen nicht entschieden werden. Erste Ansatzpunkte zugunsten der hot particle-Hypothese liefert allerdings eine Untersuchung von Little und

Mitarbeitern (50). Sie verabreichten Hamstern Polonium-210 (wie Plutonium-239 ein Alphastrahler) sowohl feinverteilt über die gesamte Lunge, als auch in kleinen Partikeln konzentriert. Dabei stellten sie fest, daß bei Kleinen Strahlendosen (15 bis 50 rad) der Effekt in beiden Fällen der gleiche war: etwa 10% der Tiere erkrankten an Lungenkrebs! Bei etwas höheren Dosen ergaben sich jedoch Unterschiede: eine Strahlendosis von 300 rad (mittlere Lungendosis) in hot particles erzeugte bei 62% der Tiere Krebs. Um denselben Effekt mit gleichmäßig verteilter Plutonium zu erzeugen, mußte Little die fünffache Strahlendosis verabreichen

**Erklärungen von Wissenschaftlern**

**Offener Brief von Genter Wissenschaftlern (CERN)**

An die Regierungen Frankreichs, Italiens und der BRD, welche am Bau des schnellen Brütters in Malville, Frankreich beteiligt sind, und an die schweizerische Regierung, welche durch die geographische Nähe des Projekts betroffen ist.

1. Obwohl wir auf diesem Gebiet nur zum Teil zuständig sind, sind wir uns doch als Vertreter der Wissenschaft der kollektiven Verantwortung bewusst, die die Wissenschaftler durch die Planung und die Ausführung der Projekte für schnelle Brüter auf sich genommen haben. Wie sind der Meinung, dass wir die Regierungen und die betroffene Bevölkerung aufmerksam machen müssen, welche zahlreiche Wissenschaftler gegenüber dem Projekt ries Schnellen Brütters Super Phenix geäußert haben. Die Bedenken, die nach unserer Meinung beachtet werden sollten, betreffen folgendes:

A - Die besonderen Risiken der mittels flüssigem Natrium gekühlten Schnellen Brüter, welche zu safetylich zu den bekannten Risiken der Reaktortypen mit langsamen Neutronen hinzukommen.

(1.500 rad mittlere Lungendosis)! Daraus kann man folgende Schlüsse ziehen:  
 1. Schon die geringsten Mengen an Alphastrahlern in der Lunge erzeugen Krebs. Gleichgültig, ob sie in hot particles konzentriert sind oder nicht.  
 2. Bei etwas höheren Dosen macht sich offenbar der Effekt der hot particles durch eine starke Erhöhung des Lungenkrebs bemerkbar.

Das bedeutet, daß das von der ICRP verwendete Rechenmodell das Lungenkrebsrisiko durch eingeatmetes unlösliches Plutonium möglicherweise bei weitem unterschätzt!

AA - Die Gewalt der mechanischen und chemischen Kräfte in einem sehr kompakten Kern mit sehr hoher Neutronendichte und sehr hoher Temperatur, was Probleme der langfristigen Widerstandsfähigkeit der Materialien aufwirft, selbst bei normalem Betrieb.  
 AB - Eine geometrische Anordnung die durch eine unerwünschte Strukturveränderung des Reaktorkerns zu einer unkontrollierten Kettenreaktion führen kann.  
 AC - Die hohe Giftigkeit des Plutoniums, welches schon durch einen Bruchteil eines Milligramms, der sich in der Lunge festgesetzt hat, krebserzeugend ist. Der Kern des Super-Phenix wird 4,600 kg davon enthalten. Bei einem Unfall kann das Plutonium als Aerosol in die Umgebung entweichen.  
 AD - Die zivile Verwendung des Plutoniums in grossem Maßstab wird seinen Missbrauch zu strategischen Zwecken erleichtern und kann deshalb sozial belastende Überwachungsmechanismen mit sich bringen.

AE - Die Gefahren, die dem Natrium innewohnen, welches bei Kontakt mit Wasser explodiert und mit Luft Feuer fängt, und dessen Brände schwer unter Kontrolle zu bringen sind. Der Phenix wird davon

5.000 Tonnen enthalten, wobei das Natrium des Primärkreises stark radioaktiv ist.

Diese Gefahren werden durch den technologischen Sprung von den 250 MW des Phenix (Experimenteller Reaktor in Avignon) auf die 1.200 MW des Super-Phenix und durch die geographische Lage im Zentrum einer dichtbesiedelten Gegend verschärft. Die Kernindustrie hat bisher noch nie einen Sprung von solchem Ausmaß erlebt.

