

KERNFORSCHUNGSZENTRUM

KARLSRUHE

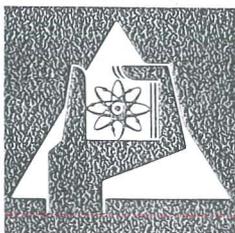
September 1976

KFK 2331

Institut für Reaktorentwicklung
Projekt Schneller Brüter

**Analyse der Bildung lokaler Kühlungsstörungen in
schnellen natriumgekühlten Brutreaktoren**

G. F. Schultheiß



**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 2331

Institut für Reaktorentwicklung
Projekt Schneller Brüter

Analyse der Bildung lokaler Kühlungsstörungen
in schnellen natriumgekühlten Brutreaktoren

G.F. Schultheiß⁺⁾

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

⁺⁾ Habilitationsschrift, Karlsruhe 1976

KURZFASSUNG

Ziel dieser Analyse der Bildung lokaler Kühlungsstörungen in schnellen natriumgekühlten Brutreaktoren sind sicherheitstechnisch verwertbare Aussagen über das erreichbare Ausmaß von Blockaden und den Zeitbedarf für das Wachstum. Nach einer Einführung mit der Betrachtung thermohydraulischer und physikalisch-chemischer Aspekte der Problematik werden die Ursachen für lokale Kühlungsstörungen und die dabei auftretenden Einzelphänomene genauer behandelt. Es zeigt sich, daß für die Bildung größerer lokaler Blockaden in einem Brennelementstabbündel in relevantem Ausmaß nur Brennstoff in Frage kommt, der nach einem Hüllrohrschaden ausgetragen wird.

Da sie für die Beurteilung der Vorgänge in einem Brennelementbündel bei lokalen Kühlungsstörungen von besonderer Bedeutung sind, wird auf eine Reihe von thermohydraulischen Untersuchungen sowohl des Strömungsfeldes als auch des Temperaturfeldes in der Umgebung von lokalen Blockaden eingegangen. Zur Blockadebildung selbst und zum Blockadewachstum werden Simulationsversuche bezüglich der dabei auftretenden Siebvorgänge beschrieben.

Auf der Grundlage der Ergebnisse aus Bestrahlungsexperimenten, aus den thermohydraulischen Untersuchungen und den Simulationsversuchen zum Blockadewachstum wird ein Modell für den Siebvorgang entwickelt. Das Modell beschränkt sich auf die Anfangsphase, in welcher die größten freien Querschnitte in einem Unterkanal mit Abstandshaltergittergeometrie verstopft werden müssen, um eine sogenannte Grundblockade zu bilden. Eine parametrische Untersuchung mit dem Modell zeigt, daß die Vorgänge bei der Blockadebildung im Zeitraum von Stunden bis Tagen und damit langsam ablaufen. Der erforderliche Materialbedarf läßt, verglichen mit den bekannten Freisetzungswerten aus Bestrahlungsexperimenten, die Grundblockadebildung in nur wenigen Unterkanälen um die Schadensstelle zu.

Die Modellrechnungen und weitere Grenzbetrachtungen auf der Grundlage von Detektionskriterien zeigen, daß die Bildung von lokalen Kühlkanalblockaden einer Größe, die über Temperaturfühler detektierbar ist, sehr unwahrscheinlich ist. Dagegen werden auch kleinere Blockaden aufgrund der sehr großen freien Oberfläche der Brennstoffpartikel durch eine DND-Detektion sicher erfaßbar.

ABSTRACT

Analysis of the Formation of Local Coolant Blockages in Sodium-cooled Fast Breeder Reactors

The analysis of the formation of local coolant disturbances in sodium-cooled fast breeder reactors pursues the objective of gaining information for use in safety technology about the achievable extent of blockages and the time required for blockage growth. Following an introduction devoted to the study of thermohydraulic and physico-chemical aspects of the problem details are given about the causes of local coolant disturbances and the resulting individual phenomena. It appears that the formation to a relevant extent of major local blockages in a sub-assembly can be caused only by fuel swept out as a result of cladding failure.

On account of their specific importance in the judgement of processes taking place in a sub-assembly during local coolant disturbances, a number of thermohydraulic investigations both of the flow field and of the temperature field in the vicinity of local blockages will be dealt with. Simulation tests are described on the formation proper and the growth of blockages, with special consideration of the sieving involved.

Based on results from irradiation experiments, the thermohydraulic studies and the simulation tests on the growth of blockages a model is developed for the sieving processes. The model is restricted to the initial phase in which the largest free cross sections in a sub-channel having the geometry of spacer grids must be blocked to form a so-called basic blockage. A parameter study using this model shows that the events of blockage formation take place over hours or days, which means that they are slow processes. Compared with the rates of fuel release known from irradiation experiments, the material requirement permits the formation of the basic blockage in but few sub-channels around the point of damage.

The model calculations as well as other limit considerations performed on the basis of detection criteria show that the formation of local coolant blockages of a size detectable by thermocouples is very improbable. By contrast, even smaller blockages are safely recorded by DND on account of the very large free surface of the fuel particles.

Inhaltsverzeichnis:

| | | |
|-------|---|----|
| 1. | EINFÜHRUNG | 1 |
| 1.1 | Thermohydraulische Aspekte | 5 |
| 1.2 | Physikalisch-chemische Aspekte | 10 |
| 2. | LOKALE KÜHLUNGSSTÖRUNG | 15 |
| 2.1 | Ursachen für lokale Kühlungsstörungen | 15 |
| 2.1.1 | Geometrieveränderung durch Stabverbiegung | 15 |
| 2.1.2 | Geometrieveränderung durch Fremdmaterialanlagerung | 17 |
| 2.1.3 | Hüllrohrschaden mit Feststoffaustrag | 20 |
| 2.1.4 | Hüllrohrschaden mit Schmelzstofftransport | 23 |
| 2.2 | Einzelphänomene | 24 |
| 2.2.1 | Hüllrohrschäden | 24 |
| 2.2.2 | Kornanlagerung | 28 |
| 2.2.3 | Ausbreitungsvorgänge, Sieben und Filtern | 30 |
| 2.2.4 | Sekundäreffekte | 33 |
| 3. | THERMOHYDRAULISCHE UNTERSUCHUNGEN AN LOKALEN STÖRUNGEN IN BRENNELEMENTBÜNDELN | 35 |
| 3.1 | Phänomenologische Untersuchung der Strömungsverteilung | 35 |
| 3.2 | Untersuchungen des Strömungsfeldes | 39 |
| 3.3 | Untersuchungen des Temperaturfeldes | 45 |
| 3.4 | Betrachtung kleiner Störungen | 48 |
| 3.5 | Experimente in Natrium | 50 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 4. | BLOCKADEBILDUNG UND BLOCKADEWACHSTUM | 53 |
| 4.1 | Blockadebildung durch Siebvorgänge | 55 |
| 4.2 | Betrachtung des Transportsystems | 60 |
| 4.3 | Modellentwicklung zum Siebvorgang | 62 |
| 4.3.1 | Modellbeschreibung | 62 |
| 4.3.2 | Annahmen zur Geometrie | 67 |
| 4.3.3 | Mathematische Beschreibung | 69 |
| 4.3.4 | Parametrische Betrachtung | 75 |
| 4.4 | Grenzbetrachtung zum Materialbedarf für lokale Kühlkanalblockaden | 81 |
| 4.4.1 | Detektion durch Temperaturfühler | 82 |
| 4.4.2 | Detektion durch DND-System | 84 |
| 4.4.3 | Erwartungswert aufgrund von Bestrahlungsergebnissen | 86 |
| 5. | SICHERHEITSTECHNISCHE BEURTEILUNG DER VORLIEGENDEN ERGEBNISSE | 87 |
| 5.1 | Plausibilitätsbetrachtung für die Bildungswahrscheinlichkeit lokaler Kühlkanalblockaden | 87 |
| 5.2 | Zur Detektion lokaler Kühlungsstörungen | 89 |
| 6. | ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN | 92 |
| 7. | NOMENKLATUR | 97 |
| 8. | LITERATURVERZEICHNIS | 100 |

1. EINFÜHRUNG

Ein wesentliches Teilgebiet im Bereich der friedlichen Nutzung der Kernenergie war seit jeher die Sicherheitsbetrachtung kerntechnischer Einrichtungen. Der wohl wichtigste Grund dafür ist, daß durch die militärische Anwendung der Kernenergie die möglichen Auswirkungen nuklearer Unfälle weltweit deutlich vor Augen geführt wurden. Auch für die Entwicklung schneller Brutreaktoren, die für die Sicherstellung der Energieversorgung auf lange Zeit betrieben wird, ist die Sicherheitsproblematik von ausschlaggebender Bedeutung.

Ausgangspunkt für die Betrachtung von möglichen Störfallsituationen in Kernreaktoren ist praktisch in allen Fällen das Gleichgewicht zwischen erzeugter und abgeführter Leistung im Reaktorkern. Wird dieses Gleichgewicht so gestört, daß die erzeugte Leistung unkontrolliert ein Übergewicht bekommt, so entstehen Störfälle auch größeren Ausmaßes, wenn keine Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Dies ist bei einem schnellen Reaktor sehr viel leichter möglich, da er sich im Gegensatz zu einem Leichtwasserreaktor bei Normalbetrieb noch nicht im Zustand größter Reaktivität befindet. So kann z.B. die Entfernung von Kühlmittel über den sog. Voidkoeffizienten bei Siedevorgängen eine Leistungserhöhung bedingen.

Zur Analyse der angenommenen Störfallabläufe werden heute im allgemeinen Ereignis- und Fehlerbaumbetrachtungen angestellt, die unter Einbeziehung von wahrscheinlichkeitstheoretischen Ansätzen quantitative Abschätzungen über die Auftretenswahrscheinlichkeit liefern, wie z.B. Rasmussen [1] oder Gast [3] für verschiedene Bereiche zeigen.

Um allerdings einen echten Unfall mit entsprechenden nuklearen Auswirkungen z.B. ausgehend vom Normalbetrieb eines Reaktors

zu erreichen, ist das Eintreten zahlreicher Einzelereignisse erforderlich. Dadurch wird eine betrachtete Ablaufkette insgesamt sehr unwahrscheinlich. Aufgrund ihrer geringen Eintrittswahrscheinlichkeit werden solche Störfälle oft als "hypothetisch" bezeichnet.

In Abb. 1 ist als Beispiel ein vereinfachtes Netzwerk für einen möglichen Ablauf eines Störfalles für einen natriumgekühlten schnellen Brutreaktor aufgrund von Kühlungsstörungen dargestellt. Dies ist eine Variante der Darstellung, wie sie z.B. auch von Smidt und Schleisiek [2] für die Diskussion von Sicherheitsgesichtspunkten benutzt wird. Der

- Kühlmittelverlust und
- die Reaktivitätszufuhr (z.B. nach Pumpenausfall) bei gleichzeitigem Versagen der Abschaltssysteme

werden wegen der niedrigen Eintrittswahrscheinlichkeit und damit des hypothetischen Charakters hier nicht weiter behandelt. Vielmehr soll in der vorliegenden Arbeit das Problem der lokalen Blockadebildung in einzelnen Brennelementbündeln näher betrachtet werden.

Zur Frage der totalen Blockade eines einzelnen Brennelementes (BE) hat Gast bereits in [3] festgestellt, daß bei entsprechender konstruktiver Gestaltung des BE-Eintritts eine ähnlich niedrige Eintrittswahrscheinlichkeit zu erreichen ist wie für die obengenannten Unfallmechanismen angenommen wird. Bestehen bleibt das Problem der Ausbreitung von lokalen Störungen.

Aus Abb. 1 wird deutlich, daß für unterschiedliche Auslöseereignisse verschiedene Pfade bis zum Erreichen einer echten Unfallsituation durchlaufen werden müssen. Diese Pfade werden gebildet durch unterschiedliche Folgen von Ereignissen und physikalischen Prozessen, die auch völlig verschiedene Möglichkeiten zu ihrer Erkennung und zum Ergreifen von Gegenmaßnahmen bedingen und bieten. Dies ist sowohl für eine

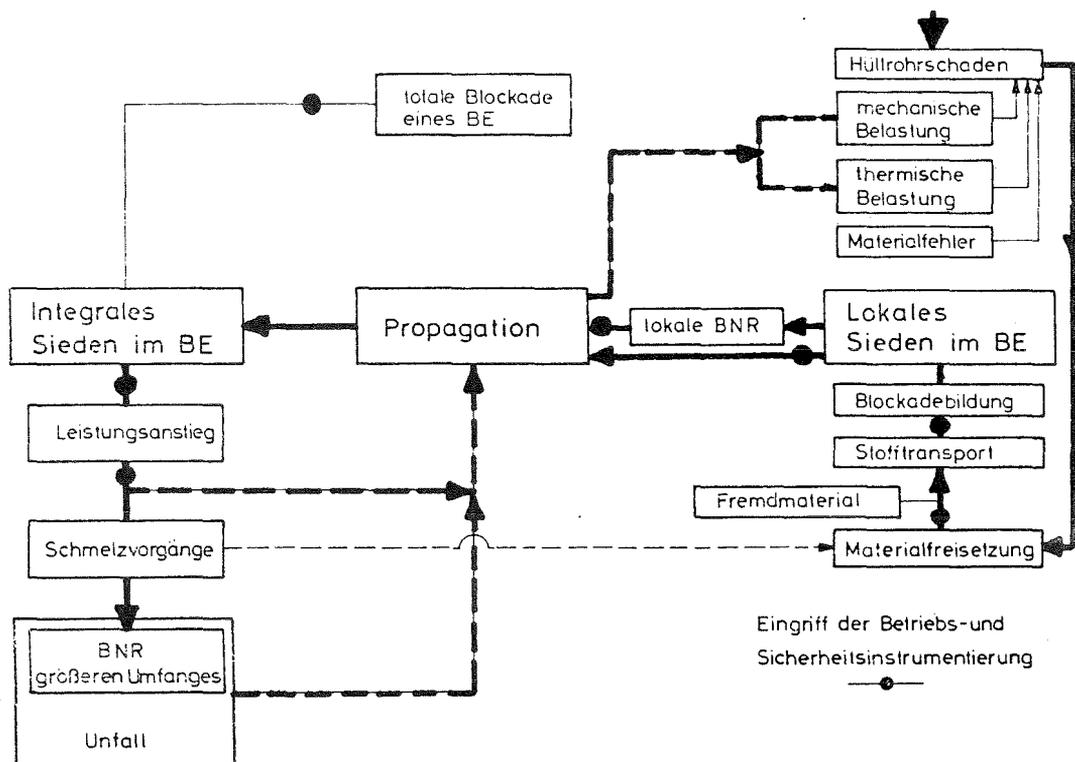


Abb. 1: Vereinfachtes Beispiel für einen möglichen Ablauf von Störfallketten aufgrund von Kühlungsstörungen für einen natriumgekühlten schnellen Brutreaktor. Zusätzlich sind Auslösemechanismen und mögliche Eingriffspunkte für die Betriebs- und Sicherheitsinstrumentierung angegeben.

redundante als auch für eine diversitäre Überwachung und Steuerung eines Kernreaktors von Bedeutung. Schematisch zeigt Abb. 1 auch an wievielen Stellen die Betriebs- und Sicherheitsinstrumentierung in den Ablauf der Ereignisse eingreifen und entsprechende Gegenmaßnahmen auslösen kann und muß, um eine Weiterentwicklung von Schäden zu unterbrechen.

Aus diesen zahlreichen Ansatzpunkten bildet sich letztlich auch die in [2] von Smidt und Schleisiek entwickelte Drei-Barrieren-Strategie im Sicherheitskonzept heraus:

- frühe Detektion lokaler Schäden,
- Nachweis der Unwahrscheinlichkeit des Siedens und Austrocknens einzelner Brennelemente,
- Nachweis der inhärenten Sicherheit gegen Druckpulse aus einer Brennstoff-Natrium-Wechselwirkung.

Bezüglich lokaler Störungen und ihrer möglichen Ausbreitung treten im Ereignisnetz in Abb. 1 drei zentrale Bereiche deutlich hervor:

- Lokales Sieden des Kühlmittels Natrium in einem Brennelement,
- Propagation von Schäden und
- integrales Sieden des Natriums.

Während die Probleme des integralen Siedens u.a. von Schlechtendahl [4] und Wirtz [5] und die des lokalen Siedens sowie einer möglichen Propagation, d.h. einer Ausbreitung von Schäden bis zum integralen Sieden in Arbeiten von Gast [3], Schleisiek [6] und van Erp et al. [7] schon seit Jahren Gegenstand sowohl experimenteller als auch theoretischer Untersuchungen waren, wurden die Voraussetzungen für lokale Siedevorgänge, d.h. die Bildung lokaler Blockaden erst in jüngster Zeit genauer untersucht.

Im folgenden sollen die wesentlichen Punkte im Zusammenhang mit lokalen Kühlungsstörungen zusammenfassend dargestellt

werden, wobei im besonderen auf die Frage nach der Bildungsmöglichkeit von Blockaden und deren Wachstum eingegangen wird. Nach Darlegung der möglichen Ursachen für lokale Kühlkanal-Blockaden wird unter Einbeziehung experimenteller Ergebnisse und der bisher verfügbaren Information aus Bestrahlungsexperimenten ein Modell zum Siebvorgang entwickelt. Darauf und auf Sicherheitskriterien aufbauende Grenzbetrachtungen zum Materialbedarf bei der Blockadebildung sollen Aussagen bezüglich der Bedeutung des Gesamtproblems liefern, mit deren Hilfe in einer abschließenden Betrachtung Schlüsse für die weitere Vorgehensweise in dieser sicherheitstechnischen Fragestellung gezogen werden.

Bevor die Probleme im einzelnen behandelt werden, sind die thermohydraulischen und die physikalisch-chemischen Aspekte der in Abb. 1 entwickelten Ablaufkette kurz zu erläutern. Dabei muß darauf hingewiesen werden, daß unter den vielen möglichen Ausführungsvarianten von Brutreaktoren hier besonderes Gewicht auf die Verhältnisse des SNR 300 gelegt wird, mit dessen Entwicklung insbesondere die Karlsruher Arbeiten eng verknüpft sind. Eine schematische Darstellung des Primärsystems dieser Prototypanlage gibt Abb. 2. Der Reaktorkern besitzt zwei Anreicherungszone. Das Kühlmittel durchströmt ihn von unten nach oben. Die bisherige Konzeption sieht hexagonale Brennelemente mit Gitterabstandshaltern vor. Das Spaltgasplenum der Brennstäbe befindet sich unten am Kühlmittelleintritt (niedriges Temperaturniveau), was die Problematik einer raschen Gasfreisetzung in diesem Bereich entspannt, wie von Erp et al. [7] klar herausstellen.

