

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

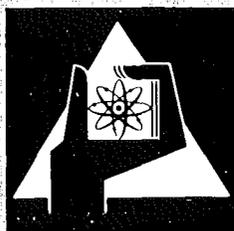
Februar 1975

KFK 2047

Institut für Reaktorentwicklung
Projekt Schneller Brüter

Zur Frage der Pin zu Pin-Schadenspropagation
in natriumgekühlten Schnellen Brutreaktoren

S. Jacobi, W. Kramer, K. Schleisiek



**GESELLSCHAFT
FÜR
KERNFORSCHUNG M.B.H.
KARLSRUHE**

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 2047

Institut für Reaktorentwicklung

Projekt Schneller Brüter

Zur Frage der
Pin zu Pin-Schadenspropagation
in natriumgekühlten Schnellen Brutreaktoren

S. Jacobi, W. Kramer, K. Schleisiek

Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe

Zusammenfassung

Die Möglichkeit einer Pin-zu-Pin Schadensfortpflanzung ist eine zentrale Frage bei der Sicherheitsbeurteilung Schneller Natriumgekühlter Reaktoren.

Mit dem vorliegenden Bericht wird versucht, einen kurzen Überblick über den heutigen Kenntnisstand zu geben. Die denkbaren Mechanismen eines Störfallablaufes werden diskutiert und die Möglichkeiten einer raschen Schadensausweitung aufgezeigt. Als Ergebnis der vielen laufenden Untersuchungen zu diesen Fragen wird eine Pin-zu-Pin-Schadenspropagation zwar als recht unwahrscheinlich angesehen, unter bestimmten Störfallbedingungen kann sie jedoch nicht ganz ausgeschlossen werden.

Abstract

On the Problem of Pin to Pin Failure Propagation in Liquid Metal Fast Breeder Reactors

The possibility of a pin to pin failure propagation is an important question in connection with the safety analysis of LMFBR.

This report gives a brief review of the present state of knowledge. Conceivable mechanisms of an accident sequence are discussed and the possibilities for a fast failure propagation are demonstrated. As a result of the present investigations to this questions a pin to pin failure propagation is considered to be rather unlikely but it may not be excluded completely under certain accident conditions.

Inhalt:

	<u>Seite</u>
1. Einleitung	1
2. Ereignisablauf der Pin-zu-Pin-Schadenspropagation	2
3. Einleitungsstörungen	5
3.1 Randome Hüllrohrfehler	5
3.2 Störungen der Bündelgeometrie	6
3.3 Ablagerungen von Verunreinigungen	7
3.4 Lokale Anreicherungsfehler	8
4. Primäre Folgeschäden	9
4.1 Temperaturerhöhungen im Bereich lokaler Blockaden	9
4.2 Hüllrohrversagen	10
4.3 Lokales Natrium-Sieden	12
4.4 Lokale Brennstoff-Natrium-Reaktionen (BNR)	13
5. Sekundäre Folgeschäden	16
5.1 Kühlungsstörungen durch Spaltgasaustritt	16
5.2 Umlagerungen von Brennstoff- und Hüllrohrmaterial	16
5.3 Stabdeformation durch schnelle Druckpulse	20
6. Schlußfolgerungen	21

1. Einleitung

Für den Sicherheitsnachweis eines LMFBR ist die Kenntnis seines Betriebs- und Störfallverhaltens sowie wegen des sich nicht selbsttätig unterbrechenden Störfallablaufs die Aufstellung von diversitären Sicherheitsbarrieren, welche mit Hilfe des Reaktorschutzsystems automatisch zur Reaktorabschaltung führen, erforderlich.

In dieser sehr umfangreichen Sicherheitsbeurteilung ist die Störfallanalyse die erste Teilaufgabe. Sie geht davon aus, daß örtlich begrenzte Störungen durch randomes Hüllrohrversagen als relativ wahrscheinlich anzusehen sind. Der Übergang zu einer zweiten Phase des Unfallablaufs - Ausbildung größerer Störungen mit erheblichen lokalen Temperaturerhöhungen und möglicherweise lokalem Sieden - stellt die Frage nach der Möglichkeit einer raschen Pin zu Pin-Fehlerpropagation. Eine spätere Phase wird insbesondere durch Hüllrohrschmelzen und Ausdehnung der Störung auf größere Subassembly-Bereiche mit Brennstoffschmelzen gekennzeichnet. Da hieraus mittelbar oder unmittelbar eine nukleare Exkursion folgen kann, ist die Aufstellung von Abschaltkriterien für das Schutzsystem zwecks frühzeitiger Unterbrechung des Störfallablaufs die zweite Teilaufgabe der Sicherheitsbeurteilung. Die Schwierigkeit liegt dabei in den wenigen realisierbaren Detektionsmethoden in Verbindung mit der aus wirtschaftlichen Gründen abgeleiteten Forderung nach möglichst wenig Reaktorabschaltungen.

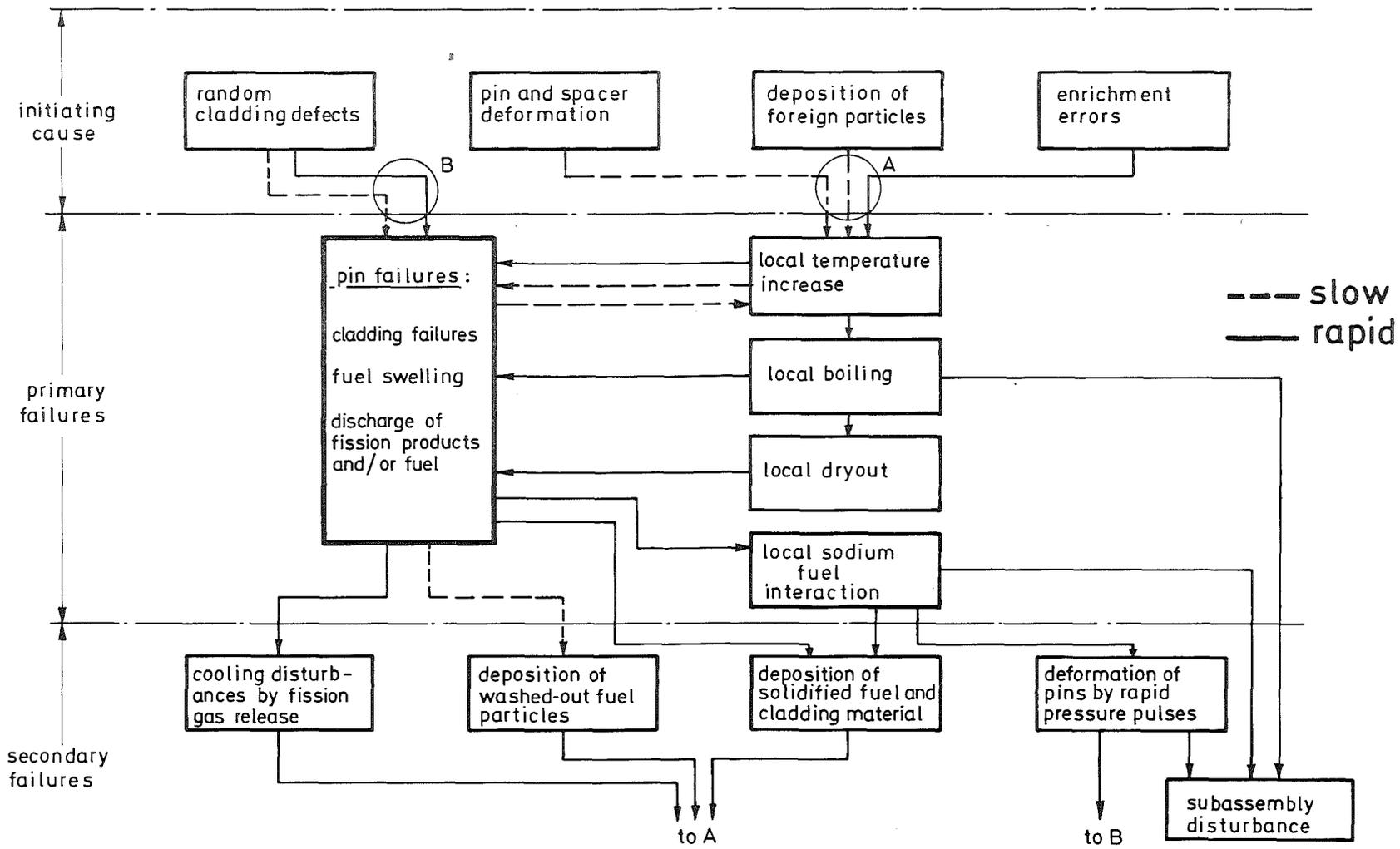
Der vorliegende Bericht befaßt sich ausschließlich mit dem Teilproblem der raschen Pin zu Pin-Fehlerpropagation.