## B. WIEDERAUFBEREITUNG UND ÜBERWACHUNG DER ABFÄLLE

1. Solange die industrielle Wiederaufbereitung des Brennstoffs der Leichtwasserreaktoren und später der Schnellen Brüter technisch, ökologisch und wirtschaftlich nicht bewältigt ist, kann die Versorgung der Schnellen Brüter nicht als gesichert angesehen werden.

2. Im Wiederaufbereitungsvorgang, der großtechnisch durchgeführt werden soll, wird das Plutonium nur zu ungefähr 99% gewonnen, während der Rest die Komponenten der langlebigen radioaktiven Abfälle darstellt. Im Schnellen Brüter wird fast das zehnfache Plutonium zur Wiederaufbereitung anfallen, verglichen mit den Leichtwasserreaktoren, was den abgeschlossenen „faustischen Pakt“ noch riskanter macht.

## C. GLOBALE ENERGIESTRATEGIE

Ernsthafte Zweifel sind am Vermögen der Kraftwerke vom Typ des Super-Phenix geäußert worden, genügend Plutonium zu erzeugen, um das Uran-235 abzulösen, einen Brennstoff, dessen Ausgehen gegen Anfang des nächsten Jahrhunderts allgemein vorausgesehen wird.

Vor allem droht die erneute Konzentration riesiger Mittel auf einen neuen Typ von Kernreaktoren, die Entwicklung eines glaubwürdigen und seriösen europäischen Forschungsprogramms zur Erschließung der erneuerbaren Energiequellen in Frage zu stellen. Nur auf diese Weise ist es möglich, ein langfristiges Wachstum zu gewährleisten, welches das klimatische Gleichgewicht der Erde nicht gefährdet.

3. Wir bedauern hinsichtlich des Projekts Super-Phenix:

a) Das Fehlen eines offiziellen und öffentlichen Berichts über das Projekt und seine ökologischen Auswirkungen.

b) Das Fehlen der Information der Öffentlichkeit und vor allem der Bevölkerung der Gegend von Malville die sich vor vollendete Tatsachen gestellt sieht.

c) Das fast vollständige Fehlen technisch zuständiger Fachleute, welche von den Kreisen, die am Bau der Werke direkt interessiert sind, unabhängig sind.

d) Wir sind der Ansicht, daß der Bau des Super-Phenix eingestellt werden sollte, damit

1. Die Bevölkerung vollständig und objektiv informiert werden kann.

2. Eine breite Diskussion eröffnet wird, zu der die Bevölkerung eingeladen wird, zu der die unabhängige Wissenschaftler teilnehmen können und welche die Mitbestimmung der betroffenen Bevölkerung zum Endziel hat.

3. Auf europäischer Ebene eine unabhängige und wissenschaftlich zuständige Stelle geschaffen wird, die in erster Linie die Aufgabe hätte, die Bilanz aus den Argumenten für und wider den Super-Phenix zu ziehen, eine Bilanz, die notwendigerweise widersprüchlich wäre und deren Schlüsse der Öffentlichkeit voll zugänglich gemacht würden.

## Erklärung von 28 Teilnehmern der „Internationalen Physiktagung Enrico Fermi“ in Varenna

Wir sind eine internationale Gruppe von Physikern, die in Varenna zu einer Tagung über Grundlagen der Physik zusammengetroffen sind. Wir sind nicht alle Experten auf dem Gebiet der Kernenergie, aber wir meinen, daß dies kein Grund ist, uns nicht zu einer Entscheidung von großer gesellschaftlicher und ökonomischer Tragweite zu äußern. Indem wir diese Erklärung verfassen, hoffen wir, die Aufmerksamkeit der Öffentlichkeit auf den Mißbrauch von „Experten“ in der Kernenergie-debatte zu lenken.

Die Atomenergieprogramme der europäischen Staaten haben eine Reihe von Problemen gemeinsam. Darunter die folgenden:

a) Sicherheitsprobleme, die besonders schwerwiegend im Fall des Schnellen Brüters sind. Brutreaktoren werden für die Fortschreibung der meisten Atomenergieprogramme als notwendig erachtet.

b) Die Gefahr der Verbreitung von spaltbarem Material und die große Gefahr in dem Fall, daß Kernergieanlagen in die falschen Hände geraten, machen es notwendig, die Atomindustrie mit Hilfe der Polizei gegen die Öffentlichkeit abzuschirmen. Obwohl die Kernindustrie zu den grundlegendsten Industrien unserer Gesellschaft gehört, ist sie von einer öffentlichen Kontrolle ausgenommen.

c) Atomwüst stellt eine Bedrohung für zukünftige Generationen dar.

d) Trotz dieser Schwierigkeiten hat kein europäischer Staat ein ernsthaftes Programm zur Entwicklung alternativer Energiequellen oder zur Förderung von Energieeinsparungen.