1.1 Thermohydraulische Aspekte

Die besondere Bedeutung einer gesicherten Wärmeabfuhr aus dem Kernbereich wurde bereits hervorgehoben. Die Bedingungen, unter denen die Wärmeübertragung von den leistungserzeugenden Brennstäben eines schnellen Brutreaktors an das Kühlmittel

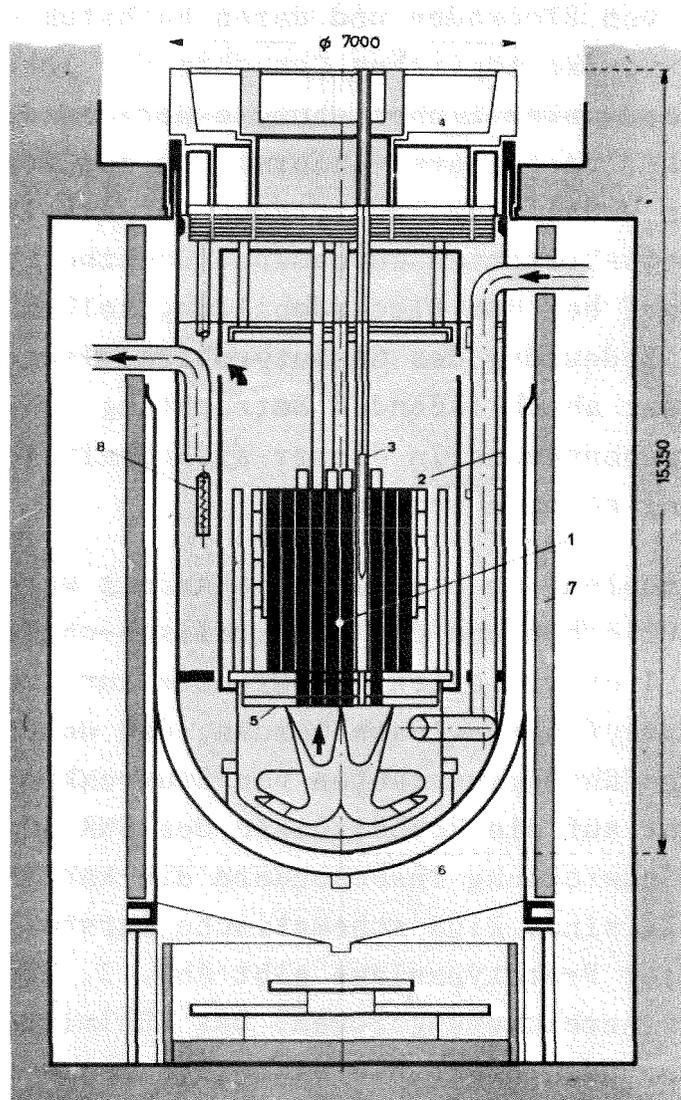


Abb. 2: Querschnitt durch den natriumgekühlten schnellen Brutreaktor SNR 300 [aus Prospekt der Firma INTERATOM]

- | | | | |
|---|--|---|--------------------------------|
| 1 | Reaktorkern | 6 | Sicherheitstank |
| 2 | Reaktortank | 7 | Abschirmung |
| 3 | Regelstab | 8 | Tauchkühler des Notkühlsystems |
| 4 | Drehdeckel | | |
| 5 | Kerntragplatte mit darunterliegendem Gasabscheider | | |

Natrium erfolgt, sollen hier noch einmal speziell hinsichtlich der weiterverfolgten Untersuchung von lokalen Kühlungsstörungen betrachtet werden:

- Die höchstbelasteten Bereiche im Reaktorkern weisen Leistungsdichten von einigen hundert Kilowatt pro Liter Kernvolumen auf. Bei einem Zweizonen-Kern betrifft dies nicht nur die Brennelemente in der Mitte, sondern vor allem auch die wesentlich zahlreicheren in der 1. Reihe der 2. Anreicherungszone. Daraus folgen entsprechende Temperaturänderungs-Geschwindigkeiten im Falle von Kühlungsstörungen.
- Die Geometrie der Brennelemente bei einer so hohen Leistungsdichte ist sehr kompakt. Abb. 3 zeigt einen Querschnitt durch ein Brennelementbündel ähnlich dem SNR-Mark Ia-Kern. Bei 6 mm Stabaußendurchmesser und einem Stabmittenabstand von 7,9 mm in einer Dreieckanordnung mit 169 Stäben ergeben sich entsprechend enge und komplexe Unterkanalformen. Der hydraulische Durchmesser eines Brennelementes bzw. eines Unterkanales beträgt $d_h = 5,34$ mm. Neuere Entwürfe für größere Leistungsreaktoren haben entsprechend einer Zusammenstellung von Kummerer [8_7]
 - eine steigende Brennstabanzahl
 - größere Stabdurchmesser (ca. 7,5 bis 8 mm)
 - kleinere Spalte (bis ca. 1 mm).
- Als Abstandshalterkonzepte sind zwei unterschiedliche Verfahren eingeführt:
 - Gitterabstandshalter und
 - Wendeldrahtabstandshalter.

Für die hydraulischen Bedingungen der Kühlmittelströmung sind dies zwei echt unterschiedliche Verfahren. Während beim Gitterabstandshalter zwischen zwei Gittern über Längen von ca. 150 mm (d.h. etwa $25 d_h$) eine normalerweise ungestörte Stabbündelgeometrie vorliegt, die eine

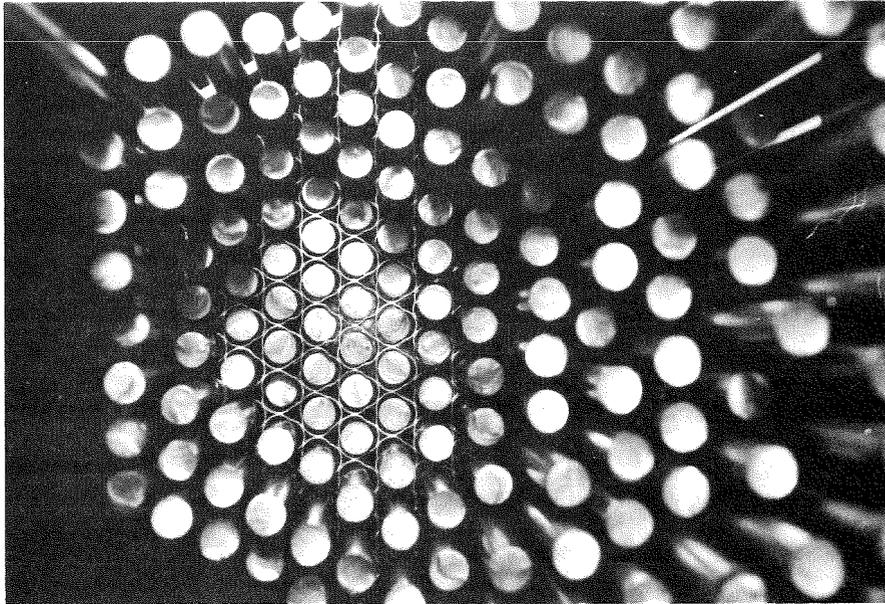


Abb. 3a: Modell eines Brennelementbündels (SNR-ähnlich)
mit Röhren-Gitterabstandshalter
Stabdurchmesser: 6 mm; Stabmittenabstand : 7,9 mm

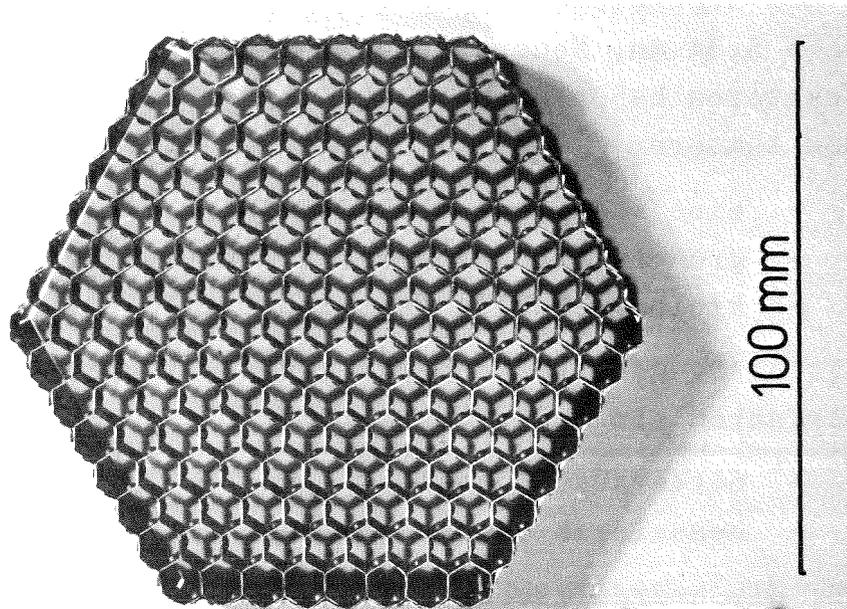


Abb. 3b: Querschnitt eines Brennelementbündels demonstriert
anhand eines Abstandshaltergitters

Ausbildung von Strömungsprofilen ohne Drall ermöglicht, zwingt das Wendeldrahtkonzept dem einphasigen Kühlmittelfluß einen Drall auf, sowohl um einzelne Stäbe als auch über das Brennelement integral gesehen.

- Hinsichtlich einer später zu betrachtenden Kühlungsstörung durch die Ausbildung lokaler Kühlkanalblockaden ist von Bedeutung, daß bei allen bisher in Deutschland verfolgten Reaktorkonzepten die Kühlmittelströmung von unten nach oben durch den Reaktorkern geleitet wird. Diese Strömungsführung gegen die Schwerkraft und damit gegen die Sinkgeschwindigkeit von mitgeschwemmten Verunreinigungen, insbesondere von Feststoffteilchen, ist für die Beurteilung eines sich ausbildenden Transportsystems von Bedeutung.

Für experimentelle Untersuchungen unter Sicherheitsgesichtspunkten ist nach diesen Angaben festzustellen, daß sich wohl hydraulisch sehr schnell eine Möglichkeit der Verifizierung gleicher oder ähnlicher Verhältnisse wie im Reaktor erreichen läßt. Damit sind Druckverteilungen, Massenaustausch und der Strömungsverlauf zu ermitteln, welche als Grundlage für die Beurteilung der Kühlungsverhältnisse benötigt werden.

Die thermische Ähnlichkeit ist wesentlich schwieriger zu verwirklichen. Die hohen Wärmeflüsse - im Reaktor 150 bis 250 W/cm^2 - sind out of pile nur mit sehr großem Aufwand und auch dann noch mit Einschränkungen zu erreichen. Dazu wurde versucht, über Einkanalgeometrien, wie bei Peppler [9], und Bündel mit kleinerer Stabzahl (z.B. 7 Stäbe) Näherungen zu realisieren. Grolmes et al. [10] wiesen jedoch auf die Probleme hin, die dabei hinsichtlich der Übertragbarkeit der Versuche auf Reaktorbedingungen insbesondere durch den Wandeinfluß auftreten.

Für Simulationsversuche mit anderen Flüssigkeiten (z.B. Wasser) konnte Kirsch [11] zwar zeigen, daß bei ähnlicher

Geometrie und ähnlichen Randbedingungen die Umrechnung von in großen Stabbündeln mit Wasser gemessenen Temperaturverteilungen auf Natrium möglich ist, doch sind dafür immer wieder bestätigende Versuchsergebnisse erforderlich.

Praktisch folgt daraus, daß, wie sich auch bisher mehrfach erwiesen hat, am Ende aller Simulationen ein "performance-test" so nahe wie nur irgend möglich an den Reaktorbedingungen geplant und durchgeführt wird, wie z.B. die Mol 7C-Experimente [17], mit denen unter Zuhilfenahme einer umfangreichen Instrumentierung die Auswirkungen einer axial ausgedehnten künstlichen Blockade soweit als möglich untersucht werden sollen. Die Inangriffnahme von in-pile-Bündelexperimenten ist heute trotz ihrer enormen Kosten keine Seltenheit mehr, wozu allerdings auch die nachfolgend behandelten Probleme drängen.

1.2 Physikalisch-chemische Aspekte

Während die hydraulischen Verhältnisse einfach simulierbar sind und thermische Ähnlichkeit mit einigem Aufwand im Experiment erreicht werden kann, sind physikalisch-chemische Vorgänge und Einflüsse nur im Original im vollen Umfang darstellbar. Dies bezieht sich für zahlreiche Phänomene vor allem auch auf die Verhältnisse unter hohem und energiereichem Neutronenfluß und im Feld radioaktiver Strahlung. In Abb. 4 ist das Gesamtsystem "Reaktor" mit seinen verschiedenen Komponenten und einer Reihe von wichtigen Systemparametern dargestellt.

Hinsichtlich des physikalisch-chemischen Verhaltens eines solchen Vielstoff- und Mehrphasensystems lassen sich nur bedingt Aussagen machen, vor allem, wenn sie auch noch über eine längere Betriebszeit Gültigkeit haben sollen.

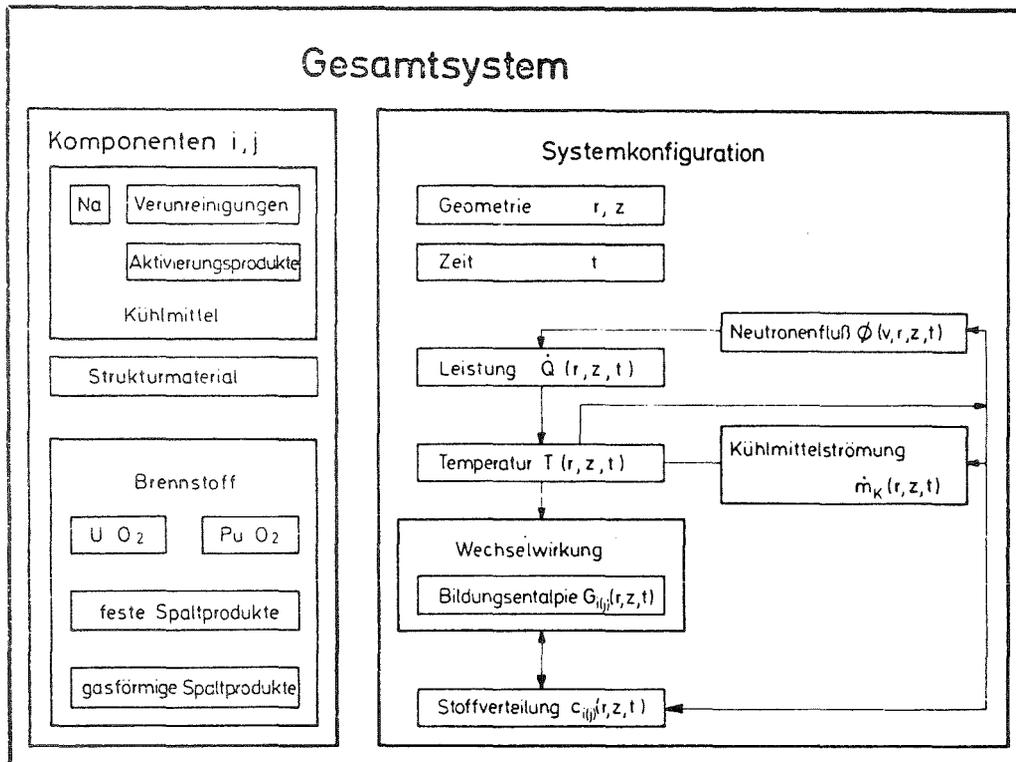


Abb. 4: Komponenten und Systemparameter eines Reaktorkernes unter physikalisch-chemischen Aspekten

Stellen die Kästen Brennstoff, Strukturmaterial und Kühlmittel im Komponentenbereich der Abb. 4 im Normalbetrieb einer Anlage zunächst noch echt getrennte Teilbereiche oder Trennwände - im Falle der Struktur - dar, so wird die Situation im Falle eines Strukturversagens, z.B. eines Hüllrohrschadens, um ein vielfaches komplizierter. Die dann einsetzenden Wechselwirkungen sind bis jetzt weitgehend unbekannt. Ein Forschungsvorhaben, das sich in-pile mit der systematischen Untersuchung von defekten Brennstäben bei konstanten und zyklischen Betriebsbedingungen beschäftigt, wird z.Z. im Rahmen der deutschen Schnellbrüterarbeiten durchgeführt. Dieses Forschungsprogramm wird in Verbindung mit den Betriebserfahrungen an den Prototypreaktoren weiterführende Erkenntnisse liefern.

Die Schwierigkeit dieses gesamten Bereiches wird auch ökonomisch deutlich durch die finanziell extrem aufwendigen Bestrahlungsuntersuchungen und inpile-Versuche [z.B. 12, 13, 14, 15_7], mit denen man das Materialverhalten insgesamt erfassen will und muß. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind auch für das hier betrachtete Problem der lokalen Kühlungsstörungen aufgrund lokaler Effekte von großer Bedeutung, vor allem wenn es um die Festlegung einigermaßen realistischer Parameter, wie Korngrößen und Mengen, für die in physikalisch-chemischer Hinsicht nicht relevanten Simulationsexperimente geht.

Wenn man die bereits in Abb. 1 entwickelte Unfallkette betrachtet, wird auch deutlich, daß die Betrachtung nicht bei den Einleitungsphänomenen und Prozessen stehen bleiben darf. Für den Teilbereich "Blockadebildung" bedeutet das:

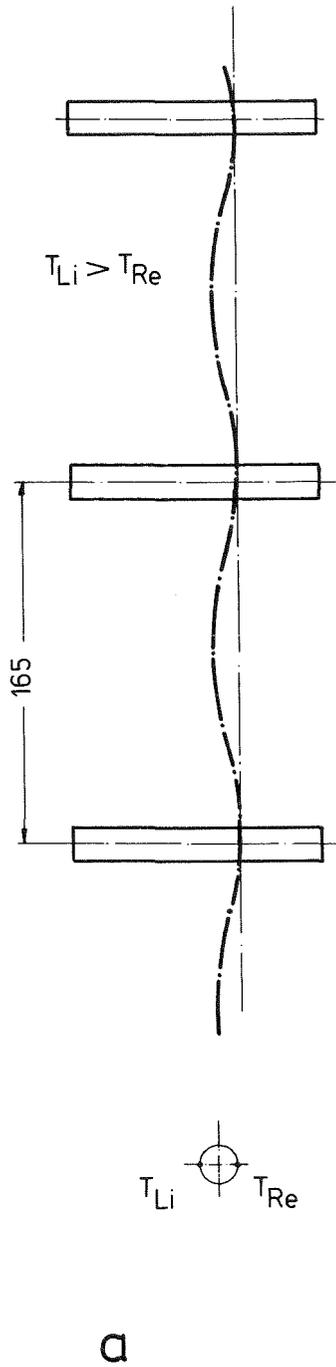
- erforderliches Anlagerungsmaterial kann nicht nur primär durch Ausschwemmen von Brennstoff oder Anschwemmen von abgeplatzten Korrosionsprodukten entstehen, sondern auch nach einem eingetretenen Schaden durch die Wechselwirkung von flüssigem Brennstoff oder Strukturmaterial mit kalten Feststoffflächen oder der Kühlflüssigkeit. Dadurch entstehen auch kleinere Partikel, die im Kreislauf umgewälzt werden können
- daß man es hier nicht mit einer auf wenige klar getrennte Einzelprozesse beschränkten Situation zu tun hat (vgl. Abb. 4), sondern mit einem komplizierten Zusammenwirken zahlreicher Stoffe und Vorgänge, die noch dazu zeitabhängig unterschiedlich verlaufen können.

In diesem Zusammenhang ist wichtig, daß diese Stoffverteilung gerade dann sehr komplex ist, wenn der Brennstab längere Zeit im Einsatz war, wenn also die Belastung z.B. der Hüllrohre durch den Neutronenfluß und den Innendruck der Spaltgase sowie den Korrosionsangriff von innen und außen

steigt und damit auch die Wahrscheinlichkeit eines Materialversagens zunimmt. Daß man dann auch mit einer chemischen Wechselwirkung des Natriums mit dem "festen" Brennstoff besonders bei Anwesenheit von hinreichend Sauerstoff rechnen muß, deren Ergebnis nicht unbedingt die Stoffkonfiguration sein muß, die man zum Aufbau einer Blockade bräuchte, ist bisher noch nicht in vollem Umfang in die Betrachtungen einbezogen worden. Allerdings wurde bereits von Craig et al. [16] auf das durch die Bildung von $\text{Na}_3(\text{U,Pu})\text{O}_4$ bedingte Brennstoffschwellen hingewiesen, welches zu einer Schadensausweitung führen kann.