2. Ereignisablauf der Pin-zu-Pin-Schadenspropagation

Mit der Frage der Pin-zu-Pin-Schadensfortpflanzung beschäftigen sich praktisch alle Forschungsinstitutionen, die an der Entwicklung natriumgekühlter Brutreaktoren arbeiten. Die in Betracht gezogenen Ereignisketten unterscheiden sich nur in einigen Details, jedoch wird die Bedeutung einzelner Ereignisse unterschiedlich bewertet, was sich auch in der Schwerpunktsetzung der verschiedenen Forschungs- und Entwicklungs-Programme niederschlägt.

In Abb. 1 wurden alle Ereignisse und Ereignisketten aufgenommen, die in den zur Verfügung stehenden Veröffentlichungen diskutiert werden. Der Ereignisablauf entspricht weitgehend dem, der bereits von Gast und Smidt 1970 [1] beschrieben wurde. In der hier gewählten Darstellung wird zwischen Einleitungsstörungen sowie primären und sekundären Folgeereignissen unterschieden, wobei unter "sekundär" ein Folgeereignis an einer anderen, nicht unmittelbar mit der Primärstörung zusammenhängenden Stelle verstanden werden soll.

Bei den Einleitungsstörungen sind zunächst randome Hüllrohrfehler zu betrachten, deren Ursache Fabrikationsfehler, Korrosionseffekte, Strahlenschäden u.a. sind, und die wegen der großen Zahl der eingesetzten Pins mit großer Wahrscheinlichkeit auftreten werden. Sie können nach einer gewissen Betriebszeit der Brennelemente Hüllrohrdefekte verursachen. Die übrigen Einleitungsstörungen (Stabdeformationen und Abstandshalterversagen, Ablagerungen von Partikeln aus dem Primärkreislauf, zu hoch angereicherte Pellets) führen indirekt, über lokale Temperaturerhöhungen, ebenfalls zum Versagen von Hüllrohren. Temperaturerhöhungen und Hüllrohrversagen stehen in unmittelbarem Zusammenhang und beeinflussen sich gegenseitig: Nach einem Hüllrohrdefekt kann es z.B. durch chemische Reaktion des Brennstoffs mit Sauerstoff zum Schwellen des Pins und damit zu Temperaturerhöhungen in Nachbarpins kommen, was wiederum weitere Hüllrohrschäden hervorrufen könnte. Hier besteht durchaus die Möglichkeit eines wahrscheinlich langsamen Wachstums der Blockade bevorzugt in radialer Richtung. Nach Überschreiten der Sättigungstemperatur des Kühlmittels kommt es zum lokalen Natriumsieden. Die damit verbundenen schnellen Temperaturänderungen können ein Versagen weiterer Hüllrohre bewirken. Das Auftreten von Dryout als Folge des lokalen Siedens führt zu einer weiteren schnellen Temperaturerhöhung der betroffenen Stäbe und damit zum Schmelzen von größeren Mengen Brennstoff und Hüllrohr-



GfK IRE	Schematic Representation of Pin-to-Pin Failure Propagation	Fig. 1
--------------------	---	---------------

material. Auch der direkte Übergang vom lokalen zum integralen Sieden wird von einigen Autoren diskutiert (hydrodynamische Instabilität). Störungen im gesamten Brennelement gehen jedoch über die Pin-zu-Pin-Propagation hinaus und sollen deshalb im Rahmen dieser Studie nicht weiter diskutiert werden.

Als primäre Folgeereignisse nach einem Hüllrohrversagen sind neben der bereits erwähnten Temperaturerhöhung der Austritt von Spaltprodukten und Brennstoff sowie das Ablösen von Hüllrohrmaterial in Betracht zu ziehen. Je nach dem Zustand des Pins zum Zeitpunkt des Versagens kann bereits vor dem Eintreten von Kühlmittelsieden geschmolzener Brennstoff austreten und u.U. zu einer Brennstoff-Natrium-Reaktion (BNR) führen, wobei die beteiligten Brennstoffmengen jedoch wahrscheinlich klein sind. Größere Mengen an geschmolzenem Brennstoff und Hüllrohrmaterial sind bei einer BNR nach einem Dryout denkbar. Die mit der BNR verbundenen Druckstöße können durch eine hydrodynamische Instabilität ebenfalls zu einer Ausbreitung der Störung auf das gesamte Brennelement führen.

Sekundäre Folgeschäden werden durch Spaltgasaustritt oder durch Ablagerung von Brennstoff und Hüllrohrmaterial verursacht. Spaltgas tritt unmittelbar nach dem Versagen eines Hüllrohres aus. Aus einem relativ engen Spalt kann ein Gas-Jet austreten und eine Temperaturerhöhung am gegenüberliegenden Stab verursachen. Dieser Mechanismus bewirkt eigentlich eine Ausdehnung des Primärschadens; zur Vereinfachung der Diskussion wurden jedoch die Auswirkungen einer Spaltgasfreisetzung unter den Sekundärschäden zusammengefaßt. Die vom strömenden Natrium in axialer Richtung mitgeführten Gasblasen führen zu einem erhöhten Zweiphasendruckverlust, damit zu einer Kühlmitteldurchsatzverringering und einer Temperaturerhöhung im betroffenen Unterkanal.

Eine weitere Möglichkeit für die Entstehung von Sekundärschäden ist die Ablagerung von ausgewaschenen Brennstoffpartikeln und erstarrtem Brennstoff und Hüllrohrmaterial. Auch hier kann die Ablagerung unmittelbar im Bereich des Primärschadens nicht ausgeschlossen werden; beide Vorgänge sollen jedoch gemeinsam behandelt werden und wurden deshalb unter den Sekundärschäden zusammengefaßt.

3. Einleitungsstörungen

3.1 Randome Hüllrohrfehler

Mit dem Begriff "Randome Hüllrohrfehler" seien solche Schäden zusammengefaßt, die als Ursache dafür anzusehen sind, daß das Hüllrohr mit den aufgeschweißten Endkappen sofort oder später seine Aufgabe als gasdichter Behälter für Brennstoff und Spaltprodukte gegenüber dem Kühlmittel nicht mehr erfüllt.

Die Fehlerursachen können in zwei Gruppen eingeteilt werden:

- Herstellungsbedingte Fehlerursachen,
- Betriebsbedingte Fehlerursachen.

Relativ häufig treten immer noch Schweißfehler an den oberen bzw. unteren Endkappen auf, offenbar verursacht durch herstellungsbedingte Schwierigkeiten [2]. Meist handelt es sich nur um pinholes, die ihre Größe nicht verändern. Schweißfehler blasen mehr oder weniger kontinuierlich das entstehende Spaltgas ab; solche Pins werden deshalb Leaker genannt. Schadensausweitungen wurden nicht beobachtet, ob eingedrungenes Natrium zu Sekundärfehlern führte, ist nicht bekannt. Der von den wassergekühlten Reaktoren abgeleitete Effekt des Sodium Logging führt nach Coffield, Wattleet et al. nicht zum Hüllrohrversagen [3]. Bei 1920 °C beträgt der Na-Dampfdruck 140 bar; dieser Druck kann nach [3] vom Hüllrohrwerkstoff aufgenommen werden. Unterstützt werden diese experimentellen Arbeiten von Betriebserfahrungen am BR-5 [3].

Nach neuen Erkenntnissen ist die Hüllrohrschwächung durch Außenkorrosion nicht zu vernachlässigen [4]:

- 23 µm Abtrag/Jahr bei 700 °C Hüllwandaußentemperatur
- 16 µm Schwächung durch Ferritbildung.

Auch die von Elbel und Kummerer genannten Werte für die Innenkorrosion von 100 µ bzw. 120 µ nach Götzmann und Hofmann führen primär noch nicht zum Pinversagen [5, 6], können aber bei zusätzlichen Herstellungsfehlern entscheidend sein. Derartige Fehler können sein:

Fremdeinschlüsse,
Korngrenzenangriff [7],
Lochfraßkorrosion [7],
nichtentdeckte, unterschrittene Dickentoleranzen,
Ziehfehler und
Gefügefehler.