Noch bedrohlicher ist es, daß diese Probleme der öffentlichen Diskussion entzogen werden und einer Elite professioneller „Experten“ übergeben worden sind. Wir finden es wichtig, die Öffentlichkeit vor der Gefahr dieser Situation zu warnen. Die Übertragung der absoluten Entscheidungsgewalt auf eine solche Elite hat verschiedene ernste Konsequenzen:

1. Die Befürworter der Kernenergie akzeptieren und schätzen Wissenschaftler nur dann als „Experten“, wenn diese das Atomenergieprogramm generell für richtig halten. Zugleich wird jeder, der sich gegen die Kernenergie ausspricht, als „Laie“ disqualifiziert – unabhängig von seinen Kenntnissen und Einsichten.

2. Die Arbeitsteilung in der Wissenschaft ist viel weitgehender, als es gewöhnlich in der Öffentlichkeit bekannt ist. Deshalb kann kein Wissenschaftler alle Aspekte eines großen Atomenergieprogramms

wirklich kennen und beurteilen. Insbesondere gibt es keinen Experten für die gesamte Atomenergiefrage.

3. Aufgrund der vielen ungelösten Probleme ist im Augenblick eine befriedigende Lösung nicht möglich.

Die vielen Spezialisten auf diesem Gebiet sind unbedingt aufeinander angewiesen, wenn sie ein „Experten“-Gutachten abgeben wollen. Ihre Arbeit ist von vornherein voringenommen durch die Voraussetzung, daß die Nutzung der Kernenergie in großem Umfang technisch und ökonomisch durchführbar ist und daß es keine Alternativen gibt.

Die Ziele der europäischen Atomenergieprogramme sind angeblich notwendig und sachlich richtig. In Wirklichkeit ist der eingeschlagene Weg kein Beweis für unvoreingenommenes wissenschaftliches Denken; ein Beispiel dafür sind die unterschiedlichen Voraussagen über den zukünftigen Energiebedarf, die von Zukunftsplanern verschiedener Arbeitgeber angestellt werden.

Im Hinblick auf die ungelösten technischen Probleme und die politischen Folgen fordern wir die Regierungen mit Nachdruck auf, ihre Atomenergieprogramme zu reduzieren und im besonderen die Entwicklung der Schnellen Brutreaktoren zu stoppen.

Die Öffentlichkeit sollte die Gutachten von „Experten“ sehr kritisch beurteilen und nicht blindlings den Behauptungen von Menschen folgen, die angeblich „besser Bescheid wissen“.

Desweiteren fordern wir unsere Kollegen dringend auf, in die Auseinandersetzung einzuzugreifen und Lügen mit derselben Gründlichkeit zu entlarven, mit der sie sonst ihre wissenschaftliche Arbeit betreiben.

Varenna sul Lago di Como, 5. August 1977.  
Namentlich unterzeichnet von 28 Teilnehmern der Tagung.

Literatur:

- (1) Umschau 77 (1977): Energie-Rohstoffe: Wann kommt der Engpaß? Heft 15, S. 497
- (2) K. Traube (1976): Internationale Brutreaktorentwicklung. Atomwirtschaft Sept./Okt. 1976, S. 471
- (3) Kernforschungsanlage Jülich (1975): Studie 1220, Juli 1975
- (4) W. Häfelle u.a. (1970): Fast Breeder Reactors. Annual Review of Nuclear Science, Vol. 20, S. 399, Tab. 2
- (5) Badische Zeitung vom 20.8.1977
- (6) A. Brandstetter u.a. (1976): The tripartite fast breeder programme: a utility/industry view. Nuclear Engineering International, July 1976
- (7) D. Emendorfer/K.W. Höcker (1968): Theorie der Kernreaktoren Teil I. Bibliographisches Institut, S. 40, 41, Kapitel II
- (8) Ref. (2), Tabelle 1
- (9) aus: Ref. (2) (4) und
- a) George A. Venryes (1977): Superphenix: A Full-Scale Breeder Reactor. Scientific American, March 1977, Vol 236, Nr. 3
- b) J. Höchel u.a. (1972): Der Brennstoffkreislauf. Hrsg. Deutsches Atomforum, Bonn 1972, Tabelle 5
- c) CFDT (1975): L'Electronucleaire en France. Edition du Seuil, S. 53
- (10) WASH — 1400 (1975): Reactor Safety Study (Rasmussen-Report). United States Nuclear Regulatory Commission, Okt. 1975, Tab. VI 2-1
- Im Rasmussen-Report wird für Plutonium-Freisetzung 0,4% und für Strontium-Freisetzung 6% für ein Ausdampfen angenommen.
- (11) R. Webb (1977): Das Kernexplosionspotential des SNR 300 Flüssigmetall-gekühlten Schnellen Brütters in Kalkar. Westdeutschland
- (12) Report to the American Physical Society by the studygroup on light-water reactor safety. Review of Modern Physics, Vol. 47, Suppl. No. 1, S. 95. Dort werden Angaben über das Zusammenschmelzen von Leichtwasserreaktoren gemacht. Wegen der höheren Energiedichte des Schnellen Brütters sind die Zeiten noch viel kürzer.
- (13) R. Webb (1976): The Accident Hazards of Nuclear Power Plants. The University of Massachusetts Press, S. 120.
- (14) J.M. Morrelle u.a. (1976): The Kalkar Station, design and safety aspects. Nuclear Engineering International, July 1976. Die Angaben dort (150 MWsec und 370 MWsec) wurden durch die Verfasser umgerechnet.
- (15) R. Fröhlich u.a. (1975): Einfluß der axialen Expansionsrückwirkung auf den Verlauf des Kühlmitteldurchsatzrückfalles im SNR 300. Reaktortagung 1975, Bericht S. 137 (westdeutsche Untersuchungen über solche Explosionen), siehe auch Ref. (13)
- (16) Vgl. den in Ref. (15) zitierten Bericht von R. Fröhlich u.a. Dort steht folgendes: „... daher (wird) die eingangs erwähnte Möglichkeit des Durchlaufens weiterer nuklearer Exkursionen sehr unwahrscheinlich“, (also nicht ausgeschlossen, sondern nur wahrscheinlich)
- (17) ANL-Report
- (18) D. Smidt (1976): Reaktortechnik Bd. II, S. 221
- (19) zit. nach R. Webb (1976) Ref. (13), S. 129
- (20) R. Webb, Ref. (13), S. 129
- (21) R. Webb, Ref. (13), S. 125
- (22) P. Royl, D. Struwe, R. Fröhlich (1977): Fortschritte bei der Sicherheitsanalyse schwerer hypothetischer Störfälle für schnelle natriumgekühlte Reaktoren. Reaktortagung 1977, Bericht S. 318
- (23) Ref. (4)
- (24) H.J. Friedrich (1977): Die Bodenkühleinrichtung des SNR 300, ein System zur Beherrschung der möglichen Folgen des hypothetischen Kernschmelzunfalls. Reaktortagung 1977, Bericht S. 330
- (25) R. Webb, Ref. (13), S. 187
- (26) Ref. (14)
- (27) D. Smidt, Ref. (18), S. 221
- (28) R. Webb, Ref. (13), S. 128
- (29) Ref. (9), S. 301 f.
- (30) K. Traube, Ref. (2)
- (31) G. Menken, M. Holl, U. Quandt (1977): Untersuchungen zur Korrosionsproduktivität im Primärsystem des SNR 300. Reaktortagung 1977, Bericht S. 833. beide Unfallabläufe nach Ref. (13), S. 187 f. und Spiegel vom 7.2.1977
- (32) J.F. Park u.a. (1972): Health Physics 22, S. 803.
- (33) W.J. Bair u.a. (1974): Science 183, S. 715.
- (34) R.C. Thompson (1975): An overview of plutonium toxicity. U.S. Energy Research and Development Administration, E (45-1): S. 1830
- (35) Ref. (33)
- (36) P.W. Durbin in: Radiobiology of Plutonium, B.J. Stover and W.S.S. Jee, Eds., J.W. Press, Salt Lake City, Utah, 1972, S. 469
- (37) C.J. Johnson u.a. (1976), Science 193, S. 488
- (38) Ref. (12)
- (39) M.C. Thorne, J. Vennart (1976): The toxicity of  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  und  $^{239}\text{Pu}$ . Nature 263, S. 555.
- (40) B.L. Cohen (1975): The Hazards in Plutonium Dispersed. Oak Ridge, Tennessee, March 1975.
- (41) W. Gofman (1975): The Cancer Hazard from Inhaled Plutonium. CNR-Report 1975, May 14, 1975
- (42) Ref. (10)
- (43) Ref. (34)
- (44) Ref. (34)
- (45) Ref. (40)
- (46) W.E. Norwood u.a. (1976): U.S. Transuranium Registry: Study of thirty autopsies, Health Physics 28, S. 609
- (47) J.T. Edsall (1976): Toxicity of plutonium and some other actinides. Bulletin of the Atomic Scientists 36, S. 27.
- (48) Ref. (34)
- (49) A.R. Tamplin, R.B. Cochran (1974): Radiation standards for hot particles. Washington D.C.: Natural Resources Defence Council.
- (50) J.B. Little u.a. (1975): Lung Cancer Induced in hamsters by low dose of alpha radiation from polonium-210. Science 188, S. 737-738