Ähnliches gilt für die Wechselwirkung zwischen flüssigem Brennstoff und dem Kühlmittel Natrium. Während bei out-of-pile-Versuchen sehr "schöne" UO_2 -Kristalle und Erstarrungsbruchstücke entstehen [18, 19], gibt es "Endprodukte" von in-pile-Experimenten, die schon von ihrer Blättertartig-Struktur her völlig anders aufgebaut sind und deren Entstehen auf die Anwesenheit von Spaltprodukten zurückzuführen sein könnte, wie Kwast [20] vermutet. Diese Einflüsse müssen auch in die Betrachtungen zur thermischen Brennstoff-Natrium-Wechselwirkung einbezogen werden, insbesondere da hier noch sehr große Diskrepanzen zwischen Theorie und experimenteller Erfahrung bestehen [21].

Zum Problem der Bildung von lokalen Kühlungsstörungen aufgrund von Stofftransport und Stoffanlagerung ist festzustellen, daß eine Simulation zwar die mechanisch-hydraulischen Vorgänge klären kann, aber hinsichtlich der physiko-chemischen Prozesse keine Aussagen gestattet. Die Einbeziehung der Bestrahlungsuntersuchungen und der in-pile-Sicherheitsexperimente bieten hier Erweiterungsmöglichkeiten des Kenntnisstandes, die für eine sicherheitstechnische Beurteilung und für die Entwicklung von Gegenmaßnahmen von ausschlaggebender Bedeutung sind.



b



Abb. 5: Veränderung der Kühlkanalgeometrie durch Stabverbiegung: a) schematisch; b) Ausschnitt aus einem Bestrahlungsexperiment [22, 30], bei welchem trotz extremer Belastung und Hüllschäden keine Verbiegungserscheinungen an intakten Stäben feststellbar waren.
(b) Foto: Hz-17G-Mo1 7B-0-0/18....34)

2. LOKALE KÜHLUNGSSTÖRUNG

Im rechten Bereich der Abb. 1 wurde bereits eine grobe Übersicht der auslösenden Vorgänge für eine lokale Kühlungsstörung gegeben.

Die Einzelbereiche sollen nun näher betrachtet werden, damit zusammen mit den im 3. Abschnitt dieser Arbeit erläuterten thermohydraulischen Untersuchungen von lokalen Störungen ein Modell entwickelt werden kann, das eine sicherheitstechnische Beurteilung der Problematik der Blockadebildung und des Blockadewachstums erlaubt.

2.1 Ursachen für lokale Kühlungsstörungen

Hinsichtlich der Ursachen für lokale Kühlungsstörungen muß unterschieden werden zwischen solchen, die primär eine Störung bedingen, d.h. die nicht bereits nach einer Kühlungsstörung als weitere Folgestörungen der Kühlkanalgeometrie auftreten und den letztgenannten, welche dann als sekundäre Ursachen bezeichnet werden müssen. Es wird zwar auf diese sekundären Ursachen eingegangen, jedoch beziehen sich alle weiteren Untersuchungen in erster Linie auf primäre Ursachen von lokalen Kühlungsstörungen.

2.1.1 Geometrieveränderung durch Stabverbiegung

Eine Geometrieänderung der Kühlkanäle kann durch Verbiegung von Brennstäben aufgrund starker Temperaturgradienten oder durch ungleichförmiges Hüllmaterialschwellen bewirkt werden. Unter der Annahme, daß der gesamte Querschnitt jeweils in einer Abstandshaltermittenebene erhalten bleibt, breitet sich der Einflußbereich dann über die Auflagerpunkte nach oben und unten aus.

In Abb. 5a ist diese Situation schematisch dargestellt. Abb. 5b zeigt einen Ausschnitt aus dem Bestrahlungsexperiment Mol-7B [13], bei dem an intakten Stellen keine

Stabverbiegungen auftragen, obwohl verschärfte Betriebsbedingungen gefahren wurden und durch den Selbstabschirmungseffekt des epithermischen Neutronenflusses in den wandnahen Stabreihen starke Leistungsgradienten auftraten. Auch aus anderen Bestrahlungsexperimenten für Schnellbrüterbrennstäbe sind bisher bei SNR-typischen Verhältnissen keine Schäden aufgrund von Stabverbiegungen bekannt (Geithoff [22]).

Grundsätzlich liegen keine Anhaltspunkte dafür vor, daß Stabverbiegungen und dadurch bedingte Kühlungsstörungen und ungleichmäßige Temperaturverteilungen, wie sie z.B. Hofmann [23] behandelt, auszuschließen sind. In einer neueren Arbeit weisen v.d.Putten et al. [24] darauf hin, daß auch bei Abstandshaltergitterabständen um 150 mm eine Stabverbiegung nicht vollständig zu unterdrücken sei und daher zumindest in die Heißstellenanalyse mit einzubeziehen ist.

Die Verbiegung von ganzen Stabreihen ist insbesondere in Gebieten mit starken Fluß- und damit Leistungsgradienten zu beachten:

- Die daraus resultierenden unterschiedlichen Temperaturen führen über die Wärmedehnung zu einer Auslenkung eines Brennstabes. Verschlechtert wird die Situation dadurch, daß die dann auf der heißeren Stabseite verringerte Kühlbarkeit infolge der Kanalverengung zu einer Verstärkung des Effektes führt.
- Durch den starken Neutronenfluß- und Temperaturgradienten wird das Hüllmaterial hinsichtlich des Schwellverhaltens unterschiedlich beansprucht, da die durch Leerstellen-Kondensation gebildete Porenkonzentration sich entsprechend dem Flußverlauf verhält. Ehrlich und Groß [25] weisen allerdings darauf hin, daß über Ausheilverhalten von Gitterdefekten, Abbau von induzierten

Spannungen durch plastische Verformungen, die Reduzierung des Schwellens bei kaltverformten Materialien sowie den Einfluß der Hüllmaterial-Zusammensetzung Parameter zu beachten sind, deren Einfluß noch nicht in allen Punkten geklärt ist. Die vorliegenden Ergebnisse lassen noch keine abschließende Beurteilung zu.

Ein weiterer Grund für eine thermische Stabverbiegung kann in einer ungleichmäßigen Anreicherung des Brennstoffes liegen. Um allerdings damit einen über lokale "hot spots" hinausgehenden Effekt zu erreichen, müßten mehrere direkt aufeinanderliegende Pellets eine immer in gleicher Richtung angeordnete Spaltstoffunregelmäßigkeit aufweisen. Eine solche Häufung ist sehr unwahrscheinlich, besonders wenn durch die Fertigungskontrolle dagegen weitere Vorkehrungen getroffen werden.

Einerseits liefern also theoretische Ansätze Hinweise auf die Möglichkeit des Auftretens von Stabverbiegungen auch zwischen zwei Auflagerpositionen, andererseits sind aus entsprechenden Bestrahlungsuntersuchungen keine diesbezüglichen Rückschlüsse zu ziehen. Insgesamt liegen z.Z. keine Anhaltspunkte dafür vor, daß durch Stabverbiegung eine Entstehung von Hüllschäden größeren Ausmaßes bewirkt wird.

2.1.2 Geometrieänderung durch Fremdmaterialanlagerung

Die mit dem Kühlmittel umgewälzten Verunreinigungen verteilen sich im unteren Kühlmittelzufluß praktisch auf alle Brenn- und Brutelemente. Wie bereits in [3] gezeigt wurde, können die Eintrittsgeometrien der Brennelemente so gestaltet werden, daß größere mitgeschwemmte Teile abgefangen werden, ohne gleich eine totale Verstopfung eines Elementes zu erzeugen.

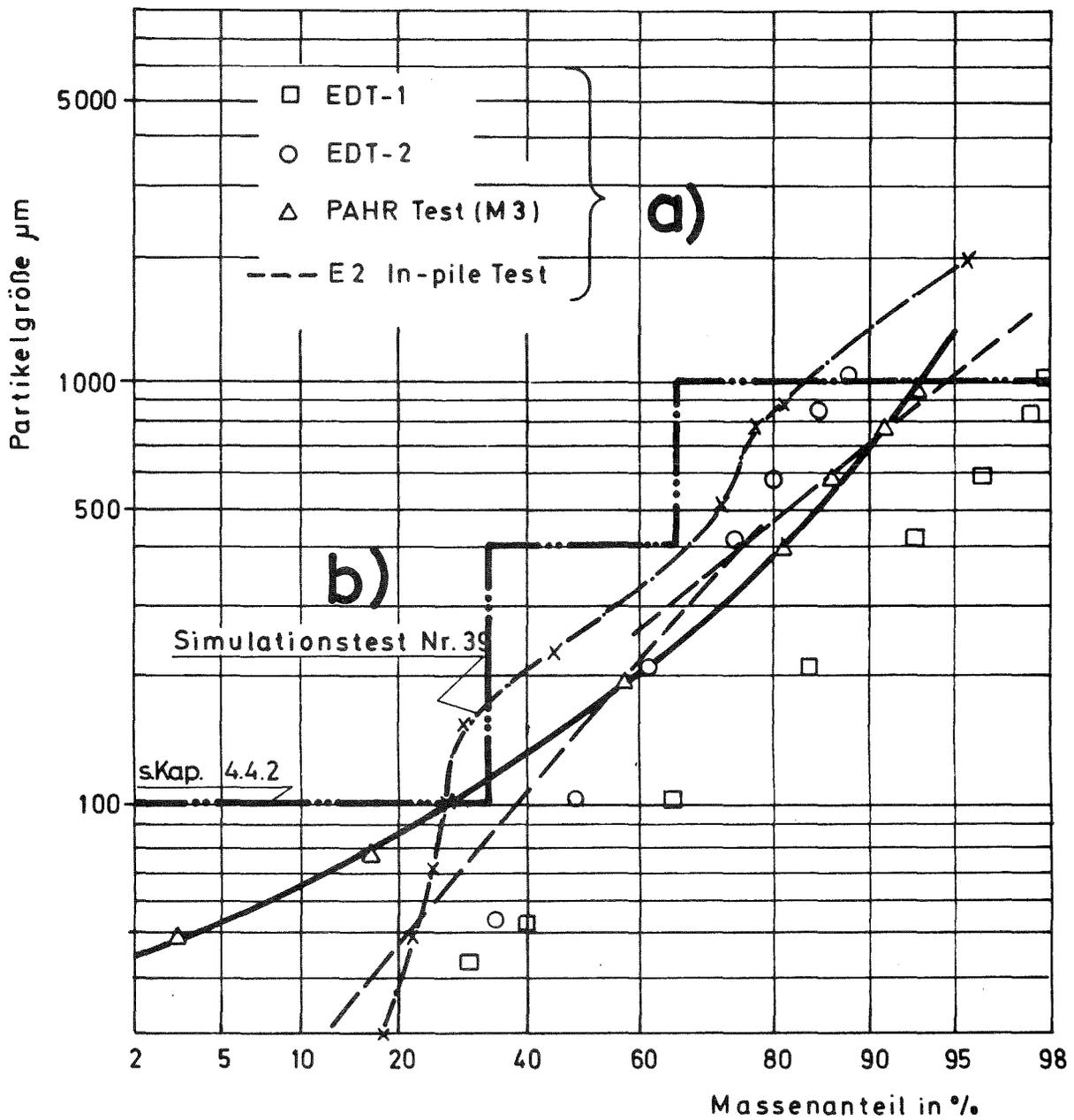


Abb. 6: Partikelgrößenverteilung nach UO_2 -Natrium Wechselwirkung im TREAT-Reaktor (a) [28] und nach einem Thermit-Natrium Simulationsexperiment (b) [29]

Kleinere Partikel können in die eigentliche BE-Geometrie gelangen und werden bei entsprechender Korngröße an den ersten Abstandshaltern im Bereich des untenliegenden Gasplenums der Brennstäbe zurückgehalten. Dort wird keine Leistung erzeugt und das Kühlmittel hat seine niedrigste Temperatur, deshalb sind lokale Blockaden solange als ungefährlich zu betrachten, wie sie den Durchfluß nicht wesentlich reduzieren. Erst dadurch könnte am Austritt des betroffenen Elementes ein Temperaturanstieg bewirkt werden.

Einige Partikel können z.B. aufgrund ihrer mehr länglichen Form die ersten Gitter passieren und erst weiter stromab aufgefangen werden; dabei handelt es sich allerdings nicht um die Mengen, die zur Bildung einer größeren Blockade erforderlich sind. Daß es solche "Wanderer" gibt, haben Simulationsversuche von Buchner gezeigt [26]*).

Über die Korngrößenverteilungen von Verunreinigungen besonders in Natriumanlagen gibt es noch relativ wenig Angaben, die von Jacobi et al. in [27] zusammengefaßt wurden, wobei festgestellt wird, daß die Partikelgrößen meist unterhalb 0,6 mm und damit der Korngröße von ca. 1,0 mm liegen, die bei der im weiteren zu betrachtenden SNR-ähnlichen Geometrie durch Sieben erstmals Ablagerungen erzeugt [26]*). Dies gilt insbesondere für Korrosionsprodukte. Zudem ist damit zu rechnen, daß im Kreislauf vorhandene Verunreinigungen in den Reinigungssystemen oder - in begrenztem Maße wegen des niedrigen Durchsatzes - in Totwasserbereichen von Armaturen, Reaktoreinbauten oder Zwischenwärmetauschern abgeschieden werden.

Am Beispiel der Partikelgrößenverteilung aus TREAT-Experimenten [28] in Abb. 6, in welcher auch die Verteilung von Thermit-Natrium-Wechselwirkungsprodukten aus Versuchen von

) Arbeiten, an denen der Autor maßgeblich beteiligt war, sind im folgenden mit [] gekennzeichnet

Menzenhauer et al. [29] eingetragen ist, ist zu ersehen, daß etwa 80 % der Partikelmasse (bis 0,6 mm Korngröße) aus einem Brennelement ausgetragen werden kann. Damit würde das Kühlmittel verunreinigt und für eine Detektion über verzögerte Neutronen der Signaluntergrund angehoben, da fortlaufend Spaltprodukte entstehen, die wie J-137 und Br-87 zur Detektion von Hüllschäden herangezogen werden sollen. Die Überwachungseinrichtungen müssen entsprechend nachjustiert werden.

2.1.3 Hüllrohrschaden mit Feststoffaustrag

In Abb. 7 ist prinzipiell in Abhängigkeit von der Leckgröße dargestellt, welche Phasen und Massenströme bei auftretenden Lecks freigesetzt werden können. Bei Porositäten infolge Herstellungsfehler oder Mikrorißbildung in der versprödeten Hülle nach längerer Neutronenbestrahlung wird als erstes Spaltgas austreten. Erst bei größeren Rissen werden Feststoffpartikel freigesetzt. Wenn eine flüssige Brennstoffphase im Bereich der Leckstelle vorhanden ist, wird sie bevorzugt und vor festen Partikeln mit dem Gas nach außen transportiert, wenn entsprechende Öffnungen vorhanden sind oder gebildet werden können. Der Stoffaustrag der einzelnen Phasen setzt sich fort bis zum Versiegen aufgrund

- zu niedrigen Druckes im Gas,
- fehlender Flüssigkeit oder Verstopfung der Kanäle durch Erstarren und
- völligen Austrags des vorhandenen festen Brennstoffs und der Spaltprodukte im Leckbereich.

Von besonderer Bedeutung ist der letzte Punkt wie Nachuntersuchungen von Bestrahlungsproben zeigen, über die z.B. Geithoff [12] und Weimar [30] berichten. Die freigesetzten Partikel finden sich bei entsprechender Größe an den Abstandshaltern wieder, wie der Ausschnitt aus einer Neutronenradiographie in Abb. 8 zeigt [26*], 31]. Auf Einzelvorgänge zum Hüllschaden und zur Zerlegung des Brennstoffes in Partikel im festen Zustand wird in 2.2.1 näher eingegangen.

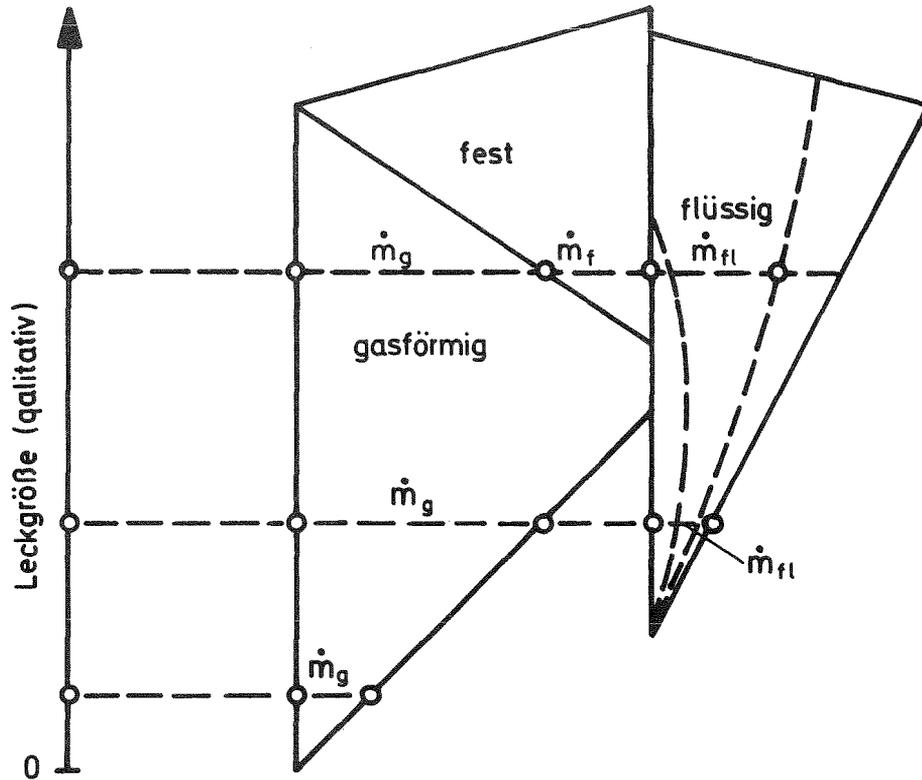


Abb. 7: Beispiele für den prinzipiellen Verlauf der Massenstromraten \dot{m} für die Phasen gasförmig, flüssig (falls vorh.) und fest in Abhängigkeit von der Leckgröße bei einem Brennstabhüllrohrschaden

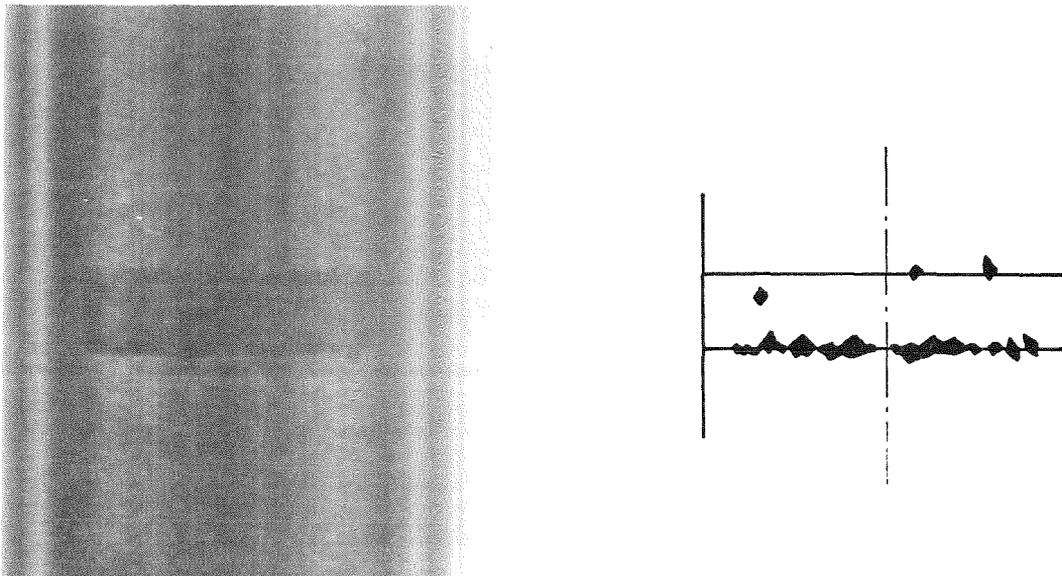


Abb. 8: Ausschnitt aus einer Neutronenradiographie [31] und deren Auswertung [26, 7*) mit Partikelabscheidungen an einem Abstandshaltergitter nach Hüllrohrschaden in einem Bestrahlungsexperiment