Eine verbesserte Fertigungsprüfung soll die Zahl dieser Fehlerursachen einengen [4].

Das neutronen-induzierte Schwellen infolge Porenbildung ist zwar bei dem Stahl 1.4970 gegenüber 1.4981 und 1.4988 mit nur ca. 1 % $\Delta V/V$ gering [8], jedoch ist auch hier im Zusammenspiel mit anderen statistisch auftretenden Fehlermöglichkeiten das Mitwirken an einem Hüllrohrversagen zu sehen.

Durch mechanische Wechselwirkung zwischen Brennstoff und Hülle sind beim Hüllrohr Durchmesserergrößerungen beobachtet worden. Dienst, Götzmann et al. sehen bei mehr als 1 % dieser plastischen Verformung Anlaß zur Ribbildung [9]. Die Hochtemperaturversprödung als nicht ausheilbare Strahlenschädigung - verursacht durch n, α - Prozesse des Cr, Fe, Ni und B - kann ebenfalls infolge der starken Erniedrigung der Duktilität im Zusammenspiel mit anderen Ursachen zum Hüllrohrversagen führen. Nach bisherigen Informationen kann bei kaltverformtem Stahl 1.4970 bei 700 bis 750 °C die Bruchdehnung auf 0,3 - 0,4 % abzinken ($6 \cdot 10^{22}$ nvt; Verformungsgeschwindigkeit 1 %/min., bei größeren Geschwindigkeiten besser) [4, 10, 11].

3.2 Störungen der Bündelgeometrie

Die Auswirkungen von Stabexzentrizitäten werden in einer Reihe theoretischer Arbeiten behandelt, von denen hier nur die von Hofmann genannt sei [12]. Er gibt für den sehr konservativen Fall, daß eine Stabverschiebung von 0,2 mm auf der ganzen Core-Höhe vorliegt, Temperaturunterschiede von 80 bis 100 °C am Stabumfang an. Die Rückwirkungen der Temperaturdifferenzen auf den Stab werden in [13] berücksichtigt: Die Temperaturerhöhung im verengten Unterkanal verursacht eine weitere Verformung der Stäbe, bis die thermischen und elastischen Kräfte im Gleichgewicht sind. Es kann jedoch angenommen werden, daß Stabverformungen nicht sofort zu einem Hüllrohrdefekt, sondern später über die Temperaturerhöhung zu einer Verkürzung der Standzeit der Hüllrohre führen. Als Ursache von Temperaturdifferenzen werden in [13] auch lokale

Blockaden in Betracht gezogen. Ergebnisse für Reaktorbedingungen werden angekündigt, sind jedoch noch nicht veröffentlicht. Hier ist eine erste Antwort auf die Frage nach der Auswirkung lokaler Blockaden auf die Bündelgeometrie zu erwarten.

3.3 Ablagerungen von Verunreinigungen

Ablagerungen von Verunreinigungen in den engen Spalten eines Stabbündels sind bis heute noch nicht systematisch untersucht worden. Die im ORNL beobachteten Druckverluständerungen während der Lebensdauer eines Bündels können auch durch Änderungen der Querschnitte und/oder der Oberflächenrauigkeit verursacht worden sein [14]. Bei Versuchen im Institut für Reaktorentwicklung im Kernforschungszentrum Karlsruhe wurde in einigen Fällen ein langsames Verstopfen der engen Durchtritte in fast geschlossenen Ventilen beobachtet. Eine Ablagerung von Natriumoxid als Ursache kann wegen der hohen Betriebstemperatur mit Sicherheit ausgeschlossen werden. Von Interatom wurde die Korngrößenverteilung mechanischer Verunreinigungen in Natriumkreisläufen untersucht [15]. Dabei fand man neben Bohr- und Feilspänen kugel- und lamellenförmige Partikel, deren Abmessungen zwischen 50 und 500 μm lagen. Es kann angenommen werden, daß die größeren Partikel in den Filtern und Kaltfallen des Primärkreislaufs abgeschieden werden. In einem Bericht von Westinghouse [3] wird angegeben, daß die Verunreinigungen in einem Kreislauf "with normal oxygen control" aus Korrosionsprodukten und Abtragungen "in the two to five micron range" bestehen.

Aus diesen Angaben kann geschlossen werden, daß die spontane Bildung von Blockaden zwar unwahrscheinlich ist, aber nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden kann. Eine größere Bedeutung kommt den betriebsbedingten Verunreinigungen möglicherweise im Zusammenhang mit der Ablagerung von Brennstoffpartikeln zu: Größere Brennstoffpartikel können das nächste Gitter nicht passieren und lagern sich davor ab, d.h. sie werden ausgesiebt. Die zwischen den Partikeln befindlichen Kühlkanäle können dann durch Ausfiltern weiterer Partikel mittlerer und kleiner Größe verschlossen werden.

3.4 Lokale Anreicherungsfehler

Anreicherungsfehler in einer großen Anzahl von Stäben eines Brennelements führen zu einer Erhöhung der BE-Austrittstemperatur und sind deshalb festzustellen. Lokale Anreicherungsfehler (z.B. durch Vertauschen von Pellets oder einzelnen Stäben unterschiedlicher Anreicherungs-zonen) sind dagegen kaum detektierbar. In den TREAT-Experimenten D1 und D2 wurden im zentralen Pin eines 7-Stabbündels auf einer Länge von 38 mm Pellets mit einer UO_2 -Anreicherung eingebaut, die zu einer 2,1-fachen Leistungserhöhung führten [17]. Bei den Experimenten trat eine axiale Verschiebung von geschmolzenem Brennstoff auf (Schmelzfraktion max. 50 %), ohne daß es zum Hüllrohrversagen kam. Über den Abbrandzustand werden in [17] keine Angaben gemacht, eine Untersuchung des Langzeitverhaltens von fehlerhaften Stäben ist in TREAT nicht möglich. Es kann deshalb nicht ausgeschlossen werden, daß eine lokale Überanreicherung langfristig zum Versagen des Hüllrohrs führt.

4. Primäre Folgeschäden

4.1 Temperaturerhöhungen im Bereich lokaler Blockaden

Bei der Diskussion der lokalen Temperaturerhöhungen sollte zwischen den Temperaturerhöhungen in der Blockade selbst und der Temperaturverteilung im Rückströmgebiet hinter der Blockade unterschieden werden.

Berechnungen zur Temperaturverteilung in vollkommen undurchlässigen Blockaden wurden im ORNL durchgeführt [18]. Daraus folgt, daß mit einem Versagen der Hüllrohre zu rechnen ist, wenn radial ausgedehnte Blockaden aus Edelstahl eine axiale Dicke von 1/4" (6,4 mm) überschreiten oder wenn zwei benachbarte Unterkanäle vollkommen mit aktivem Material verstopft sind.

Die Temperaturerhöhung in einer porösen Blockade wurde im ANL berechnet [19]. Entsprechend den Ergebnissen der TREAT-Experimente wurde die Größe der Partikel zwischen 0,1 und 1 mm und die Porosität zwischen 0,25 und 0,5 variiert. Diese Werte stimmen recht gut mit Ergebnissen von GE-Be-strahlungsversuchen überein [16], bei denen Brennstoff aus defekten Stäben ausgewaschen wurde. Die aufgefundenen Partikel hatten eine mittlere Größe von 0,75 mm und eine maximale Größe von mehr als 2 mm. Berechnet wurde die axiale Ausdehnung der Blockade, bei der das Natrium am Austritt gerade die Sättigungstemperatur erreicht. Diese Länge nimmt mit zunehmender Partikelgröße und Porosität zu. Bei einer mittleren Teilchengröße von 0,5 bis 0,6 mm und einer Porosität von 0,35 bis 0,45 erhält man Längen von 5 bis 10 cm. Diese Brennstoffmengen entsprechen einer Pellet-Säule von 2 bis 3,5 cm Länge. Die Menge des überhitzten Natriums in einem Unterkanal würde dabei selbst bei einem Siedeverzug von 100 °C weniger als 0,1 cm³ betragen!