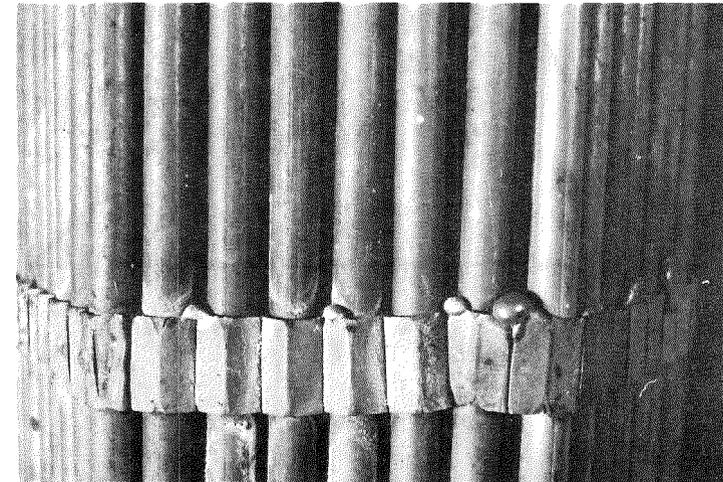
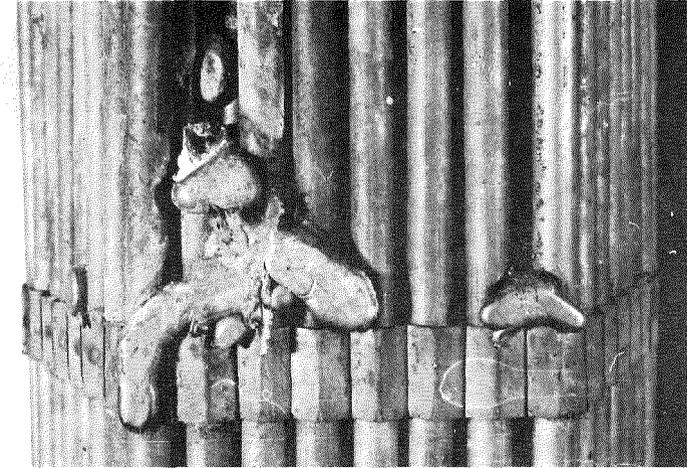
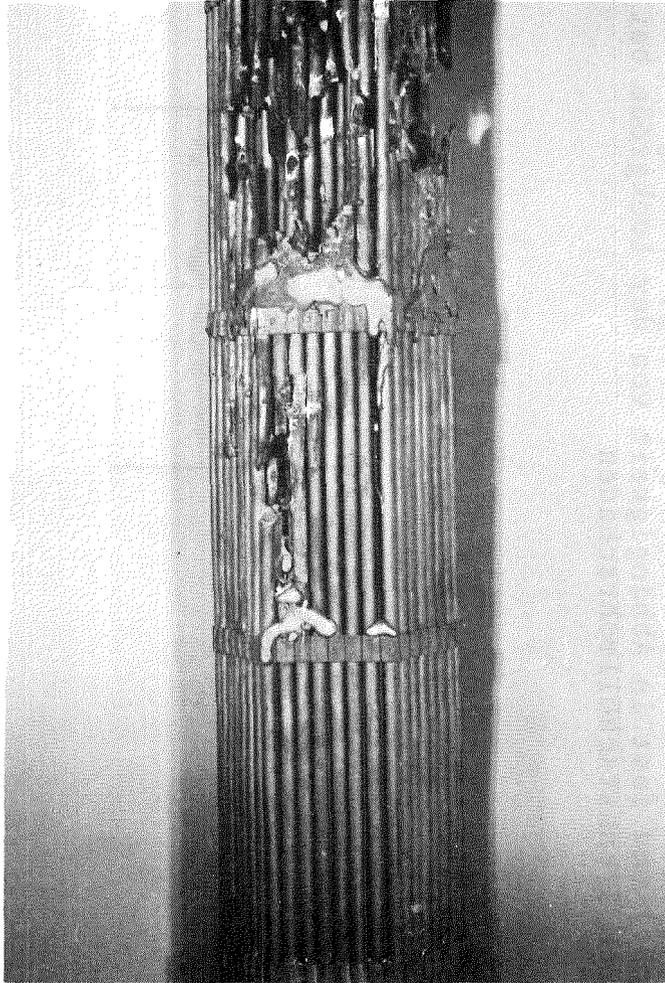


Abb. 9: Elektrisch beheiztes Simulationsbündel für die Untersuchung des Brennelementverhaltens unter Siedeverzug (BEVUS / 33_7) nach Kurzschluß und teilweisem Abschmelzen der Heizerröhren in Natrium. Die Ausschnitte zeigen die zwei Abstandshaltergitter unter der Schadensstelle.

Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, daß durch chemische Wechselwirkung zwischen Brennstoff und Kühlmittel Natrium-uranat oder -plutonat gebildet werden kann, welches aufgrund seines größeren Volumenbedarfs zu einem Schwellen im Schadensbereich und einer Rißaufweitung führt. Bevorzugt tritt die chemische Reaktion in den hüllrohrnahen Brennstoffzonen auf, die weiter innenliegenden Stengelkörner sind unempfindlicher, wie Kleykamp [32] zeigt. Untersuchungen über den zeitlichen Ablauf der Reaktion wurden bei General Electric [16] begonnen, konzentrierten sich aber vor allem auf die Brennstabdurchmesseränderung. Ein Schluß auf Abtragungsvorgänge an freien Brennstoffoberflächen oder die Reaktion an Korngrenzen ist z.Z. daraus noch nicht möglich.

2.1.4 Hüllrohrschaden mit Schmelzguttransport

Entweder im weiteren Schadensverlauf oder auch aufgrund einer lokalen Kühlungsstörung, nachfolgendem Hüllendefekt und Kontakt mit flüssigem Brennstoff ist ein Anschmelzen der Hülle und der Transport von Schmelzgut (Hüllmaterial und/oder Brennstoff) in Kühlmittelströmungsrichtung denkbar. Bei den dann herrschenden Temperaturen ist aber sicher kein flüssiges Natrium mehr in der direkten Umgebung des geschmolzenen Materials anzutreffen. Hier soll noch nicht auf Detektionsmethoden, Sicherheitsinstrumentierung und Notabschaltkriterien eingegangen, sondern lediglich die Möglichkeit diskutiert werden, daß auch aus solchen Prozessen Produkte entstehen können, die zur Blockadebildung beitragen.

Neben den Ergebnissen der TREAT-Experimente [28] in Argonne zeigt Abb. 9 einen weiteren Hinweis dafür, daß z.B. geschmolzenes Hüllmaterial auch Abstandshalter passieren kann, ohne diese zu beeinflussen. Es muß hinzugefügt werden, daß es sich bei dem abgebildeten BEVUS-Experiment [33] um ein elektrisch beheiztes Simulationsbündel in Natrium handelt. Bevor ähnliche Mengen Hüllmaterial in einem inpile-Bündel davonfließen, muß es zu sehr schweren Kühlungsstörungen kommen, die unbedingt

von der entsprechenden Instrumentierung entdeckt werden und zur Schnellabschaltung führen. Lediglich aus dem Kernbereich ausgetragenes Material dieser Art kommt für eine spätere Blockadebildung in Frage.

2.2 Einzelphänomene

Im folgenden sollen im wesentlichen die Punkte im Detail besprochen werden, die von besonderer Bedeutung für das hier behandelte Problem der Bildung von lokalen Kühlkanalblockaden und deren Wachstum aufgrund von Materialanlagerungen sind:

- Betrachtung der möglichen Ursachen für Hüllrohrschäden im leistungserzeugenden Bereich eines Reaktorkerns,
- Kornanlagerung aufgrund von Siebeffekten,
- Filtern von wesentlich kleineren Partikeln in ausgesiebttem Schüttgut,
- Probleme der Ausbreitung von freigesetztem Material,
- sekundäre Materialfreisetzungen, die weitere Kühlkanalblockaden bewirken können.

2.2.1 Hüllrohrschäden

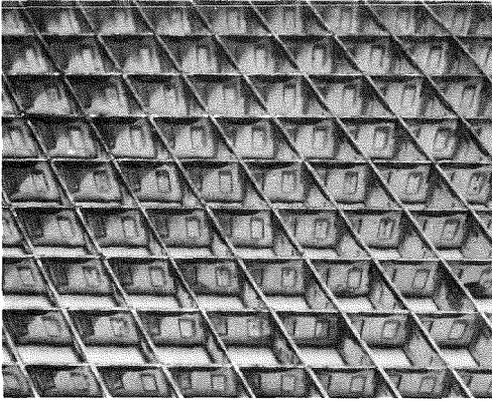
Im Abschnitt 2.1.3 wurde diskutiert, welche Möglichkeiten des Austrags von Material beim Auftreten von Hüllrohrschäden bestehen. Einen Überblick dazu geben Böhm et al. in [74]. Für das Auftreten von Hüllrohrschäden kommen im wesentlichen folgende Mechanismen in Frage:

- Die Belastbarkeit des Hüllrohres durch den Spaltgasinnendruck wird dadurch überschritten, daß durch Kriechverformung die niedrige Bruchdehnung des unter Neutronenbestrahlung versprödeten Hüllrohres überschritten wird. Wird durch enge Risse der Spaltgasdruck abgebaut, so ist die Gefahr verringert, daß ein Ausweiten des Risses infolge

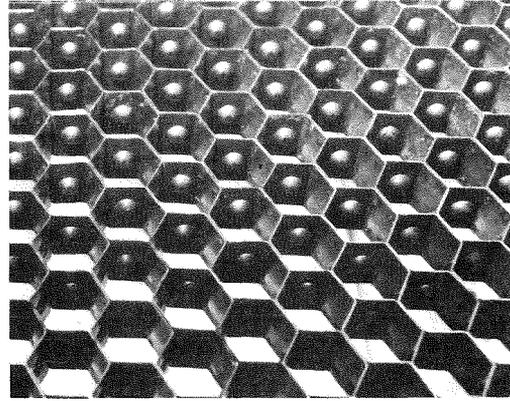
des Spaltgasüberdruckes geschieht. Daß allerdings ein weites Aufplatzen des Hüllrohres möglich ist, wurde ebenfalls durch Bestrahlungsexperimente u.a. von van Witzenburg und Kwast [38] gezeigt, allerdings erst bei Temperaturen um 1270 K und damit weit von den hier zu betrachtenden Betriebszuständen entfernt. Hinsichtlich der Menge des Brennstoffaustrages sagt die Rißbreite nach bisherigen Erfahrungen nicht viel aus.

- Insbesondere am oberen und unteren Übergang vom Brutstoff zum Spaltstoff wurde eine erhöhte Innenbelastung des Hüllrohres festgestellt durch die Ansammlung flüchtiger Spaltprodukte und durch Korrosion, d.h. chemische Reaktion der Hülle mit Spaltprodukten und Brennstoff [74]. Ohse und Schlechter [34] sowie Dienst et al. [35] weisen auf den starken Einfluß des Spaltproduktes Cäsium hin. Die Anreicherung des Spaltcäsiums nahe der oberen und unteren Brutzone wird auch von Geithoff und Ernst [36, 37] untersucht, wobei eine Abhängigkeit u.a. von der Sauerstoffstöchiometrie vermutet wird. Durch die korrosive Zwischenschicht an der Hüllrohrinnenseite wird auch die mechanische Wechselwirkung Brennstoff/Hülle verstärkt, die besonders bei Leistungszyklen zur Schadensbildung beiträgt [74].
- Aufgrund eines Anreicherungsfehlers in z.B. einem einzelnen Pellet entsteht eine Heißstelle und eine Verringerung der Festigkeit, welche zum Materialversagen aufgrund des Innendrucks führen.
- Das Hüllmaterial weist eine äußere Verletzung auf, die bei der Überprüfung des Brennstabes zwar keine Undichtigkeit bewirkte oder die erst aufgrund des Einbaus zustande kam. So kann z.B. ein Kratzer an der Oberfläche durch die Abstandshalterkonfiguration beim Zusammenbau entstehen. Die dann vorhandene Kerbwirkung kann insbesondere bei höherem Abbrand, d.h. höherem Spaltgasdruck und höherer Versprödung, zu einem Versagen des Hüllmaterials führen.

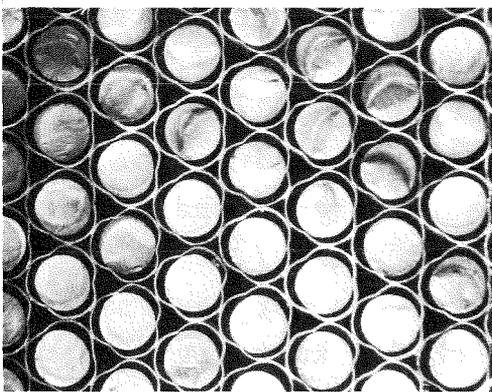
Der Korrosionsangriff von außen durch Natrium führt zu einer selektiven Auslösung der Legierungsbestandteile Cr und Ni



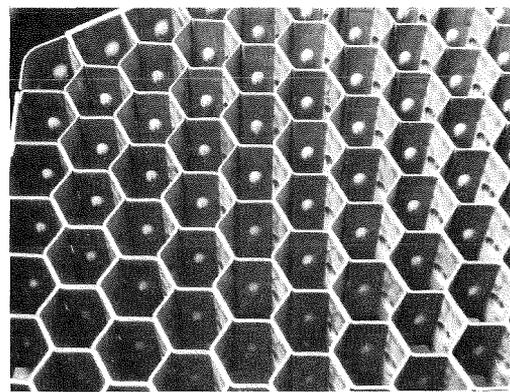
a) Rautengitter, gelötet



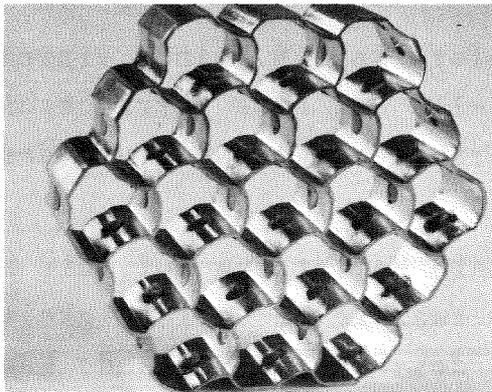
b) Wabengitter; runde Noppen, punktgeschweißt



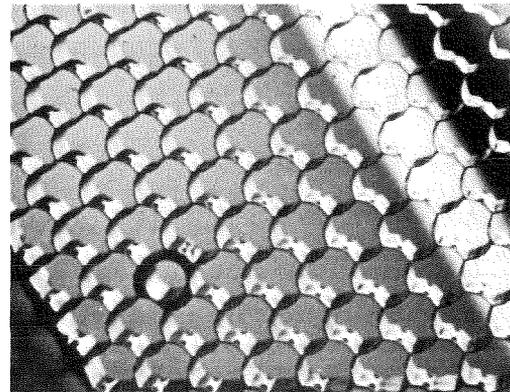
c) Röhrchengitter, punktgeschweißt



d) Wabengitter¹⁾, ovale Noppen, punktgeschweißt



e) Versuchstyp, elektroerodiert / 40_7



f) IA-Gitter²⁾, elektroerodiert

Abb. 10: Abstandshaltergitter verschiedener Bauart, Ausschnitte die Gitter d) und f) werden z.Z. für den Einsatz im Reaktor weiterentwickelt

1) Hersteller Belgo-Nucleaire

2) Bild wurde von Fa. Interatom zur Verfügung gestellt

der austenitischen Stähle aus der Oberfläche, der Einfluß ist aber gegenüber den anderen Materialbelastungen hinsichtlich der Hüllschadenbildung von untergeordneter Bedeutung [74].

Eine Ablagerung von schichtbildenden Stoffen, die den Wärmeübergang so verschlechtern könnten, daß sie zu einer Schadenstelle führten, wurde bisher weder in Bestrahlungsversuchen [22] noch in Korrosionsuntersuchungen mit gleichzeitiger Wärmeübertragung beobachtet [44].

Auf die Entstehung von Brennstabhüllenschäden durch Verletzungen haben zum ersten Mal die Auswertungen von Bestrahlungsproben bei DFR-435 [22, 39] Hinweise geliefert. Die Verlängerungen von Rissen zeigten in beiden Richtungen Kerbverletzungen. Diese können nicht nur durch fehlerhafte Ziehwerkzeuge bei der Materialherstellung bedingt sein, sondern auch durch eine entsprechende Abstandshalterkonfiguration entstehen. Insbesondere bei Bestrahlungsexperimenten kann der mehrmalige Ein- und Ausbau zu solchen Kerben führen.

Deshalb erscheint es an dieser Stelle sinnvoll, die bisher konzipierten Abstandshalter hinsichtlich ihrer Verletzungsmöglichkeiten für das Hüllrohr zu betrachten. In Abb. 10 sind verschiedene Abstandshalter im Detail so dargestellt, daß die Nocken als abstandshaltende Elemente sichtbar sind. Besonders sei auf den elektroerodierten Abstandshalter mit seinen flächigen Führungen verwiesen. Zwar weist dieser Abstandshalter gute Führungseigenschaften auf, jedoch könnten die scharfen Kanten insbesondere bei Hüllrohrunregelmäßigkeiten oder bei einem leichten Verkanten während des Einbaus das Rohr ritzen. Die Gefahr des Ritzens ist bei anderen Konfigurationen, wie z.B. den runden oder ovalen Abstandshalternoppen, nicht in dem gleichen Maße gegeben. Außerdem weisen experimentelle Ergebnisse von Möller [40] auf eine Temperaturerhöhung unter der Auflagefläche hin, die bei noppenförmigen Auflagern nicht gefunden wurde, wie Engels und Bishop [41] zeigten.

Aufgrund der vorliegenden experimentellen Hinweise erscheint es sinnvoll, die Abstandshalterkonfigurationen konstruktiv noch einmal unter dem Gesichtspunkt der Verletzungsgefahr und der Heißstellenbildung zu überprüfen. Hinzu kommt, daß gute Führungs- und Dämpfungseigenschaften der Auflager ein Vibrieren der Stäbe im Betrieb weitestgehend unterbinden sollen.

2.2.2 Kornanlagerung

Die in Frage kommenden Anlagerungsmaterialien

- Strukturmaterial metallischer Art oder dessen Korrosionsprodukte und
- Brennstoff und darin enthaltene Spaltprodukte

zeigen völlig unterschiedliche Verhaltensweisen.

Das Strukturmaterial hat den Vorteil, daß es innerhalb einer Blockade keine Leistung erzeugt, wenn man von der relativ niedrigen Leistungsdichte aufgrund der Gammastrahlung absieht. Zudem weist metallisches Material gegenüber keramischen Stoffen eine höhere Wärmeleitfähigkeit und ein besseres Temperatenausgleichsverhalten auf. Der Abtrag eines angelagerten Partikels, z.B. durch Korrosion durch Natrium, erfolgt dagegen so langsam, daß nicht damit zu rechnen ist, daß in absehbaren Zeiträumen wie einem Betriebszyklus auf diesem Wege eine Beseitigung der lokalen Blockade erfolgt. Auch andere Veränderungen aufgrund der Neutronenbestrahlung führen nicht dazu, daß sich die Konsistenz des Materials so wesentlich verändert, daß eine Blockade abgebaut wird.