Die Temperaturverteilungen im Bereich hinter der Blockade werden in Karlsruhe, im ORNL und bei der CEGB untersucht. Das Oak-Ridge-Programm [18] ist dem Karlsruher in Bezug auf Zielsetzung und Methoden ähnlich, jedoch sind die Ergebnisse nicht auf SNR-Bedingungen übertragbar, da dort Wendeldraht-Abstandshalter verwendet werden. Die Karlsruher Arbeiten bis Ende 1972 sind in [20] dargestellt; neuere Ergebnisse wurden in [21] veröffentlicht. Die Übertragbarkeit der zum größten Teil mit Wasser durchgeführten Messungen auf Natrium wurde in [20] und [22] nachgewiesen.

Die Ergebnisse der Karlsruher Arbeiten, die ausschließlich mit Blockaden geringer axialer Ausdehnung durchgeführt wurden, lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Hinter Blockaden des untersuchten Typs treten ausgeprägte Rezirkulationsströmungen auf, die im gestörten Bereich eine erstaunlich gute Kühlung bewirken.
- Im höchstbelasteten Brennelement des SNR wird hinter einer zentralen Blockade von etwa 65 % und einer Randblockade von etwa 47 % die Siedetemperatur erreicht.
- Erste Vergleichsberechnungen mit dem SABRE-Code [23] lieferten eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung.
- Geringe Restdurchsätze durch die Blockade heben die Rückströmung von der Blockade ab. Erst bei Restdurchsätzen über 15 % löst sich die Rückströmung auf [24]. Diese Ergebnisse werden durch Messungen der CEGB bestätigt, bei denen selbst bei einem Restdurch von 10 % durch die Blockade keine Änderung des Maximalwertes der Temperatur im Rückströmgebiet festgestellt wurde [25].

Daraus folgt, daß das Auftreten einer relativ ausgedehnten Zone mit hoher Natrium- und Brennstabtemperatur nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden kann. Dabei kann es sich um die sehr unwahrscheinliche Blockade geringer axialer Ausdehnung oder um eine Blockade mit Restdurchsatz und größerer axialer Ausdehnung handeln.

Alle bisher durchgeführten Untersuchungen zur Temperaturverteilung hinter Blockaden beziehen sich auf eine intakte Geometrie. Der Einfluß von Stabverformungen auf die Rezirkulationsströmung und damit auf die lokalen Temperaturerhöhungen ist noch unbekannt. Erste Aussagen hierzu kann das RCN Petten mit dem dort entwickelten Rechenprogramm liefern [13].

4.2 Hüllrohrversagen

Am Kühlmittelinlauf im Brennelementfuß sind Blockaden durch Ablagerungen von Fremdkörpern möglich. Eine vollständige Blockade kann durch entsprechende konstruktive Ausbildung des Kühlmittelinlaufs mit sehr großer Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden, Teilblockaden jedoch nicht. Letztere führen infolge des verringerten Durchsatzes zu einer stationären Überlastung des Brennelements (BE), welche grundsätzlich am BE-Austritt von der Core-

Instrumentierung detektierbar ist. Wegen der Notwendigkeit einer absoluten Temperaturmessung ist jedoch eine untere Grenze vorhanden, die z.B. beim SNR 300 bei einer Temperaturerhöhung von mindestens $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt [26].

Die im Kapitel 3 beschriebenen Einleitungsstörungen sind einzeln oder kombiniert auftretend als latente Schwachstellen des Systems anzusehen. Geringfügige zusätzliche Abweichungen von Auslegungsdaten können zum Brennstabversagen führen. Stationäre Überlastung eines BE ist eine derartige zusätzliche Abweichung.

Durch Betriebsstörungen können bis zur automatischen Reaktorabschaltung durch das Schutzsystem kurzzeitige Leistungserhöhungen auftreten. Insbesondere die im Kapitel 3.1 beschriebene Duktilitätsreduktion durch Hochtemperaturversprödung ist hier als die Schwachstelle anzusehen, die bei kurzzeitiger, transients Überlastung zum sofortigen oder späteren Hüllrohrversagen führen kann.

Das durch stationäre oder transiente Überlastung verursachte Hüllrohrversagen wird als Längsriß im Hüllrohr auftreten. Austritt von Spaltprodukten und evtl. Brennstoff führen dann zu den in Abb. 1 dargestellten Sekundärschäden.

Kuczera untersucht theoretisch das Brennstabverhalten unter transienter Belastung nach dem Brennstabmodell BREDA-II und vergleicht mit den Ergebnissen der H3-TREAT-Tests [27, 28]. Dabei zeigt vor allem die transiente Spaltgasfreisetzung einen Druckanstieg: er verursacht eine zusätzliche Hüllrohrbelastung. Wegen nichtquantifizierbarer Versagensgrenzen bei höherem Abbrand betrachtet Kuczera Versagensexperimente als notwendig. Hunter and Fish haben unbestrahlte und bestrahlte ($9 \cdot 10^{21}$ nvt) 316 SS-Rohrproben unter Gasinnendruck bei thermischen Transienten bis zum Aufplatzen untersucht [29]. Bei Aufheizraten von $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ und $100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ werden Temperaturen von 1050 bis $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ angegeben, bei denen die Rohre durch Aufplatzen versagen.

Das Wachstum von Primärschäden kann wesentlich vom Brennstoffschwellen durch chemische Reaktion mit Sauerstoff abhängen. Bei Defektstab-Tests wurden Durchmesser-Zunahmen bis zu 34 % festgestellt [54]. Der Vorgang wird aus-

führlich von D.L. Smith, ANL, behandelt [53]: "The important consequence of the present result is that the sodium will serve as a source of oxygen for the sodium-fuel reaction in the event of a breach of the fuel cladding". Auf die nicht-reaktorspezifischen Verhältnisse bei Kapselbestrahlungen, bei Loops mit nur wenigen Liter Natrium und beim DFR mit seinen Niob-Hüllrohren als Sauerstoff-Getter wird eingegangen. Die zukünftigen Bestrahlungsexperimente sollten deshalb grundsätzlich während der gesamten Betriebsdauer mit SNR-spezifischer Sauerstoffkonzentration betrieben werden.

4.3 Lokales Natrium-Sieden

Erste theoretische Arbeiten zum lokalen Sieden des Natriums wurden von Gast durchgeführt [30]. Er setzte in seinen Berechnungen eine kugelsymmetrische Ausgangstemperaturverteilung und kugelförmige Blasen voraus. Die Wachstumsgeschwindigkeit der Blase hängt im wesentlichen vom Siedeverzug, dem Temperaturprofil und den Trägheits- und Reibungskräften der zu verdrängenden Flüssigkeit ab. Fauske führte eine ähnliche Betrachtung durch, jedoch mit vereinfachten Annahmen: Vernachlässigung des Reibungsdruckverlustes der Flüssigkeit, Berechnung nur eindimensional in axialer Richtung [31]. Beide Autoren gelangen zu dem Ergebnis, daß lokales Sieden an sich weder zu einem raschen Dryout noch zu einer Kühlmittel-Instabilität führt. Diese Ergebnisse werden durch erste experimentelle Untersuchungen zum lokalen Natrium-Sieden bestätigt [22]. Eine endgültige Aussage werden die geplanten Bündel-Experimente liefern. Vollkommen offen sind jedoch noch zwei Fragen:

- Wie wirken sich Störungen oder eine teilweise Zerstörung der Geometrie aus?
- Welchen Einfluß können freigesetzte Spaltgasmengen auf den Siedevorgang haben?

Zur letzten Frage wurden von A.J. Brook Berechnungen durchgeführt, die zeigen, daß bei kleinen Kondensationskoeffizienten Blasengröße und Blasenlebensdauer erheblich zunehmen können [32]. Van Erp et al. beschäftigen sich ebenfalls mit diesem Problem [33] und kommen zu dem Schluß, daß die Anwesenheit größerer Inertgasmengen in den Siedebblasen unwahrscheinlich ist, da das vor-

handene Spaltgas bereits während der Wachstumsphase vor Siedebeginn durch Versagen der Hüllrohre freigesetzt wird. Die Versagungsgrenze hängt jedoch wesentlich vom Zustand des Stabes ab. Bei geringem Abbrand und Temperaturänderungsgeschwindigkeiten der Größenordnung $5 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ liegt die Versagungsgrenze z.B. bei etwa $1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [29].

Lokales Kühlmittelsieden ist auch als Folge des Austritts einer begrenzten Menge an geschmolzenem Brennstoff denkbar. Dieses Problem wurde von Fauske untersucht [31, 33]. Er gibt an, daß beim Austritt von $2,5 \text{ g}$ Brennstoff in das (vermutlich stark unterkühlt angenommen) Natrium eine Blase von max. $2,1 \text{ cm}$ Radius, max. 9 bar Innendruck und 8 msec Lebensdauer entsteht. Die Ausgangsbedingungen für diese Berechnung beziehen sich jedoch lediglich auf den Fall einiger überangereicherter Pellets. Ähnliche Berechnungen mit pessimistischen Annahmen sollten durchgeführt werden.

4.4 Lokale Brennstoff-Natrium-Reaktionen (BNR)

Voraussetzung, daß es zu einer örtlichen thermischen Reaktion zwischen Brennstoff und Kühlmittel kommen kann, ist ein Brennstabschaden als Einleitungsstörung in dem Sinne, daß entweder bereits vor dem Einsetzen von örtlichem Kühlmittelsieden flüssiger Brennstoff aus dem Stabinnern in das Kühlmittel gelangt oder nach einem Dryout infolge lokalen Siedens u.U. größere Mengen flüssigen Brennstoffs aus einem oder mehreren Stäben austreten. Die aufgrund einer BNR evtl. auftretenden Druckpulse könnten in Abhängigkeit vom abbrandbedingten mechanischen Zustand des Brennelements (Hüllrohreigenschaften, Innendruck) zu einer Schadensausbreitung auf verschiedene andere Stellen des Brennelements oder auf einen größeren Brennelementbereich führen.

Die bisher bekannten Untersuchungen zur Frage der BNR haben gezeigt, daß eine mögliche Wechselwirkung zwischen Brennstoff und Kühlmittel in sehr unterschiedlicher Weise ablaufen kann [34, 35]. In diesem Bericht werden nicht die Aspekte einer BNR bezüglich des Schadenspotentials für einen whole-core accident, sondern nur die Phänomene von örtlichen BNR als mögliche Ursache für eine rasche Pin-zu-Pin-Schadenspropagation betrachtet. Für die zu diskutierenden Vorgänge ist es also notwendig, daß sich geschmolzener Brennstoff und flüssiges Natrium im Kühlkanal gleichzeitig befinden,

d.h. der Kanal ist noch nicht leergesiedet, wie z.B. beim Kühlmittelverlustunfall.

Aus den bisher durchgeführten in pile-Tests (TREAT, RCN und SCARABEE) können keine Aussagen zu der hier relevanten Fragestellung abgeleitet werden [34, 35, 36]. Bei den out of pile-Experimenten ergibt sich folgendes Bild:

Die JEF-Experimente des CEA in Grenoble [37] und die ähnlichen AF2-Experimente des CNEN - Italien [38], bei denen leichte Leistungsexcursionen simuliert werden, wobei das UO_2 durch ein Hüllrohr vom umgebenden Natrium während des Aufheizvorganges getrennt ist, haben Druckspitzen von einigen (bisher max. 22) bar ergeben. Dabei wird angenommen, daß der geschmolzene Brennstoff als Strahl durch die Hülle ins Natrium eintritt. Drop-Experimente beim CCR Ispra [39], bei denen kleine und größere Mengen von geschmolzenem UO_2 (im Kilogramm-Bereich) in flüssiges Natrium von ca. 500 °C gefallen sind, haben zwar eine extensive Fragmentation des Brennstoffs, aber lediglich Druckspitzen im Bereich von maximal 1 bar aufgewiesen.

Bei entsprechenden Experimenten im Argonne National Laboratory [35] würden steile Druckpulse bei geringem Energieinhalt festgestellt, die nach Meinung der betreffenden Autoren sehr wahrscheinlich durch eine schnelle Kondensation von Natriumdampfblasen verursacht wurden.

Aufgrund von Simulationsexperimenten bei CEGB [34] mit Zinn und Wasser kann der Schluß gezogen werden, daß eine explosionsartige Reaktion sich fortpflanzen kann; daß also vermutlich infolge Fragmentation mit einer gewissen Fortpflanzungsgeschwindigkeit an verschiedenen Orten kleine Brennstoff-Natrium-Reaktionen auftreten könnten [34, 40, 41]. Weitere Simulationsexperimente, wie beispielsweise die Small Scale Drop Experimente in Karlsruhe [42] und die Experimente mit Freon, Öl und Wasser beim ANL [34], die unter gewissen Bedingungen thermische Explosionen erbracht haben, seien hier am Rande erwähnt.

Die bisherigen experimentellen Ergebnisse zeigen also, daß es unter gewissen Bedingungen zu einer explosionsartigen thermischen Wechselwirkung zwischen geschmolzenem Brennstoff und Natrium kommen kann. Nähere Einzelheiten über die Bedingungen für eine Explosion siehe [34]. Der Energiegehalt derartiger Reaktionen wird jedoch aufgrund der bisherigen experimentellen Ergebnisse im

allgemeinen als unbeträchtlich angesehen. In Einzelfällen wäre jedoch bei Druckpulsen im Bereich von einigen zehn bar eine Beeinträchtigung von Nachbarstäben nicht ganz auszuschließen (vgl. hierzu Kap. 5.3). Der Modellfall, bei dem Natrium in den Brennstoff injiziert wird, ist für die vorliegende Betrachtung als Einleitungsstörung nicht von Interesse.

Van Erp, Chawla and Fauske beschreiben die analytische Untersuchung einer örtlichen BNR in einem Brennelement, die beim ANL durchgeführt wurde [31, 33]. Auf diese Arbeit wurde bereits in Abschnitt 4.3 hingewiesen. Diese Autoren folgern generell, daß die Freisetzung von kleinen Mengen geschmolzenen Brennstoffs unwahrscheinlich ist, solange das Brennelement bei oder nahe bei den nominellen Bedingungen arbeitet. Wird ein solches Austreten von Brennstoff trotzdem angenommen, dann sind die Blasen so klein und von so geringer Lebensdauer, daß ein lokaler Dryout und eine Strömungsinstabilität unwahrscheinlich sind. Auf die Beschädigung von Nachbarstäben durch die bei der Blasenbildung von der verdrängten Flüssigkeit ausgeübten Kräfte wird in Abschnitt 5.3 eingegangen.

Der Vollständigkeit halber sei noch kurz auf die Frage einer möglichen Reaktion zwischen geschmolzenem Hüllrohrmaterial (Edelstahl) und Natrium eingegangen [43]. Infolge des Fehlens einer inneren Wärmequelle beim Stahl erscheint es sehr unwahrscheinlich, daß die "spontaneous nucleation temperature" von ca. 3000 °C als theoretische Voraussetzung für eine solche Reaktion erreicht wird. Darüber hinaus haben bisher alle experimentellen Ergebnisse gezeigt, daß Stahl eher sogar als Wärme-Barriere zwischen UO_2 und Natrium wirkt. Calderola hält deshalb eine explosionsartige thermische Wechselwirkung zwischen Edelstahl und Natrium in einem Reaktorcore für "very very unlikely" [34].

Zusammengefaßt muß zu den hier skizzierten Fragestellungen gesagt werden, daß eine örtliche Brennstoff-Natrium-Reaktion insbesondere in einem Brennelement, das nicht mehr unter nominellen Betriebsbedingungen betrieben wird, als Glied in einer Ereigniskette zur Pin-zu-Pin-Schadenspropagation nicht ganz ausgeschlossen werden kann.

5. Sekundäre Folgeschäden

5.1 Kühlungsstörungen durch Spaltgasaustritt

Das Problem des Spaltgasaustritts aus defekten Hüllrohren und die daraus resultierenden Kühlungsstörungen sind sehr detailliert im ANL untersucht worden. Die folgende Darstellung folgt deshalb im wesentlichen der Veröffentlichung [33]. Beim Austreten eines Gas-Jets werden Natriumtröpfchen mitgerissen, die eine gewisse Kühlung der Auftreffstelle am Nachbarstab bewirken. Die Temperaturerhöhungen sind so gering, daß die durch die ungleiche Temperatur am Stabumfang auftretenden zusätzlichen Spannungen zu keinem Versagen der Hüllrohre führen. Die Propagation der Störung wird möglicherweise auch dadurch behindert, daß die betroffenen Stellen einander gegenüber liegen. Die Durchsatzreduktion durch den erhöhten Zweiphasen-Druckverlust der Natrium-Gas-Strömung hinter der Störung führt selbst bei konservativen Annahmen zu einer Temperaturerhöhung von 140°C . Die Auswirkungen einer Gasfreisetzung auf die Strömung vor der Defektstelle können vernachlässigt werden. Beim gleichzeitigen Versagen von 40 Pins im Bereich des Spaltgasplenums stehen die Stäbe max. nur 0,1 sec in der Gasblase, so daß auch dabei ein schnelles Versagen ausgeschlossen werden kann. Diese letzte Aussage gilt jedoch nur für den Fall, daß sich das Gasplenum oberhalb des Cores befindet. Detaillierte Berechnungen für den SNR 300 unter Berücksichtigung der Drosseln im Gasraum der Pins stehen noch aus.