Anders ist dies bei Anlagerung von Brennstoff im Bereich von Geometrierengungen wie Abstandshalter. Der Brennstoff kann zum einen aus bereits früher vorhandenen Hüllrohrbeschädigungen stammen, zum anderen aber auch direkt aus dem gleichen Brennelement aufgrund eines neu entstandenen Hüllmaterialschadens ausgetreten sein. Eine Blockade aus Brennstoff erzeugt Wärme und erhöht aus diesem Grunde die Gefahr

der Heißstellenbildung direkt im Bereich der Blockade. Die Energieerzeugung ist andererseits weiter mit der Bildung von Spaltprodukten verbunden, die wie der Brennstoff insgesamt auch mit dem Kühlmittel Natrium reagieren. Es kann so zu einer Konstitution des Materials kommen, welche z.B. durch die Vibration der umgebenden Brennstäbe zerschlagen werden kann.

Neben dieser chemisch-mechanischen Kornzerlegung und der damit verbundenen Möglichkeit, eine Blockade abzubauen, ist auch eine Kornzerlegung aufgrund von thermisch induzierten Spannungen vorstellbar. Die dann entstehenden kleineren Partikeln können durch weitere geometrische Engstellen hindurchgespült werden oder entweder direkt oder zu einem späteren Zeitpunkt durch Filterwirkung zu einer Verdichtung von bereits vorhandenem Schüttgut an lokalen Blockadestellen führen. Die Wärmeentwicklung im Schüttgut hat allerdings im physikalisch-chemischen Sinne nicht nur den positiven Aspekt, die Reaktionen zu beschleunigen, sondern fördert andererseits auch Grenzflächenerscheinungen wie das Kornverbacken aufgrund von Diffusionsprozessen, welches nicht erwünscht ist.

Insgesamt läßt sich die Situation an Hand einer Bilanzgleichung für die Gesamtmasse einer Blockadeschüttung zeitabhängig darstellen:

$$\begin{aligned}
 V_{B1}(t) \cdot \rho_{B1}(t) - M_{B1}(t) = & \underbrace{\int_0^t \int_{x_{\min}(t)}^{x_{\max}(t)} \dot{m}(x) dx dt}_{\text{freigesetztes und zur Abscheidung geeignetes Material}} - \underbrace{\int_0^t \dot{m}_{\text{chem}} dt}_{\text{chemische Abtragung}} \\
 & + \underbrace{\int_0^t \dot{m}_{\text{mech}} dt}_{\text{mechanische Abtragung}} - \underbrace{\int_0^t \dot{m}_{\text{therm}} dt}_{\text{thermische Abtragung}} \quad (1)
 \end{aligned}$$

Die einzelnen Mechanismen sind identifizierbar, ihre Abhängigkeit von systeminternen Randbedingungen ist jedoch bisher praktisch unbekannt:

- Über die Abhängigkeit des minimalen, noch zurückgehaltenen Korndurchmessers x_{\min} von der Schüttungsgeometrie und deren zeitabhängiger Ausbildung liegen bisher keine Anhaltspunkte vor. Erste Modellansätze dazu werden in 4.3 entwickelt.
- Die chemische Abtragung ist über die Bildungsrate von Uranat oder Plutonat vom Sauerstoffgehalt des Brennstoffs damit von den entsprechenden chemischen Potentialen genauso abhängig wie von der Diffusionsrate für Sauerstoff durch bereits abreagierte Schichten. Die Prozesse sind temperaturabhängig.
- Die mechanische Zerkleinerung aufgrund von Vibration wurde bisher nicht in die Betrachtung einbezogen.
- Die Existenz der durch chemischen Angriff zu den Korngrenzen erscheint gesichert, über Zeitverläufe liegen nur grobe Abschätzungen vor (2-3 Pellets in ca. 40 Tagen [22_7]). Über den Einfluß thermisch induzierter Spannungen auf die Brennstoffzerkleinerung liegen keine Angaben vor.

Die Bilanzierung an dieser Stelle soll zunächst eine Gesamtübersicht ermöglichen. In Kap. 4.3 und 4.4 wird auf den zu erwartenden Massenanstieg näher eingegangen. Die Schlußbetrachtung muß dann ergeben, inwieweit es notwendig ist, Einzelposten der Bilanz noch genauer zu untersuchen.

2.2.3 Ausbreitungsvorgänge, Sieben und Filtern

Wenn davon ausgegangen wird, daß ein Hüllschaden aufgetreten ist und entsprechend Brennstoffaustrag stattfindet, so breitet sich dieser Brennstoff zunächst im Brennelement und dann auf seinem weiteren Transportweg aus.

Bei Bildung und Wachstum von lokalen Kühlkanalblockaden muß mit zwei wesentlichen Effekten gerechnet werden:

- Dem rein mechanischen Sieben an Geometrieveränderungen und der damit verbundenen Ausscheidung von größeren Partikeln aus dem Transportsystem Flüssigkeit/Feststoffe und
- Filtervorgängen aufgrund von Oberflächeneffekten, welche allerdings langsamere Strömungsgeschwindigkeiten verlangen, damit die Oberflächenkräfte gegenüber den Strömungskräften wirksam werden können. Außerdem müßten die Kanalgeometrien in derselben Größenordnung liegen wie die Korngrößen, damit sich die Oberflächen nahe genug kommen, wobei aber elektrostatische Haftkräfte im metallischen leitenden Kühlmittel Natrium entfallen.

Während die mechanischen Siebeffekte zunächst zu einem losen Haufwerk führen, kann nachfolgend in diesem Haufwerk Verbacken der einzelnen Teilchen eintreten; dies betrifft sowohl metallische Strukturmaterialien, deren Korrosionsprodukte wie auch Brennstoff mit darin enthaltenen Spaltprodukten. In dem dann entstandenen porösen System mit einem gewissen Restdurchsatz scheiden sich auch kleinere Partikel durch Filterwirkungen ab. Dies führt zu einer Verringerung des Restdurchsatzes, zu einer Verdichtung der Blockade und im Falle von Brennstoff zu einer Erhöhung der Volumenleistung bei gleichzeitiger Abnahme der Kühlung. Der Schaden breitet sich aus.

Im Vorgriff auf noch zu diskutierende experimentelle Ergebnisse muß hier angeführt werden, daß eine Materialanlagerung zu einer Veränderung des Strömungsfeldes in ihrer direkten Umgebung führt. Diese Umströmung bedingt, daß weitere ankommende Partikel in radialer Richtung nach außen abgelenkt werden (^{-26_7*}). Dies bedeutet, daß lokale Blockaden sich bei entsprechenden geometrischen Verhältnissen und Korndurchmessern bevorzugt radial ausbreiten und keine axial gesehen dicken Haufwerke bilden.

Ausgenommen davon sind Korngrößenfraktionen, deren Dimension die Spaltweite zwischen den Brennstäben überschreitet. Insofern ist die Spaltweite in der Bündelgeometrie für die Bildung von axial ausgedehnten Blockaden von Bedeutung. Sie muß sich bei fortgeschrittenen Reaktorkonzepten auch an der Korngrößenverteilung des ausgetragenen Brennstoffs in Bestrahlungsexperimenten orientieren. Die auftretenden Korngrößen werden allerdings im Falle von Hüllschäden auch durch die Schadensgeometrie begrenzt.

Partikel aus Strukturmaterial, Korrosionsprodukten oder Brennstoff, die in ihrem Durchmesser so klein sind, daß sie alle geometrischen Engstellen passieren, gelangen im Zuge ihres Weitertransportes schließlich in das obere Reaktorplenum. Dort verlangsamen sich die Strömungsgeschwindigkeiten des Kühlmittels Natrium erheblich; aus diesem Grunde ist die Sinkgeschwindigkeit abhängig von der Dichte des Materials und der Korngröße der einzelnen Partikel hier eine der entscheidenden Größen für den weiteren Verlauf der Partikelwanderung. Sehr dichte Partikel, wie z.B. Brennstoff, lagern sich relativ schnell aufgrund ihrer hohen Sinkgeschwindigkeit an Stellen niedriger Strömungsgeschwindigkeit ab. An der oberen Kernhalterung bzw. den Instrumentierungseinrichtungen über dem Reaktorkern ist deshalb mit einer verstärkten Kontamination durch Brennstoff zu rechnen. Werden Partikel auch noch in die Kühlmittelabströmleitungen hineingetragen, so gibt es weitere Möglichkeiten für ihre Abscheidung, z.B. in den Natrium-Natrium-Zwischenwärmetauschern oder den Totwasserbereichen der Absperrarmaturen. Dadurch wird die Wartungsfähigkeit der Anlage beeinträchtigt.

Abgelagertes Material kann zu einem späteren Zeitpunkt aufgrund einer Strömungsfluktuation oder einer Funktionsbetätigung (bei Armaturen) wieder in den Kreislauf und damit z.B. auch in Brennelemente transportiert werden. Eine besondere Rolle spielt in diesem Zusammenhang der im SNR

vorgesehene Gasabscheider im unteren Reaktorplenum. Diese auf der Zentrifugalwirkung beruhende Einrichtung trennt nicht nur weniger dichte Medien, wie z.B. Gas vom Kühlmittel, sondern scheidet genauso gut auf der anderen Seite wesentlich dichtere Materialien aus der Strömung ab. Die geometrische Konfiguration des SNR-Gasabscheiders (vgl. Abb. 2) legt den Schluß nahe, daß auch bei längerem Betrieb der Anlage eine ausreichende Abscheidung schwerer Fraktionen gewährleistet ist. Nach den bisherigen Bestrahlungsergebnissen ist zum einen nicht mit einem extrem hohen Materialanfall zu rechnen, zum anderen liegt eine sehr große Abscheidefläche vor.

2.2.4 Sekundäreffekte

Wesentliche sekundäre Folgen sind in begrenzten Bereichen mit höherer Temperatur Ereignisse wie Hüllrohrschmelzen und Brennstoffschmelzen. Dazu muß allerdings zunächst das Kühlmittel z.B. durch Siedevorgänge aus dem betrachteten Volumenbereich entfernt werden. Erst dann werden die für Schmelzvorgänge erforderlichen Temperaturen erreicht [3, 6].

Van Erp et al. [7] kommen in einer ausführlichen Analyse des bisherigen Kenntnisstandes zu dem Schluß, daß solche Ereignisse bei nominalen oder nahe dabei liegenden Betriebszuständen in einem Brennelement äußerst unwahrscheinlich seien. Im Zusammenhang mit Fragen der Bildung und des Wachstums lokaler Kühlungsstörungen werden weitergehende und später liegende Störfallsituationen wie Schmelzvorgänge in größeren Kernbereichen nicht behandelt.

Zwar sind die nachfolgenden Prozesse wie die thermische Wechselwirkung zwischen Hüllmaterialschmelze oder Brennstoffschmelze und Kühlmittel nicht mehr direkt Gegenstand dieser Betrachtung, aber die daraus entstehenden Endprodukte kommen durchaus als Blockadebildner für nachgeordnete geometrische Engstellen oder für spätere Zeitpunkte des Anlagenbetriebes in Frage. Die in Abb. 11 gezeigten Ergebnisse aus entsprechenden experimentellen Untersuchungen [19, 42] lassen dies von den auftretenden Korngrößen aus gesehen jedenfalls zu.

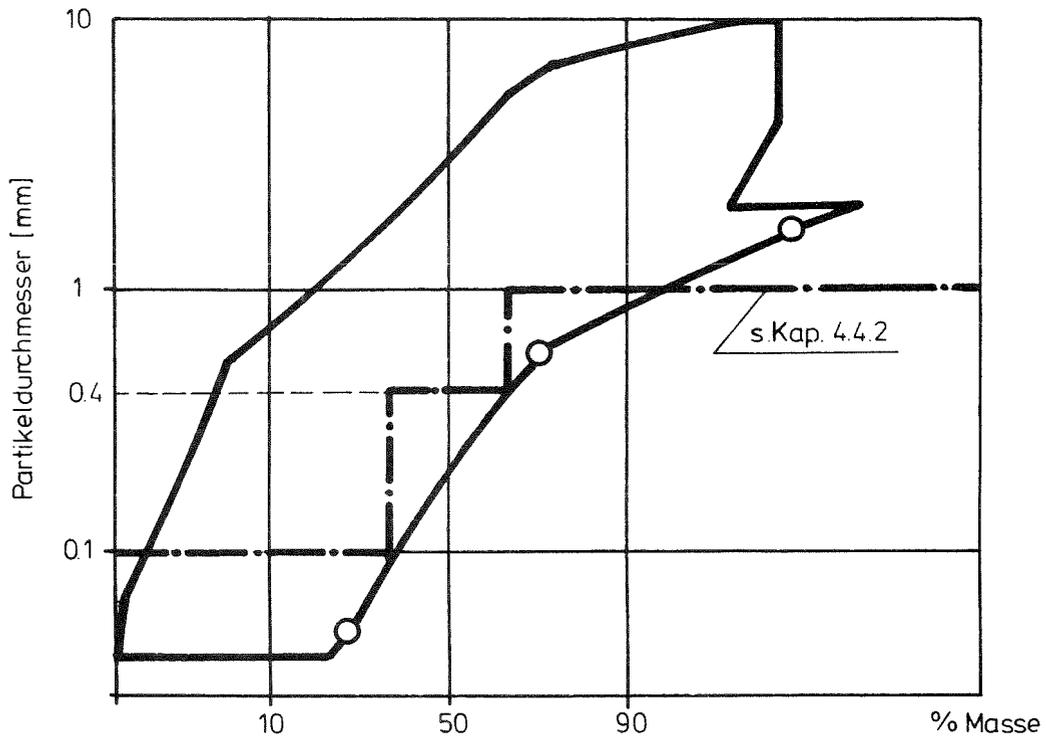


Abb. 11: Bereich der Verteilungen von Partikeln aus UO_2 /Natrium-Wechselwirkungsexperimenten in-pile und out-of-pile [19], 0 [42]

3. THERMOHYDRAULISCHE UNTERSUCHUNGEN AN LOKALEN STÖRUNGEN IN BRENNELEMENTBÜNDELN

Für die Beurteilung der thermohydraulischen Auswirkungen nach der Bildung von lokalen Blockaden im Bereich von Abstandshaltergittern sind zunächst genauere Kenntnisse der dadurch hervorgerufenen Veränderungen des Strömungsfeldes erforderlich, da sie den Wärmeübergang und damit das Temperaturfeld in einem Brennelementbündel beeinflussen. Darauf aufbauend werden Ergebnisse aus experimentellen Untersuchungen des Temperaturfeldes behandelt. Da sich die ersten vier Abschnitte praktisch ausschließlich mit Simulationsuntersuchungen in Wasser befassen, wird in einem letzten Abschnitt auf Natriumexperimente zur Problemstellung der lokalen Kühlkanalblockaden eingegangen.

3.1 Phänomenologische Untersuchung der Strömungsverteilung

Im Bereich lokaler Blockaden bilden sich in Brennelementbündeln Totwassergebiete. Für die Berechnung mittlerer Kühlmitteltemperaturen in einem Totwassergebiet ist es noch ausreichend, das Volumen des Totwassers sowie das Massenaustauschverhalten zwischen Totwasser und gesunder Strömung zu kennen [45_7*]). Aussagen über die örtliche Temperatur in den enggepackten Brennstabbündeln bei Kühlmitteldurchflußstörungen werden aber nur möglich, wenn man eine genauere Kenntnis über die Strömungsverhältnisse im Totwasser selbst besitzt.

Zusätzlich ist der Einfluß folgender Parameter von Interesse:

- der Strömungsgeschwindigkeit bzw. der Reynoldszahl,
- des Restdurchsatzes durch teilweise verstopfte Unterkäle oder z.B.
- der geometrischen Verhältnisse, die sich durch die Anwesenheit eines Abstandshalters nach der Störung verändern können.

Auch der Einfluß der veränderten Unterkanalgeometrie an der Brennelementkastenwand ist von Bedeutung, da Störungen auch in wandnahen Bereichen auftreten können.

Um diese unterschiedlichen Einflüsse zunächst phänomenologisch zu untersuchen, wurde eine Brennelementattrappe hergestellt, die zwar die Originalgeometrie der SNR-Unterkanäle aufwies, aber in einer Symmetrieebene durch die Kanten des Sechskantkastens halbiert wurde. Wie in Abb. 12 dargestellt, wurde die entstehende Längsschnittfläche durch Plexiglasscheiben mit verschiedener Oberflächenstruktur abgedeckt. Dadurch wurde eine optische Beobachtung des Strömungsverhaltens um Blockaden in diesem wandnahen Bereich möglich. Da in den Versuchen ausschließlich das hydraulische Verhalten untersucht wurde, konnte eine Simulation in einem Wasserkreislauf vorgenommen werden. Eine genaue Beschreibung der Versuchseinrichtungen, der Versuchsführung sowie detaillierte Ergebnisse finden sich in [46*]).

Als Beispiel aus den zahlreichen Versuchsergebnissen sei hier in Abb. 13 eine Momentaufnahme der Strömung im Totwasser gezeigt, bei der sich die Blockade direkt unterhalb eines Abstandshaltergitters befindet. Diese Konfiguration kommt den in dieser Arbeit diskutierten Problemen sehr nahe. Es bildet sich hinter dem Abstandshaltergitter ein Totwassergebiet mit einer Rezirkulationsströmung aus. Allerdings ist im Bereich des Abstandshaltergitters mit stagnierender Flüssigkeit zu rechnen. Diese Flüssigkeitsmassen wirken auch in die Rezirkulationszone hinein, wie spätere Untersuchungen mit Temperaturprofilmessung von Basmer [47] gezeigt haben. Die Wirbelbewegung wird gegenüber Versuchen ohne Abstandshaltergitter verlangsamt und damit die Wärmeabfuhr behindert, was zu einer örtlichen Temperaturerhöhung führt.