5.2 Umlagerungen von Brennstoff- und Hüllrohrmaterial

Beim Versagen eines oder mehrerer Brennstäbe infolge des inneren Überdrucks, einer lokalen Temperaturerhöhung (z.B. durch örtliche Verstopfung) oder lokalen Dryouts kann je nach den Temperaturverhältnissen und nach der Beschaffenheit der Pellets Brennstoff in Form fester Partikel austreten oder aber geschmolzenes Hüllrohrmaterial und geschmolzener Brennstoff in die Kühlkanäle gelangen. Der Fall, daß geschmolzener Brennstoff sich innerhalb eines Stabes umlagert, z.B. im Zentralkanal, ist für die Frage der Propagation zunächst nicht von Bedeutung. Während angenommen werden kann, daß sich Hüllrohrmaterial nur in geschmolzenem Zustand von einem Brennstab ablöst, kann die Umlagerung von Brennstoff in flüssigem oder in festem Zustand stattfinden.

Das Hüllrohrmaterial wird in kälteren Regionen erstarren und sich je nach Größe der einzelnen Partikel u.U. im Bereich eines Gitterabstandshalters ablagern. Diese Störung verursacht eine lokale Temperaturerhöhung, und je nach Wachstum und Durchlässigkeit (Porosität) kann schließlich die Sättigungstemperatur erreicht werden und lokales Sieden auftreten. Für die Propagationsfrage ist hier also die Wachstumsgeschwindigkeit einer solchen Blockade maßgebend.

Komplizierter sind die Verhältnisse beim Austritt von Brennstoff. Im Falle von festen Partikeln, die infolge inneren Überdrucks austreten oder vom Natrium ausgewaschen werden, kann sich ähnlich wie beim Hüllrohrmaterial allmählich eine lokale Verstopfung - z.B. an einem Gitterabstandshalter - aufbauen. Dieser Vorgang wird sehr wahrscheinlich langsam ablaufen. Im Gegensatz zum Hüllrohrmaterial besitzt eine derartige Blockade zusätzlich eine innere Wärmeerzeugung, die die kritische Blockadegröße beeinflusst.

Einige Informationen über den Brennstofftransport bei defekten Stäben lassen sich auch aus Bestrahlungsexperimenten mit Brüterbrennstäben gewinnen. So berichtet Geithoff über das Bestrahlungsexperiment DFR 435, bei dem trotz der geringen Breite der Hüllrohr-Risse beträchtliche Brennstoffmengen in fester Form wahrscheinlich auf mechanischem Wege durch das Kühlmittel ausgespült wurden [46]. Über ähnliche Beobachtungen bei GE-Bestrahlungsexperimenten wurde bereits in Abschnitt 4.1 berichtet [16].

Nach dem Austritt von geschmolzenem Brennstoff aus einem oder mehreren Brennstäben sind verschiedene Folgeereignisse denkbar:

- a) Es entstehen u.U. örtliche Wechselwirkungen zwischen geschmolzenem Brennstoff und Natrium. Dieser Fall ist in Kapitel 4.4 beschrieben und wird hier nicht weiter behandelt.
- b) Geschmolzener Brennstoff erstarrt - evtl. nach vorhergegangener Fragmentation - in kälteren Regionen und führt je nach Partikelgröße zum Aufbau örtlicher Verstopfungen in Unterkanälen durch Ablagerung an Brennstabhüllen oder an einem Gitterabstandshalter. Es ist auch denkbar, daß Brennstoff, der im Bereich einer bereits gestörten Stelle austritt - z.B. im Rückströmgebiet hinter einer örtlichen Verstopfung -, durch die Rückströmung erfaßt wird und sich hinter bzw. seitlich von der

Störung ablagert. Die Situation entspricht im wesentlichen der bereits geschilderten beim Austritt von festen Partikeln.

- c) Austretender geschmolzener Brennstoff gelangt in unmittelbaren Kontakt mit anderen Brennstabhüllen. Wenn nun die Kühlung dieser betroffenen Stabbereiche durch eine andere Störung nicht mehr einwandfrei gewährleistet ist, ist ein Hüllrohrversagen nicht auszuschließen. Hier handelt es sich also um den pessimistischsten Fall im Hinblick auf die hier vorliegende Fragestellung.

Grundsätzlich läßt sich aufgrund der bisherigen Erkenntnisse feststellen, daß Brennstoffbewegungen und auch Hüllrohrmaterialbewegungen sehr unterschiedlich ablaufen, je nachdem, ob es sich um eine durch eine Leistungs-transiente verursachte Störung oder um eine Kühlungsstörung handelt [44]. Bisher bekannte Untersuchungen zur Frage nach Art und Geschwindigkeit von Brennstoffbewegungen sind noch sehr lückenhaft; dies gilt auch für die TREAT-Experimente, wo mit Hilfe eines Hodoscopes versucht wird, die während eines Versuchsablaufes auftretenden Brennstoffbewegungen sowohl innerhalb als auch außerhalb der Stäbe zu messen [45].

Bei den TREAT R-Series Loss of Flow-Experimenten wurde bezüglich der Bewegung von Hüllrohrmaterial festgestellt, daß große Teile abschmelzen - und zwar wahrscheinlich hauptsächlich bevor der Brennstoff schmilzt - und sich im unteren Teststreckenbereich ansammeln [50]. Eine Tropfenbildung ist also unter bestimmten Umständen nicht auszuschließen, wobei jedoch eine sehr rasche Schadensausweitung über den Aufbau der Blockade unwahrscheinlich ist. Einen ähnlichen Schluß lassen auch die Ergebnisse der bisherigen SCARABEE 1-Experimente zu. Der Vorgang des-nach-unten-Fallens von Brennstoff unter Loss-of-Flow-Bedingungen wurde auch bei den TREAT-L-Versuchen beobachtet.

Einschränkend ist zu diesen Ergebnissen zu bemerken, daß sie unter Bedingungen gewonnen wurden, die für den Propagationsstörfall nicht repräsentativ sind. Besonders durch das im ungestörten Bereich und evtl. in der Rezirkulationszone strömende Natrium können die Transportvorgänge wesentlich beeinflusst werden.

Rumble et al. weisen darauf hin, daß bei Störungen infolge von Leistungsexkursionen die Wärmeerzeugung von ausgetretenem Brennstoff dazu führen kann, die Natriumverdampfung zu fördern, insbesondere im Bereich der Coremittelebene [52]. Diese Wärmeproduktion kann zusätzlich die Erstarrung im Bereich der Corezone verlangsamen oder verhindern, so daß die Möglichkeit der Bildung größerer Brennstoff-Versperrungen im Core reduziert wird. Es erscheint fraglich, ob bei örtlichen Kühlungsstörungen ein ähnlicher Vorgang die Wahrscheinlichkeit einer raschen Schadensfortpflanzung verringert.

Für den Bewegungsablauf von austretendem geschmolzenem Brennstoff kann, sofern er in unterkühltes Natrium gelangt, aufgrund von Laboruntersuchungen angenommen werden, daß der Brennstoff sehr rasch fragmentiert [47]. Daraus schließen van Erp, Chawla und Fauske [33], daß freigesetzter Brennstoff vorzugsweise in Form kleiner Partikel vom Kühlmittel weitergetragen wird. Es findet also vorzugsweise ein dispergierender Austrag von Brennstoff in Strömungsrichtung von der Schadensstelle weg statt [48, 49]. Die Bildung örtlicher Verstopfungen durch Brennstoffpartikel wäre demnach ebenfalls im Bereich der Gitterabstandshalter denkbar.

Zur Frage evtl. thermischer Explosionen beim Eintritt kleiner Mengen geschmolzenen Brennstoffs in Natrium wird auf Kapitel 4.4 verwiesen. Der Vollständigkeit halber sei noch erwähnt, daß postfailure Brennstoffbewegungen, die Reaktivitätsveränderungen hervorrufen können, hier nicht Gegenstand der Betrachtung sind.