Eine schematische Zusammenfassung der verschiedenen erzielten Versuchsergebnisse zeigt Abb. 14. Auch wenn die

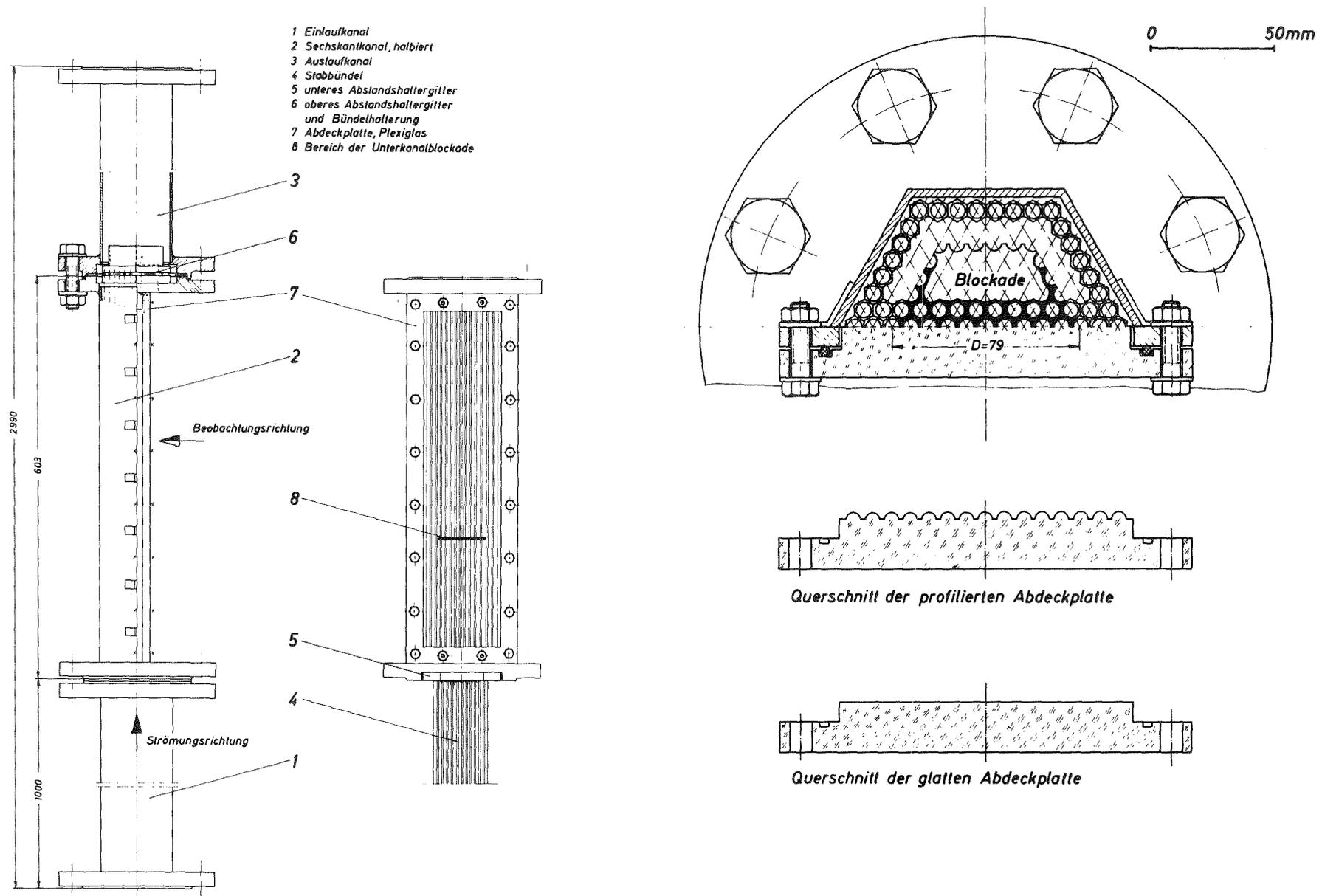


Abb. 12: Versuchsanordnung zur phänomenologischen Untersuchung des Umströmungsverhaltens an ebenen lokalen Kühlkanalblockaden in Brennelementbündeln [46_7*]

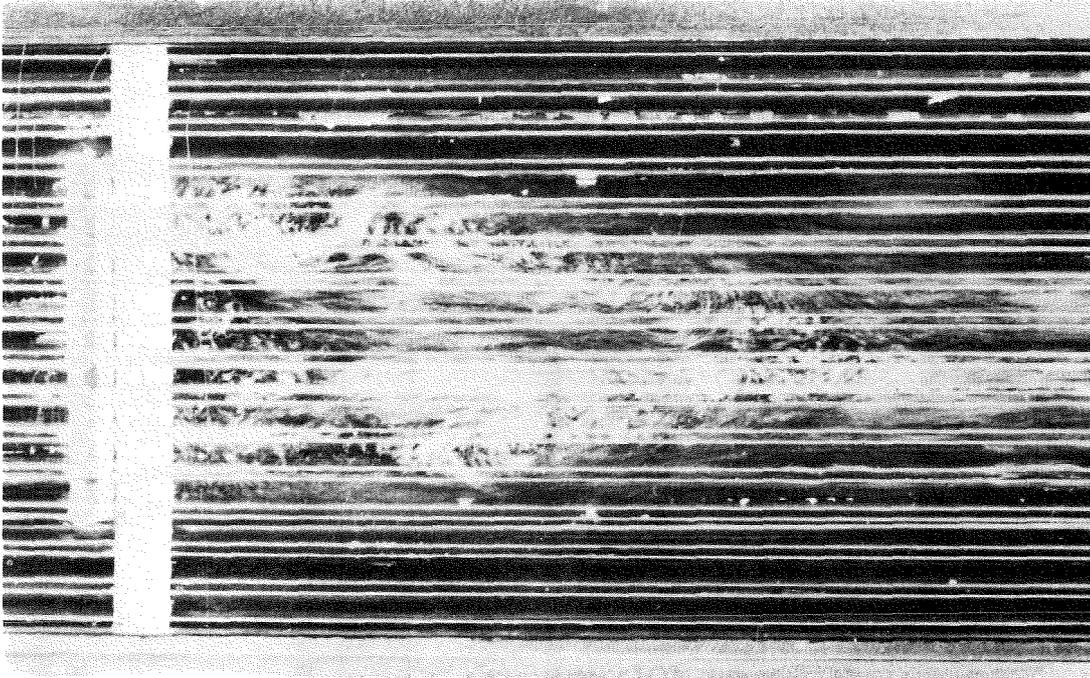


Abb. 13: Momentaufnahme der Strömungsverhältnisse im Totwasser, Abstandshaltergitter direkt oberhalb der Blockade, kein Restdurchsatz (1/250 s, Serie 10/3.2) [46 J*]

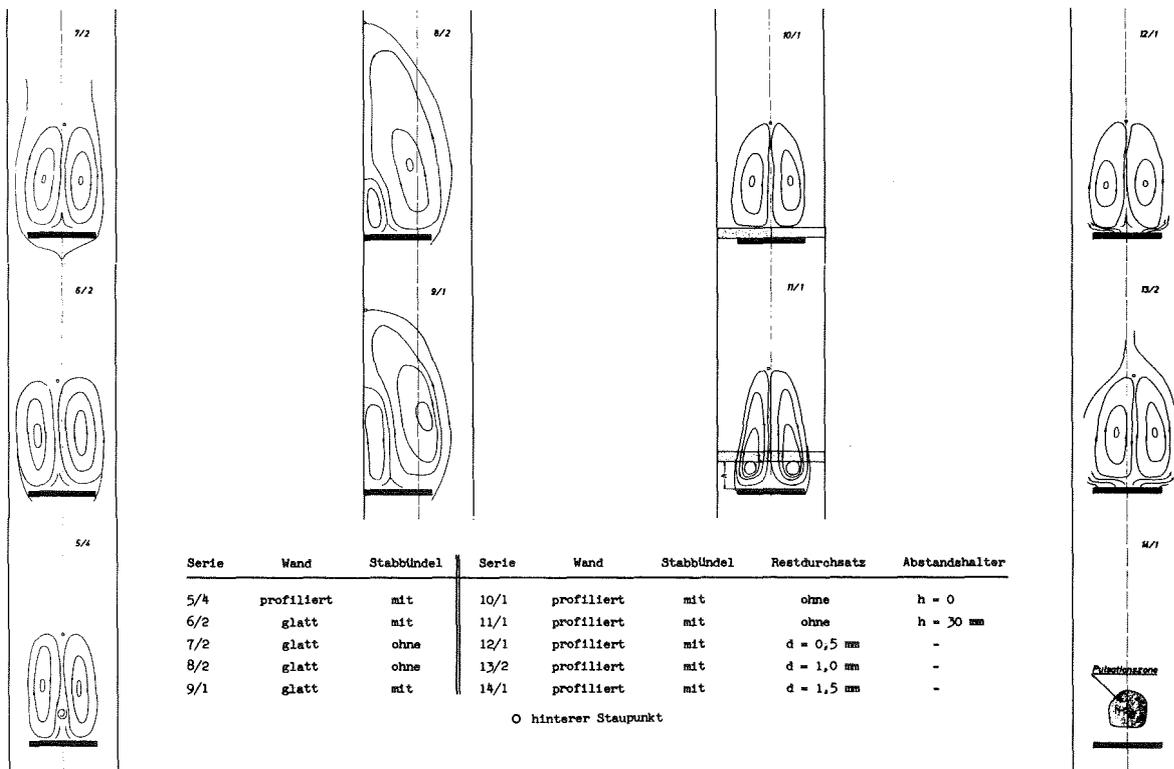


Abb. 14: Zusammenfassende schematische Darstellung der phänomenologischen Strömungsuntersuchungen an Totwassergebieten [46 J*]

phänomenologischen Untersuchungen nur qualitative Ergebnisse erbrachten, ist es doch möglich, für die theoretischen Untersuchungen von lokalen Störungen in Brennelementbündeln und insbesondere für die Interpretation der Experimente zur Messung der Temperaturfelder wesentliche Details zu entnehmen. Im einzelnen wurde festgestellt:

- Auch bei Anwesenheit von Stabbündeln in einem Strömungskanal bilden sich hinter ebenen Störungen Rezirkulationszonen.
- Eine Abhängigkeit der Länge des Totwasserbereiches hinter einer Störung von der Reynoldszahl wurde in dieser Untersuchung nicht festgestellt.
- Durch die Anwesenheit von Abstandshaltergittern im Totwasserbereich wird die Strömung in ihrer prinzipiellen Form nicht wesentlich beeinflusst.
- Ein geringer Durchsatz durch die blockierte Zone führt zum Abheben der Rezirkulationsströmung des Totwassergebietes hinter einer Störung. Mit steigendem Restdurchsatz nimmt der Abstand zwischen der Rezirkulationsströmung und der Störung zu. Bei einem Restdurchsatz von etwa 15 % des ungestörten Durchsatzes wurde eine weitgehende Auflösung des Totwassergebietes festgestellt. Es entstehen stabile Zonen niedriger Strömungsgeschwindigkeit, wie auch Judd [43] zeigte, die zu entsprechend hohen Temperaturen führen.

Die Parameter der beschriebenen Versuche waren sehr weit gestreut, so daß die Ergebnisse detaillierte Kenntnisse über die bei Kühlkanalblockaden auftretenden Strömungsphänomene vermittelten. Die Reproduzierbarkeit der Untersuchungen wurde überprüft und war befriedigend.

3.2 Untersuchungen des Strömungsfeldes

Um eine Bewertung der Temperaturverhältnisse in den festgestellten Rezirkulationszonen vornehmen zu können, wurde eine

mittlere Kühlmitteltemperatur im Totwasserbereich berechnet. Unter den Annahmen

- daß die Wärmeleitung gegenüber dem konvektiven Wärmetransport in der hochturbulenten Strömung vernachlässigt werden kann und
- daß die Temperatur im Totwassergebiet gleichförmig ist,

ergibt sich die Energiebilanz für die Wärmezufuhr aus den Brennstäben an das Kühlmittel im Totwassergebiet und die Wärmeabfuhr durch den turbulenten Massenaustausch zu:

$$\dot{Q}_{TW} = \dot{m} \cdot c_p (\bar{\theta}_{TW} - \bar{\theta}_0) \quad (2)$$

Um die Berechnung der Mitteltemperatur $\bar{\theta}_{TW}$ vornehmen zu können, benötigt man genauere Angaben über den Massenaustausch \dot{m} zwischen dem Totwasser und der Hauptströmung. Der Massenaustausch kann durch eine Konzentrationsmessung bestimmt werden, wie z.B. Quick [48] oder Winterfeld [49] zeigten. In den hier berichteten Versuchen von Krings [50] und Hauffe [51] wurde entsprechend die stationäre Beimischung von Kaliumchloridlösung in das Totwasser zum Zeitpunkt $t = 0$ plötzlich unterbrochen und der Konzentrationsabfall mit der Zeit gemessen. In vereinfachter Form bei ideal durchmischem Totwasser und kleinen Konzentrationen des Zusatzstoffes ergibt sich der zeitliche Verlauf der Konzentration aus

$$-\dot{m} \cdot c = M \cdot \frac{dc}{dt} \quad (3)$$

Nach Integration von Gl. 3 erhält man mit $c(t = 0) = c_{max}$ als Lösungsansatz

$$c = c_{max} \cdot e^{-\frac{\dot{m}}{M} \cdot t} = c_{max} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4)$$

Wenn die Totwassermasse M bekannt ist, kann die Massenaustauschrate \dot{m} aus der gemessenen Zeitkonstanten τ' der Exponentialfunktion unmittelbar bestimmt werden, ohne daß der Absolutwert der Konzentration bekannt sein muß. Die Zeitkonstante τ' kann auch als mittlere Verweilzeit eines Teilchens im Totwasser interpretiert werden.

Daß die Konzentrationsverteilung und der Stoffaustausch herangezogen werden können für die Beschreibung der Temperaturverteilung im Totwassergebiet zeigt ein Vergleich der Differentialgleichung für den Stoffaustausch (hier zweidimensional)

$$u \frac{\delta c}{\delta x} + v \frac{\delta c}{\delta y} = \underline{D_c \nabla^2 c} - \left(\frac{\delta u' c'}{\delta x} + \frac{\delta v' c'}{\delta y} \right) \quad (5)$$

mit der zweidimensionalen Energiegleichung

$$u \frac{\delta \theta}{\delta x} + v \frac{\delta \theta}{\delta y} = \underline{\frac{\lambda}{\rho c_p} \nabla^2 \theta} - \left(\frac{\delta u' \theta'}{\delta x} + \frac{\delta v' \theta'}{\delta y} \right) \quad (6)$$

wie er auch von Kirsch [11] angeführt wird. Für beide Gleichungen wird eine inkompressible Strömung mit zeitlich stationären Mittelwerten vorausgesetzt. Innerhalb der Strömung sollen keine Quellen für Zusatzstoff bzw. Wärme existieren. Man sieht sofort, daß bei ähnlicher Strömungsverteilung die Ähnlichkeit der Gleichungen 5 und 6 allein durch die Glieder der molekularen Diffusion bestimmt wird, die in den Gleichungen unterstrichen gekennzeichnet sind.

Zur Ermittlung der Totwassermasse M muß man das Totwasservolumen bzw. die Begrenzungsfläche zwischen Totwasser und Hauptströmung in ihrer Größenordnung genauer kennen. Um die Ausdehnung des Totwassergebietes zu bestimmen, wurde eine neue Meßmethode entwickelt. Die Begrenzungsfläche für das Totwasser wurde aus dem Profil des statischen Druckes ermittelt [51, 52]*). Das Ergebnis aus diesen Messungen für zwei verschieden große Blockaden ist

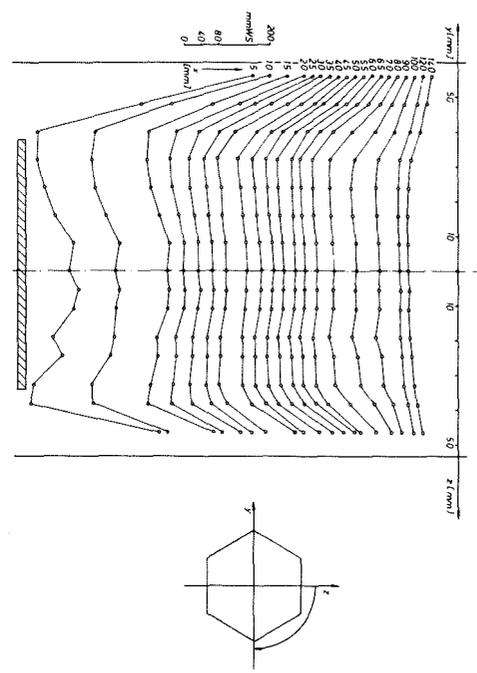
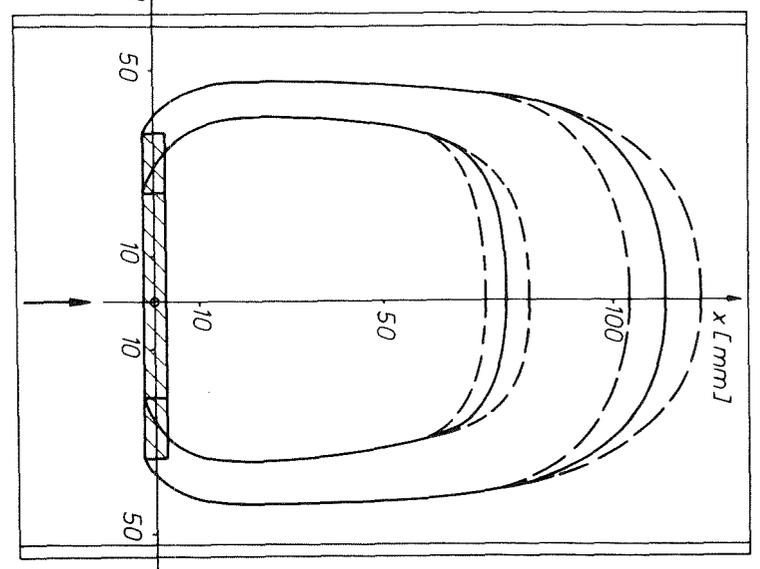


Abb. 15a: Druckgradienten in der Kühlmittelströmung zur Bestimmung der Totwassergrenzen

Abb. 15b: Totwassergrenzen für zwei ebene Blockaden (14,7 %; 41,1 %)

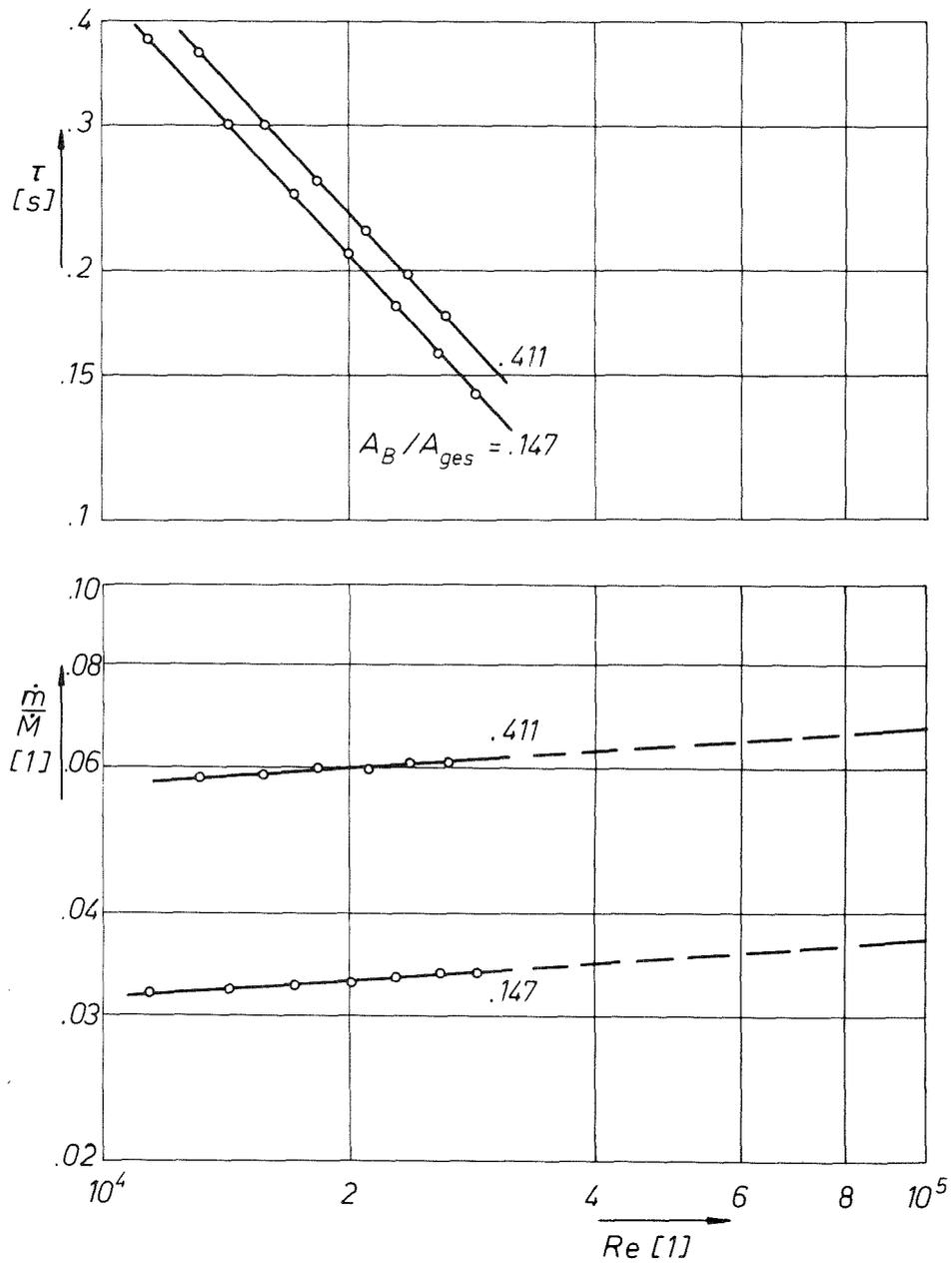


Abb. 16: Verweilzeit und Massenaustausch zwischen Totwasser und Hauptströmung in Abhängigkeit von der Reynoldszahl und der Blockadegröße

in Abb. 15 dargestellt. Abb. 15a zeigt, daß sich über einen weiten Bereich die Stellen des maximalen Druckgradienten gut bestimmen lassen, für die theoretische Überlegungen von Kirsch [11] ergaben, daß sie in etwa mit der Begrenzung des Totwassergebietes übereinstimmen. Das Ende des Totwassergebietes wird da angenommen, wo sich das Druckprofil im Rahmen der Meßgenauigkeiten nicht mehr ändert. Am hinteren Staupunkt wird deshalb die Bestimmung der Totwasserbegrenzung ungenau. Abb. 15b zeigt die ermittelte Totwasserbegrenzung für zwei verschiedene Blockadegrößen. In einem großen Bereich ist die Begrenzung nahezu parallel zur Hauptströmungsrichtung. Die Gesamtform stimmt mit derjenigen gut überein, die in den phänomenologischen Untersuchungen ermittelt wurde (vgl. Abb. 14).