Insgesamt läßt sich zu den in diesem Abschnitt aufgeworfenen Fragen feststellen, daß Brennstoff- oder Hüllrohrmaterial-Bewegungen je nach Ausgangsstörungen und Randbedingungen unterschiedliches Verhalten zeigen. Die Wahrscheinlichkeit einer raschen Schadensfortpflanzung infolge derartiger Bewegungen erscheint allerdings gering, sie ist jedoch insbesondere für den Fall des direkten Auftreffens von geschmolzenem Brennstoff auf Hüllrohre bei bereits gestörten Kühlungsbedingungen nicht ganz auszuschließen.

5.3 Stabdeformation durch schnelle Druckpulse

Spaltgasfreisetzungen beim Aufreißen von Pins und lokale Brennstoff-Natrium-Reaktionen können zu einer schnellen Flüssigkeitsverdrängung im Bündel und damit zu erheblichen Beanspruchungen der Nachbarpins führen. Von Krieg wurden die transienten Geschwindigkeits- und Druckfelder sowie die Stabdeformationen für ein elastisches, aus 2 Stabreihen bestehendes Bündel in einer unendlich ausgedehnten Flüssigkeit berechnet [55]. Danach treten bei Verdrängungsgeschwindigkeiten, die einem Druckaufbau von 65 bis 260 bar entsprechen, insbesondere durch Ovalisierung der Stäbe Dehnungen von 1 - 3 % auf [51]. Diese Werte liegen über der Bruchdehnung von stark bestrahlten Hüllrohren. Dies bedeutet, daß Druckpulse der genannten Größe, die bei einer Brennstoff-Natrium-Reaktion nicht auszuschließen sind, zu einer schnellen Schadensausweitung führen können.

6. Schlußfolgerungen

Es wird allgemein davon ausgegangen, daß während der Lebensdauer eines Brennelements randome Hüllrohrdefekte auftreten. Eine schnelle Schadensausbreitung durch die dabei austretenden Spaltgasblasen ist jedoch unwahrscheinlich. Ein langsames Anwachsen der Störung durch Brennstoffschwellen infolge chemischer Reaktion des Brennstoffs mit dem im Natrium vorhandenen Sauerstoff zu $\text{Na}_3(\text{U,Pu})\text{O}_4$ kann allerdings nicht ausgeschlossen werden.

Die Bildung von Sekundärschäden durch Ablagerung von Brennstoffpartikeln am nächsten Gitterabstandshalter ist ebenfalls denkbar. Die im Natrium enthaltenen betriebsbedingten Verunreinigungen, die im ungestörten Brennelement wahrscheinlich keine Blockade bilden, können dann durch Filterwirkung das Wachstum der Blockade beschleunigen. Auch ein Anwachsen der Primärstörung durch Transport von Partikeln durch eine schon ausgebildete Rezirkulationsströmung kann nicht ausgeschlossen werden.

Der Zeitpunkt des Versagens von Hüllrohren hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab und läßt sich praktisch nicht vorhersagen. Der Austritt kleinerer Mengen von geschmolzenem Brennstoff ist im Sinne einer schnellen Propagation ungefährlich, solange die Stäbe in der Umgebung der Störung noch voll gekühlt sind. Für die Umlagerung des ausgetretenen Brennstoffs gilt dasselbe wie für ausgewaschene feste Partikel.

Eine schnelle Pin-zu-Pin-Schadenspropagation ist nur in der Weise denkbar, daß es durch größere Mengen an geschmolzenem Brennstoff zu einer Zerstörung der Hüllrohre von Nachbarstäben kommt. Größere Mengen an geschmolzenem Brennstoff könnten innerhalb einer porösen Blockade nach Verdampfen des in ihr eingeschlossenen Natriums oder außerhalb der Blockade nach Auftreten von Dryout (wahrscheinlich jedoch nur bei gleichzeitiger Störung der Bündelgeometrie) auftreten. Die Beschädigung von Nachbarstäben kann entweder direkt durch thermische Beanspruchung bei Kontakt mit geschmolzenem Brennstoff oder durch mechanische Beanspruchung durch die bei der Blasenbildung verdrängte, Flüssigkeit erfolgen.

Zusammenfassend kann also festgestellt werden, daß aufgrund des heutigen Kenntnisstandes eine rasche Pin-zu-Pin-Schadenspropagation sehr unwahrscheinlich ist; sie kann jedoch unter gewissen Bedingungen nicht ganz ausgeschlossen werden.

Zur weiteren Klärung der mit diesem Problemkreis verbundenen Fragen erscheint es aus heutiger Sicht notwendig, ergänzende Untersuchungen sowohl theoretischer als auch experimenteller Art auf folgenden Gebieten durchzuführen:

- Berechnung der Temperaturfelder in Brennstoff und Kühlmittel bei lokalen Anreicherungsfehlern mit intakter Geometrie;
- Berechnung der Auswirkung von Spaltgasfreisetzungen beim Versagen einer begrenzten Zahl von Pins im Bereich des Spaltgasplenums;
- Erstellung eines Codes zur Berechnung der Auswirkung einer lokalen BNR unter Berücksichtigung der transienten thermohydraulischen Vorgänge im Flüssigkeitsbereich (Ergebnis: Aussagen zur Stabilität der Brennelementkühlung und zur Auswirkung auf die Kühlmittelaustritts-temperatur);
- Experimentelle Untersuchungen zum Aufbau und zur Zusammensetzung von Blockaden;
- Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung von Versagenskriterien für Brennstabhüllrohre unter Störfallbedingungen bei verschiedenen Abbrandzuständen;
- Untersuchungen zur Frage, ob Brennstäbe bei Kontakt mit flüssigem Brennstoff infolge thermischer Beanspruchung versagen können;
- Untersuchung der U, PU- Sauerstoffreaktion bei den geplanten Defektstabprogrammen mit Reaktor-typischen Oxid-Gehalten im Natrium; in Ergänzung dazu sind Untersuchungen zur Blockadebildung durch Brennstoffaustragungen aus defekten Stäben wünschenswert (hierzu sind jedoch mindestens kleine Stabbündel erforderlich);
- In-pile-Experimente zur Untersuchung der Frage, ob schnelle Propagationsvorgänge bei lokalem Brennstoff- und Hüllrohrschmelzen möglich sind. Für diese Untersuchungen ist ein größeres Stabbündel notwendig.

Literaturverzeichnis

- [1] K. Gast, D. Smidt: Cooling Disturbances in the Core of Sodium-Cooled Fast Reactors as Causes of Fast Failure Propagation. Nucl. Eng. Des. 14 (1970).
- [2] R.R. Smidt, G.S. Brunson et al.: Fission-Product Releases to the Primary System of the EBR-II during 1971. ANL-7956, Nov. 1972.
- [3] R.D. Coffield, P.L. Wattlelet et al.: Analytical Evaluation of Fuel Failure Propagation for the Fast Flux Test Facility. WARD - 2171 - 11, Dez. 1970.
- [4] Seminar des IMF-GfK: Arbeiten zur Brennelemententwicklung für den SNR. KfK-Bericht in Vorbereitung.
- [5] H. Elbel, K. Kummerer: Weiterentwicklung der Schnellbrüter-Brennstäbe zu größerem Durchmesser. Reaktortagung Karlsruhe 1973.
- [6] O. Götzmann, P. Hoffmann: Zur in-pile-Verträglichkeit von oxidischem Brennstoff mit austenitischen Stählen. Reaktortagung Karlsruhe 1973.
- [7] R.W. Ohse and M. Schlechter: Hüllrohrkorrosion austenitischer Stähle in Gegenwart flüssiger Cs - CsJ-Elektrolyte in oxidischen schnellen Brüter-Brennstäben. Reaktortagung Berlin 1974.
- [8] K. Ehrlich und R. Groß: Das neutroneninduzierte und simulierte Schwellverhalten stabilisierter Stähle. Reaktortagung Berlin 1974.
- [9] W. Dienst, O. Götzmann, G. Ondracek, H. Zimmermann: Auswertung von Untersuchungsergebnissen an bestrahlten UO_2 - PuO_2 -Brennstäben. Reaktortagung Karlsruhe 1973.
- [10] K.D. Closs: Persönliche Mitteilung.