Ergebnisse aus den Messungen der mittleren Verweilzeit zeigt Abb. 16. Die beiden Kurven für eine kleine Blockade mit 14,7 % versperrem freien Querschnitt und einer größeren mit 41 % versperrem freien Querschnitt lassen sich in doppellogarithmischem Maßstab sehr gut durch eine Gerade annähern. Eine Abhängigkeit des Massenaustausches von der Reynoldszahl ist nur sehr schwach gegeben. Eine Extrapolation auf größere Reynoldszahl erscheint deshalb gerechtfertigt.

Mit den ermittelten Daten für das Strömungsfeld wurden mittlere Kühlmitteltemperaturen im Totwasser unter Zugrundelegung der Auslegungsdaten aus [53] berechnet. Die Auslegungsdaten sowie die berechneten mittleren Kühlmitteltemperaturen im Totwasser zeigt Tab. 1. Dabei wurde angenommen, daß eine Blockade am Innenrand der zweiten Corezone liegen sollte, also an der Stelle des radialen Leistungsmaximums.

Axial wurde die Blockade einmal in Coremitte an der Stelle des axialen Leistungsmaximums und zum anderen am Coreende

| | | Kernmitte | | Kernende | |
|---|---------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| Stableistung | $[W/cm]$ | 446 | | 190 | |
| Versperrungsanteil | $[l]$ | 0,147 | 0,411 | 0,147 | 0,411 |
| Kühlmitteltemperatur unmittelbar vor der Blockade | $[^{\circ}C]$ | 478 | 489 | 576 | 598 |
| Mittl. Kühlmitteltemp. im Totwasser | $[^{\circ}C]$ | 688 \pm 14 | 781 \pm 20 | 665 \pm 6 | 723 \pm 9 |
| Siedetemperatur | $[^{\circ}C]$ | 1000 | | 950 | |

Tab. 1: Mit den Auslegungsdaten nach [53] (Kerneintritts-temperatur 380°C, Kernaustrittstemperatur 576°C, Durchsatz/Brennelement 23,0 kg/s) berechnete mittlere Kühlmitteltemperaturen im Totwasser

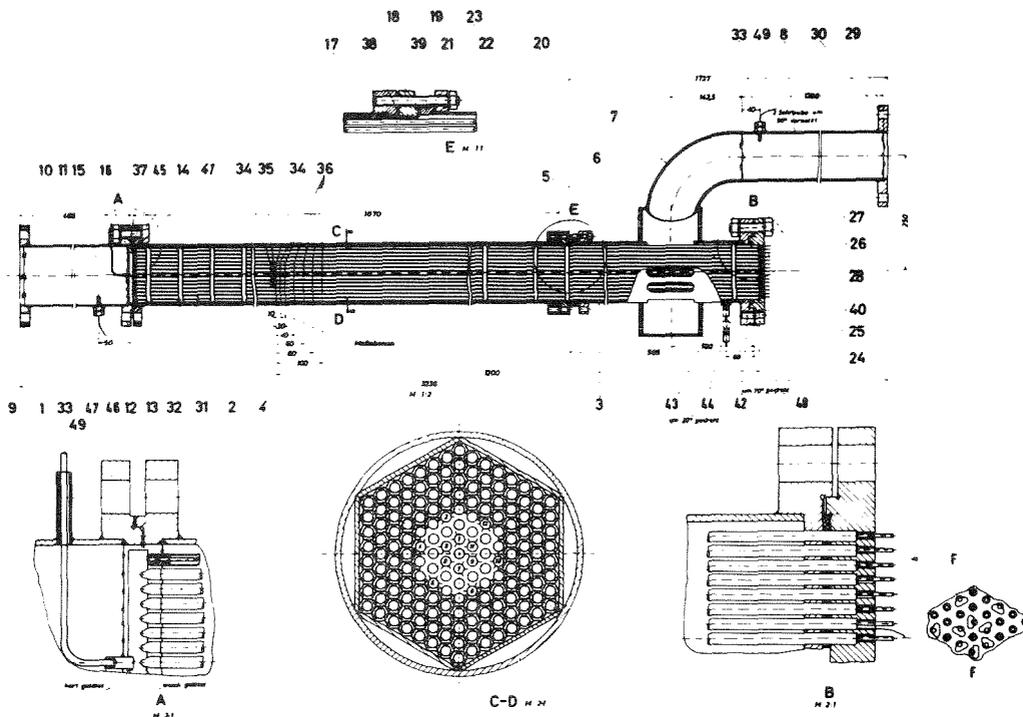


Abb. 17: Elektrisch beheiztes Brennelementbündelmodell zur experimentellen Ermittlung der Temperaturverteilung im Totwasser um ebene lokale Kühlkanalblockaden

an der Stelle maximaler Kühlmitteltemperatur angenommen. Die Werte für die mittleren errechneten Kühlmitteltemperaturen zeigen, daß hier die Auslegungstemperaturen um ein beträchtliches überschritten werden. Der Vergleich mit der Siedetemperatur ergibt zwar noch einen großen Abstand, jedoch muß die erreichte mittlere Totwassertemperatur auch unter dem Gesichtspunkt beurteilt werden, ob sie zu weiteren Hüllenschäden führt. Dazu kann festgestellt werden, daß sie die Auslegungstemperatur besonders in Kernmitte beträchtlich überschreitet und eine entsprechende Festigkeitsreduktion der Hülle bewirkt.

Bereits die in 3.1 berichteten Ergebnisse zeigten deutlich, daß mit Gebieten niedriger Strömungsgeschwindigkeit zu rechnen ist, in denen örtlich noch höhere Temperaturen als die berechneten Mitteltemperaturen erreicht werden. Solche Zonen liegen z.B. in der Wirbelmitte oder in den Bereichen direkt hinter der Blockade und im stromabliegenden Stau-punkt. Auch bei Blockaden mit Restdurchsatz ist damit zu rechnen, daß in einem stabilen Gebiet mit langsamer Strömungsgeschwindigkeit höhere Temperaturen auftreten.

3.3 Untersuchung des Temperaturfeldes¹⁾

Um einen genaueren Einblick in die Temperaturverteilung im Totwasser hinter lokalen Blockaden zu bekommen, wurde ein spezielles elektrisch beheiztes Brennelementbündelmodell entwickelt und gebaut. Die Teststrecke ist in Abb. 17 dargestellt. Mit ihr wurden zahlreiche unterschiedlich große ebene Blockaden untersucht, die sich sowohl in zentraler Lage wie auch in einer Ecklage befanden. Die Ergebnisse (Abb. 17, 55^{*}), 56_7 zeigten, daß die von den Strömungsuntersuchungen her vermuteten Temperaturverhältnisse tatsächlich auftreten. Insbesondere gab die Detailstruktur der Temperaturverteilungen Anlaß zu einer genaueren Überprüfung der lokalen Strömungsverhältnisse.

¹⁾Übertragbarkeit auf Natrium siehe Kap. 3.5

In Abb. 18 ist ein Beispiel für eine ermittelte Temperaturverteilung dargestellt. Es zeigte sich, daß bei weiteren phänomenologischen Untersuchungen besonders auf die Feineinflüsse von Abstandshaltergittern oder sonstigen Störungen im Brennelement geachtet werden muß. Im Kern des quasistationären Wirbels der Rezirkulationszone ist deutlich eine höhere Temperatur zu erkennen. Die höchsten Temperaturen treten jedoch direkt hinter der Blockade auf, wo die Rückströmung der Rezirkulationswirbel auf die Blockade auftrifft. Hier ist der Einfluß der Vermischung mit kälterer Außenflüssigkeit am geringsten. Im hinteren Stau-punkt liegt ein weiteres, allerdings kleineres relatives Maximum der Temperatur. Bemerkenswert bei allen durchgeführten Versuchen war der geringe Ausgleich in Umfangsrichtung. Spezielle Versuche mit Schiefplast von Basmer [47] bestätigen den praktisch zu vernachlässigenden Massen- und damit Wärmetransport senkrecht zu Radius und Längsachse am Umfang einer Totwasserzone.

Insbesondere mit dem britischen Rechenprogramm SABRE (Subchannel Analysis of Blockage in Reactor Element) [57] wurden eine Reihe von Berechnungen zur Temperaturverteilung vorgenommen. Dabei wird nur das Gebiet der einphasigen Flüssigkeitsströmung betrachtet. Herbert und Kirsch [58] zeigen zwar die prinzipielle Berechenbarkeit auf, weisen jedoch wie Basmer et al. [56] darauf hin, daß wegen zu einfachen Turbulenzmodells in SABRE besonders bei größeren Blockaden noch keine gute Übereinstimmung mit experimentellen Ergebnissen zu erreichen ist. Rezirkulationszonen, wie sie in Abb. 14 gezeigt sind, können numerisch noch nicht befriedigend behandelt werden, u.a. weil hier die Gradienten von Temperatur und Massenstrom nicht dem dreidimensionalen Maschennetz folgen; dadurch entstehen numerische Interpolationsfehler (False Diffusion). An verbesserten Verfahren wird gearbeitet. Wie sich auf dem 6. Treffen der European Liquid Metal Boiling Working Group in

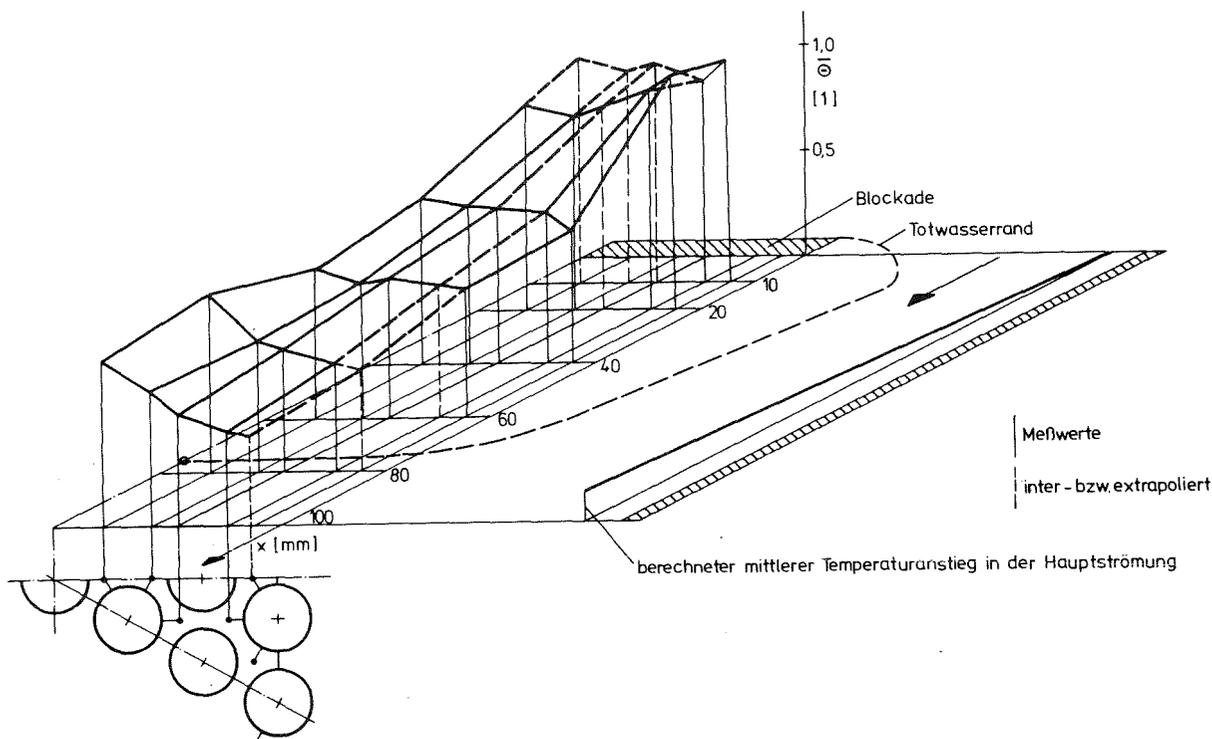


Abb. 18: Temperaturverteilung im Totwasser hinter einer ebenen Blockade dimensionslos gemacht mit der mittleren Aufheizspanne nach [11_7]

Risley Anfang Oktober 1975 zeigte, soll neben einem verbesserten Turbulenzmodell in SABRE auch der Übergang zum zweiphasigen Bereich des Kühlmittels im Falle der Überschreitung des Siedepunktes berechenbar werden. Diese Überlegungen sind aber im Zusammenhang mit den in dieser Arbeit behandelten Fragen der Blockade bedeutungslos, da sie sich auf einen fortgeschrittenen Schadenszustand beziehen.

Auch die experimentellen Untersuchungen werden weitergeführt, da sie bisher die sichersten Ergebnisse für die Beurteilung des Temperaturfeldes im Bereich lokaler Blockaden in Brennelementbündeln liefern. Allerdings treten dabei ebenfalls thermohydraulische Fragestellungen in den Vordergrund, die sich mit den sicherheitstechnischen Aspekten eines weit nach

einer lokalen Blockadebildung liegenden Systemzustandes befassen. Für die Beurteilung der Vorgänge bei Blockadebildung und Blockadewachstum sind daraus ebenfalls keine weiteren Erkenntnisse zu gewinnen.

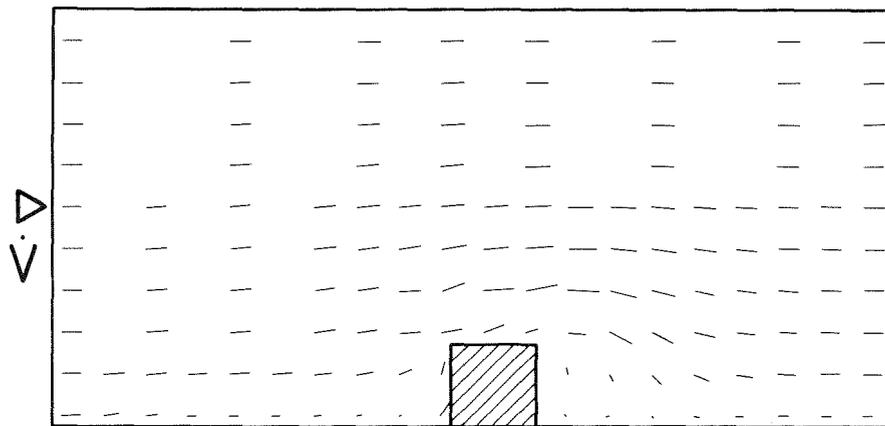
3.4 Betrachtung kleiner Störungen

Aufgrund der bisher bekannten Bestrahlungsergebnisse kann man zum zeitlichen Verlauf feststellen: "Es geht alles ziemlich langsam vor sich". Diese grobe Angabe soll darauf hindeuten, daß der Frage wie überhaupt dem Problem der Blockadebildung bei den Bestrahlungsuntersuchungen bisher sehr wenig Aufmerksamkeit geschenkt wurde. Die Instrumentierung der Bestrahlungseinsätze ließ meist eine Schadensdetektion über austretende Spaltprodukte zu. So konnte nach dem Ausbau die Gesamtdauer der Schadensentwicklung angegeben werden, worauf die oben angeführte Aussage beruht.

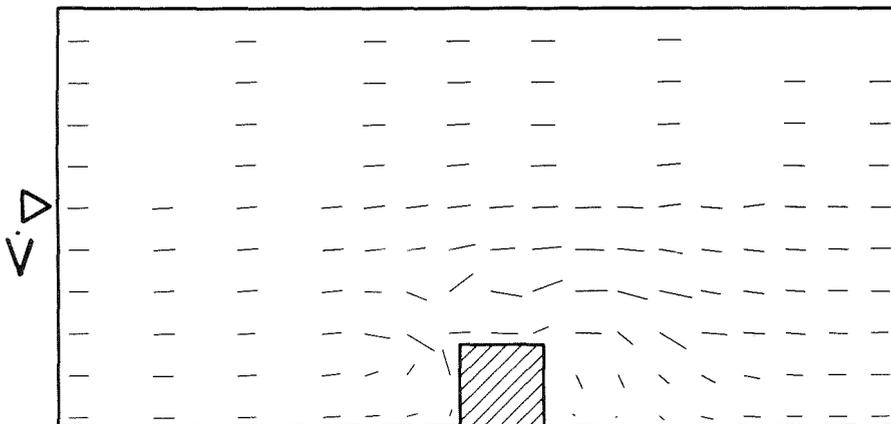
Wegen des langsamen Verlaufs erscheint es sinnvoll, auch auf die Anlagerung von Einzelkörnern und damit eine Blockade von Teilbereichen eines Stabumfangs im Abstandshalterbereich einzugehen. Eine größere Berührungsfläche zwischen blockierenden Teilchen und Staboberfläche kann dabei ausgeschlossen werden, da kleinere Körner an einzelnen großen Körnern vorbeitransportiert werden, wie Buchner [26]* zeigte, und große Körner aufgrund ihrer Struktur zu nicht sehr großen Anlageflächen führen.

Für solche Verhältnisse geben Engel und Bishop [41] einen guten Hinweis. Sie untersuchten Abstandshalternoppen hinsichtlich ihres Einflusses auf die örtliche Hüllentemperatur. Von der Konfiguration unterscheidet sich ein angelagertes Korn nicht sehr von einer Abstandshalternoppe.

Es zeigte sich, daß derartige Mikrostörungen zu lokal höherer Turbulenz der Strömung besonders im Grenzschichtbereich und damit zu verbessertem Wärmeübergang führen. Einer exzessiven Verschlechterung der Kühlbedingungen wird durch



$$\nu = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$



$$\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

(Wasser)

Abb. 19: Untersuchung der Geschwindigkeitsverteilung um eine quadratische Störung von 1 mm Kantenlänge mit REMAC [59_7*); Reibung an der Unterseite sowie an rechten und linken Seitenwänden berücksichtigt. In x-y Geometrie ist der Einfluß auf weniger als eine Kantenlänge der Störung in jeder Richtung begrenzt.

diesen Effekt jedenfalls zunächst begegnet. Bei weiterer Kornanlagerung ändern sich die Verhältnisse allerdings schnell.