- [11] C. Wassilew, M. Schirra: Einfluß von Neutronenbestrahlung bei hohen Temperaturen auf das Zeitstands- und Kriechverhalten des austenitischen Stahls 1.4970. Reaktortagung Berlin 1974.
- [12] F. Hofmann: Flow and Temperature Distribution Including Coolant Mixing in Sodium Cooled Fuel Elements with Eccentric Geometry. KFK 1155 (1970).
- [13] A. van der Putten: On Fuel Pin Bowing under LMFBR Conditions. ANS-Topical-Meeting on Fast Reactor Safety, Beverly Hills, Calif., April 2-4, 1974.
- [14] M.H. Fontana: LMFBR Safety and Core-Systems Programs. Progress Report for July-Sept. 1973. ORNL-TM-4417.
- [15] H. Mausbeck: Persönliche Mitteilung .
- [16] Core Design Development Needs in Relation to Fuel Failure Propagation, Sodium Boiling and Clad/Fuel-Sodium Thermal Interaction. GEAP-13639-2 (Oct. 70).
- [17] L.W. Deitrich et al.: TREAT Mark-II Loop Experiments on FFTF-Like Pins having Local Overenrichment. Trans. ANS Vol. 15 No. 2 (1972) p. 816.
- [18] M.H. Fontana et al.: Effect of Partial Blockages in Simulated LMFBR Fuel Assemblies. ANS-Topical Meeting on Fast Reactor Safety, Beverly Hills, Calif., April 2-4, 1974.
- [19] W.W. Marr, R.M. Crawford: Porous, Heat-Generating Blockage in a Fuel Subassembly. Trans. ANS Vol. 15 No. 1 (1972) p. 350.
- [20] D. Kirsch: Untersuchungen zur Strömungs- und Temperaturverteilung im Bereich lokaler Kühlkanalblockaden in Stabbündel-Brennelementen. KFK 1794 (1973).

- [21] D. Kirsch et al.: Neue Ergebnisse experimenteller Untersuchungen zur Strömungs- und Temperaturverteilung im Bereich lokaler Kühlkanalblockaden in natriumgekühlten Reaktoren. Reaktortagung des DATF/KTG, Berlin, 2. - 5.4.1974.
- [22] K. Schleisiek: Natriumexperimente zur Untersuchung lokaler Kühlungsstörungen in brennelementähnlichen Testanordnungen. KFK 1914 (1974).
- [23] A.D. Gosmann et al.: The SABRE Code for Prediction of Coolant Flows and Temperatures in Pin Bundles Containing Blockages. Int. Meeting on Reactor Heat Transfer, Karlsruhe, Oct. 9-11 (1973).
- [24] P. Basmer, D. Kirsch, G.F. Schultheiß: Phänomenologische Untersuchung der Strömungsverteilung hinter lokalen Kühlkanalblockaden in Stabbündeln. KFK 1548 (1972).
- [25] A.J. Clare: Studies of the Coolant Temperature Distribution at a Blockage in a Pin Cluster. Meeting of the CSNI-Liquid Metal Boiling Working Group, Grenoble, April 24. - 26., 1974.
- [26] H. Jüngst: Persönliche Mitteilung.
- [27] B. Kuczera: Modelltheoretische Untersuchungen zum transienten Verhalten von natriumgekühlten Schnellbrüter-Brennstäben unter Einbeziehung spezieller Abbrandeinflüsse. KFK 1969, März 1974.
- [28] A.B. Rothman et al.: First TREAT Mark-II Loop Failure Threshold Experiment with Preirradiated FFTF-Typ Fuel (H3). ANS 16, 181-182 (1973).
- [29] C.W. Hunter and R.L. Fish: Deformation and Failure of Fast Reactor Cladding during simulated Loss-of-Flow Typ Transients. HEDL-SA-645, April 1974.

- [30] K. Gast: Die Ausbreitung örtlicher Störungen im Kern schneller Reaktoren und ihre Bedeutung für die Reaktorsicherheit. KFK 1380 (1971).
- [31] H.K. Fauske: Some Aspects of Fuel-Pin-Failure Propagation in Sodium-Cooled Fast Reactors. Nucl. Sci. Eng. 54, 10-17 (1974).
- [32] A.J. Brook: Local Boiling in the Fast Reactor Subassembly Environment. Proc. of Int. Meeting on Reactor Heat Transfer, Karlsruhe, Oct. 9-11 (1973).
- [33] J.B. van Erp et al.: An Evaluation of Pin-to-Pin Failure Propagation in LMFBR Fuel Subassemblies. ANS-Topical Meeting on Fast Reactor Safety, Beverly Hills, Calif., April 2-4, 1974
- [34] L. Caldarola: Current Status of Knowledge of Molten Fuel/Sodium Thermal Interactions. KFK 1974 (Febr. 74).
- [35] H.K. Fauske, T.P. Speis: UO_2/Na Interactions- Recent In and Out of Pile Experiments in the U.S. and Their Interpretation for Fast Reactor Safety Analysis. CREST sec. Meeting on SFI, Ispra, Nov. 1973.
- [36] H. Kwast: Some Observations on Sodium Fuel Interactions after Irradiation of Single Pins under Loss of Cooling Conditions. CREST sec. Meeting on SFI, Ispra, Nov. 1973.
- [37] M. Amblard, J. Costa, P. Syrmalenios: Recent JEF and CORECT 1 Sodium-Fuel Interactions Results. CREST sec. Meeting on SFI, Ispra, Nov. 1973.
- [38] M. Martini et al.: Out of Pile Experiments Related to Sodium Fuel Interaction Performed at CNEN, CREST sec. Meeting on SFI, Ispra, Nov. 73.
- [39] H. Holtbecker, P. Schlittenhardt, et al: Results of Thermal Interaction Tests for Various Materials Performed in the Ispra Tank Facility. CREST sec. Meeting on SFI, Ispra, Nov. 1973.

- [40] S.J. Board, R.W. Hall: Propagation in Thermal Explosions
CREST sec. Meeting on SFI, Ispra, Nov. 1973.
- [41] D.J. Buchanan, T.A. Dullforce: Fuel-Coolant Interactions - Small-Scale
Experiments and Theory. CREST sec. Meeting on SFI, Ispra, Nov. 1973.
- [42] W. Zyszkowski: Experimental-Theoretical Investigation of the
Thermal Explosion. CREST sec. Meeting on SFI, Ispra, Nov. 1973.
- [43] H.K. Fauske: Mechanisms of Liquid-Liquid Contact and Heat
Transfer Related to Fuel-Coolant Interactions. CREST sec. Meeting
on SFI, Ispra, Nov. 1973.
- [44] Ch. N. Kelber: Phenomenological Research in LMFBR Accident
Analysis. Nuclear Safety, Vol. 14. Nov. 4 (July-August 1973).
- [45] M. Kühle: Persönliche Mitteilung.
- [46] D. Geithoff: Austragung von Brennstoff aus den Brennstäben des
Bestrahlungsexperiments DFR-435, I. PSB-Vierteljahresbericht,
KFK 1274/1.
- [47] D.R. Armstrong, F.J. Teska and D. Roodin: Interaction of Sodium
with Molten UO_2 and Stainless Steel Using a Dropping Mode of
Contact. ANL-7890 (Dec. 1971).
- [48] C.E. Dickermann: U.S. Studies on LMFBR Fuel Behaviour Under
Accident Conditions. Nuclear Safety, Vol. 14, No. 5 (Sept. -
Oct. 1973).
- [49] ANL-RDP-16 (April/May 1973).
- [50] M.A. Grolmes et al.: R-Series Loss-of-Flow Safety Experiment
in TREAT. ANS-Topical Meeting on Fast Reactor Safety, Beverly
Hills, Calif., April 2-4, 1974.

- [51] R. Krieg: Persönliche Mitteilung.
- [52] E.T. Rumble, W.E. Kastenbergl, D. Okrent and J.O. Cermak:
Fuel Movement Investigations During LMFBR Overpower Excursions
Using a New Model. ANS-Topical Meeting on Fast Reactor Safety,
Beverly Hills, Calif., April 2-4, 1974.
- [53] D.L. Smith: Oxygen Interactions between Sodium and Uranium-
Plutonium Oxid Fuel. Nucl. Techn. 20 (1973).
- [54] C.N. Craig et al.: Behaviour of Failed Fuel. Proc. of Int.
Meeting on Reactor Heat Transfer, Karlsruhe, Oct. 9-11 (1973).
- [55] R. Krieg, R.M. Crawford: Deformations in a 19-Pin Bundle Due to a
Sudden Fluid Expansion. ANS-Topical Meeting on Fast Reactor
Safety, Beverly Hills, Calif., April 2-4, 1974.