Um den Störungsbereich bei der Anlagerung von einem quadratischen Korn von 1 mm Kantenlänge an eine Wand zumindest qualitativ beurteilen zu können, wurde das Problem zweidimensional in x-y-Geometrie mit dem Programm REMAC [59]* berechnet. Da REMAC kein Turbulenzmodell enthält, wurde über die Erhöhung der kinematischen Zähigkeit in der Flüssigkeitsströmung versucht, den Einfluß einer turbulenten Strömung dem Trend nach festzustellen. Der Vergleich der Ergebnisse in Abb. 19 zeigt, daß sich der Wandeinfluß und damit der Störungsbereich mit zunehmender Zähigkeit verkleinert, was den Ergebnissen in [41] entspricht.

Aufgrund dieser Erkenntnisse lassen sich keine schadenserzeugenden Temperaturveränderungen aus der Anlagerung einzelner Körner in Abstandshaltergittern ableiten. Werden zusammenhängende Flächen von einigen mm² Hüllrohroberfläche abgedeckt, so muß allerdings mit beachtlichen Temperaturerhöhungen gerechnet werden, wie die experimentellen Resultate von Möller et al. [40] an elektroerodierten Abstandshaltergittern zeigen.

3.5 Experimente in Natrium

Um so viele Einzelphänomene wie möglich zu erfassen und um auch quantitativ ausreichende Aussagen im sicherheitstechnischen Sinne zu erhalten, wie sie letzten Endes für eine Risikoabschätzung unumgänglich sind, müssen auch experimentelle Arbeiten sowohl in-pile wie auch out-of-pile in Natrium durchgeführt werden.

Es gibt bereits eine Reihe von Experimenten in Natrium, die sich mit dem Verhalten von Brennstabbündeln in extremen Situationen befassen [12, 13, 14, 15, 60]. Bei diesen Untersuchungen wurde jedoch das Hauptaugenmerk nicht ausschließlich auf die Probleme der lokalen Blockadebildung gelegt.

Eine Ausnahme stellt eine Untersuchung von Schleisiek [6] in dem sogenannten Negativbündel dar, die wesentliche Aussagen zur Frage der Übertragbarkeit von Wassersimulationsexperimenten auf die Situation bei Natriumkühlung erlaubten. Wie Kirsch [11] zeigte, gelten die experimentell ermittelten Temperaturen für Wasser in dimensionsloser Form (z.B. über die Aufheizspanne dimensionslos gemacht) bei genügend hoher Reynoldszahl, ähnlicher Geometrie und ähnlicher Wärmequellenverteilung auch für Natrium, solange man sich nicht auf wandnahe Bereiche und damit auf den Wärmeübergang bezieht. Der Grund liegt darin, daß in der Unterkanalströmung der turbulente Wärmetransport die molekulare Wärmeleitung überwiegt.

Einige Untersuchungen [61, 62] befassen sich mit dem Verhalten von flachen undurchlässigen oder zum Teil durchlässigen Blockaden in der Bündelgeometrie. Eine erste Serie von Na-Siedeexperimenten wurde im Frühjahr 1976 erfolgreich durchgeführt.

Letzteres gilt auch für das in-pile-Programm Mol 7C [17]. Bei diesem Experiment soll eine ca. 40 mm lange axial ausgedehnte Blockade in einem 37-Stabbündel untersucht werden. In der zentral angeordneten Blockade können sich entweder Stahlkugeln oder Brennstoffpartikel befinden. Beide Variationen sind im Testprogramm vorgesehen. Einen Eindruck vom Aufbau der Blockade vermittelt ein Glasbündelmodell, das in Abb. 20 im Detail gezeigt ist [63*]).

Mit dem gezeigten Glasmodell wurden eine Reihe von strömungstechnischen Untersuchungen durchgeführt, die Aufschluß darüber geben sollten, wie sich eine Zusatzkühlung ausgehend vom Zentralstab des Bündels in der Blockade selbst verhält. Diese Zusatzkühlung ist für das echte Experiment Mol 7C während einer Vorbestrahlungsphase erforderlich, um zu vermeiden, daß es vor dem eigentlichen Experiment zu Störungen kommt. Die Strömungsuntersuchungen

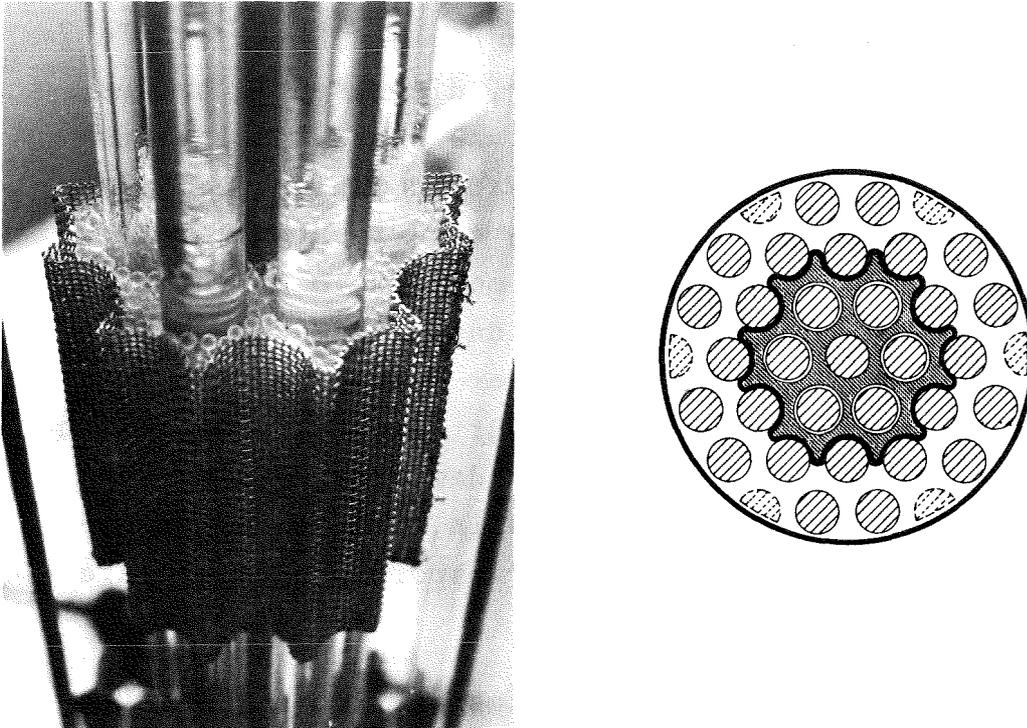


Abb. 20: Bündelmodell für das Experiment Mol-7C während der Montage der axial ausgedehnten Kühlkanalblockade (links) und Querschnitt des Bündels im Rohr NW 50 (rechts)

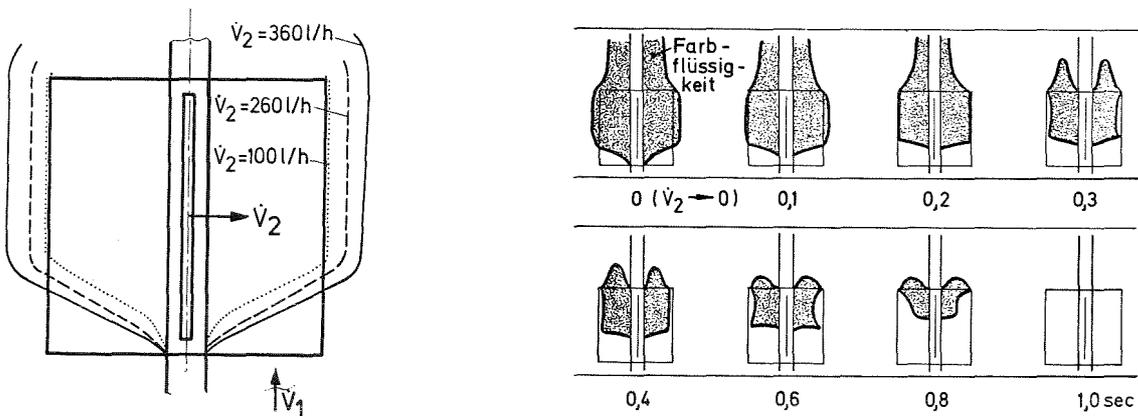


Abb. 21: Axial ausgedehnte künstliche Blockade:
 - Begrenzungslinien zwischen Hauptströmung \dot{V}_1 und Sekundärströmung durch die Blockade \dot{V}_2 in Abhängigkeit von \dot{V}_2 (links)
 - Strömungsverhalten in der Blockade beim Abschalten der Zusatzkühlung \dot{V}_2 (Auswertung eines HF-Films, Test I B 5: $\dot{V}_2 = 360 \rightarrow 0 \text{ dm}^3/h$ (rechts)).

Die Untersuchungen wurden im Kreislauf (Abb. 22) in einem Glasbündel mit optischer Flüssigkeit durchgeführt (vgl. 4.1), wobei die Sekundärströmung eingefärbt war.

zeigten, daß durch eine Zusatzkühlung der vorgesehenen Art sehr wohl eine ausreichende Versorgung der gesamten Blockadeschüttung mit Kühlmittel sichergestellt werden kann. Abb. 21 gibt einen Eindruck von den dabei entstehenden Strömungsverhältnissen. Der Einfluß der Hauptströmung \dot{V}_1 im Bereich der Blockade ist gering. Die Austriebsgeschwindigkeit nach Abschalten der Zusatzkühlung ist so niedrig, daß im Mol 7C-Experiment mit einer Einleitung des Siedevorganges gerechnet werden kann.

Da für das Problem der lokalen Blockadebildung aus direkten und gezielten Experimenten bisher noch keine Ergebnisse vorliegen, ist man zusätzlich auf die Resultate von Bestrahlungsexperimenten angewiesen, wie in der Argumentation dieser Arbeit mehrfach ausgeführt wurde. Daß sich die Bestrahlungsexperimente bisher mehr mit der Frage der Entwicklung von Brennstabschäden als mit der Frage der Bildung von lokalen Blockaden befaßt ist verständlich. Daraus resultiert jedoch die Schwierigkeit, bei den Experimentatoren ausreichende Antworten auf die Fragestellungen zu bekommen, die sich speziell aus dem Problem der lokalen Kühlkanalblockaden ergeben. Hier kann eine intensivere Zusammenarbeit sicher in vielen Punkten Abhilfe schaffen.

4. BLOCKADEBILDUNG UND BLOCKADEWACHSTUM

Die vorangehenden Abschnitte behandeln Untersuchungen, welche davon ausgehen, daß sich bereits Blockaden in einem Brennelement gebildet haben. Dabei werden ausschließlich ebene Blockaden geringer axialer Ausdehnung untersucht. Im folgenden soll nun die sehr wichtige Frage betrachtet werden, auf welche Weise und in welcher Form sich überhaupt lokale Unterkanalblockaden bilden und durch welche Vorgänge ihr Wachstum beeinflußt wird. Es werden erste Modellvorstellungen zum Aussehen entwickelt und Grenzbetrachtungen aus sicherheitstechnischer Sicht über das benötigte und verfügbare Blockadematerial angestellt.

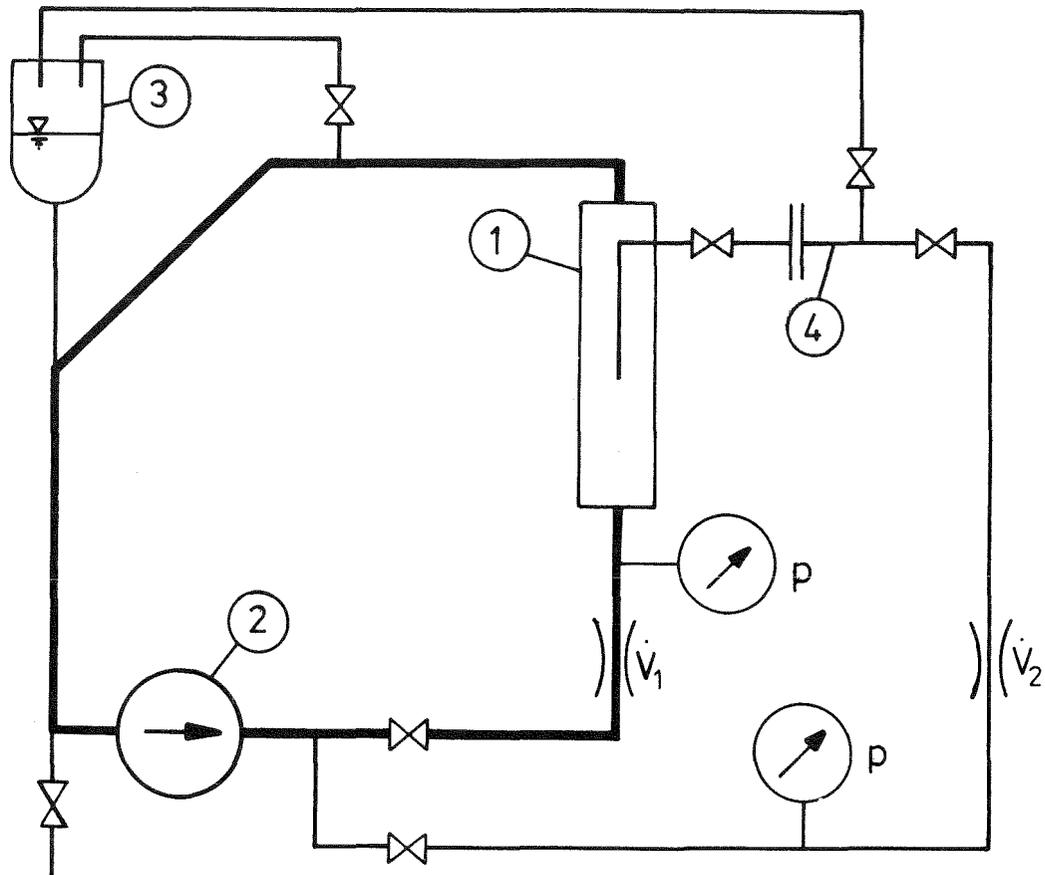


Abb. 22: Kreislauf für organische Flüssigkeiten, schematische Darstellung:
1 Teststrecke 3 Speicherbehälter
2 Pumpe 4 Eingabevorrichtung

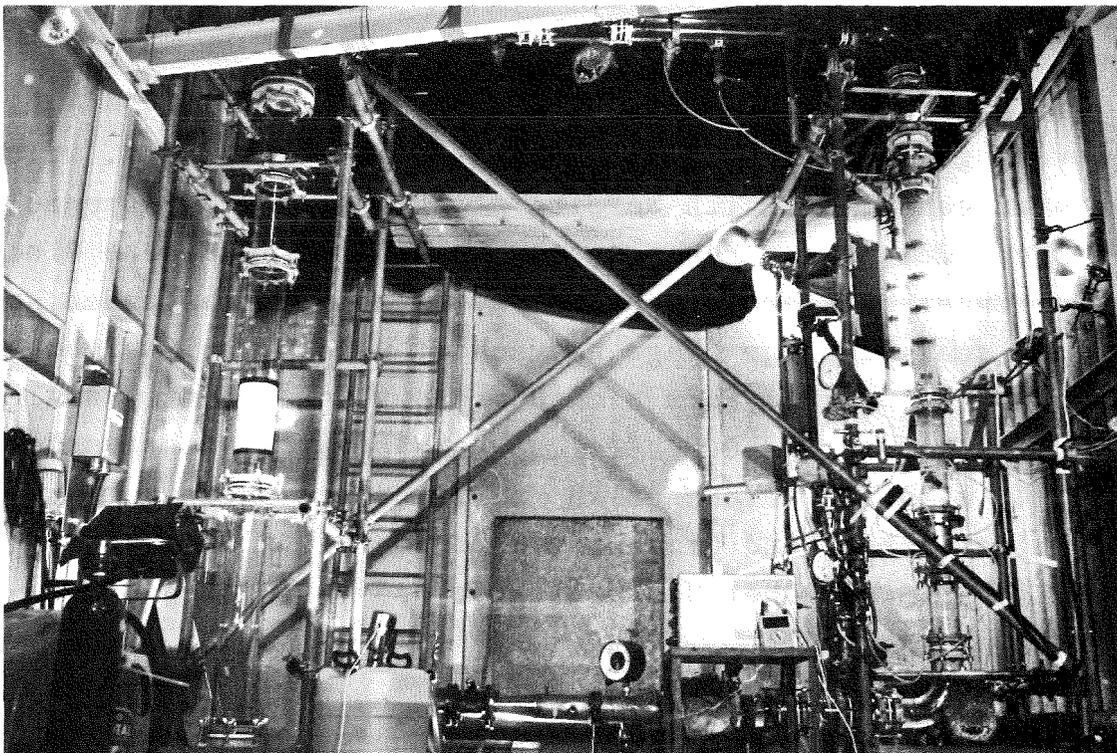


Abb. 23: Kreislauf (unterer Bereich) mit Teststrecke (rechts)

4.1 Blockadebildung durch Siebvorgänge

Über die Art und Weise der Entstehung von Verstopfungen lokaler Art in Brennelementbündeln gab es bisher nur wenige konkrete Hinweise. Die zwei wesentlichen Mechanismen sind das mechanische Aussieben und das Filtern im ausgesiebten Haufwerk (vgl. 2.2.3). Insbesondere durch das Filtern können sehr dichte Verblockungen entstehen, entsprechende Erfahrungen liegen aus dem Bereich der Filtriertechnik [64, 65] vor. Für den Fall, daß es zu einem Siedevorgang innerhalb des porösen Haufwerks kommt, könnte es durch die einsetzenden Verdrängungsvorgänge zu einer Neuverteilung des Verstopfungsmaterials kommen, über deren Art und Auswirkungen bisher keine Aussagen möglich sind.

Um zumindest vorläufige Angaben über die Verstopfungsvorgänge in Brennelementbündeln machen zu können, wurde eine phänomenologische Untersuchung in einem durchsichtigen Bündel mit einer optischen Flüssigkeit mit gleichem Brechungsindex wie das Glasbündel durchgeführt. Die Experimente betrafen Wabengitterabstandshalter, wie sie in etwa im SNR 300 Verwendung finden sollen. Es wurden nur die Siebeffekte untersucht, d.h. die rein mechanische Abscheidung.

Zur Durchführung der Versuche wurde ein Kreislauf aus Glasbauteilen erstellt, wie sie in der chemischen Industrie Verwendung finden. Der prinzipielle Aufbau des Kreislaufs ist in Abb. 22 dargestellt. Abb. 23 zeigt den tatsächlichen Versuchsstand. Für die Einspeisung von Feststoffpartikeln wird hinter der Pumpe ein geringer Teilstrom abgezweigt. Als optische Flüssigkeit wurde im Kreislauf ein Gemisch aus Petroleum und Monochlornaphtalin im Verhältnis 100:18 Volumenteilen verwendet. Bei dieser Zusammensetzung besitzt die Flüssigkeit den gleichen Brechungsindex wie das verwendete Glas, so daß das Stabbündel nicht mehr sichtbar ist.

Die verwendete Teststrecke mit NW 50 ist in Abb. 24 dargestellt. Zur Erzeugung von Blockaden wurde durch den Zentralstab Sand eingespült. Es wurden Experimente mit einzelnen Kornfraktionen und solche mit einem Korngemisch durchgeführt. Die mittlere Geschwindigkeit der Hauptströmung betrug dabei 4,2 m/sec, das Einschwemmen des Sandes wurde mit ca. 0,5 m/sec vorgenommen. Eine starke Beeinträchtigung der Hauptströmung an der Eintrittsöffnung für den Sand im Bündel wurde nicht festgestellt. Im folgenden soll auf die wesentlichen Ergebnisse dieser Untersuchung eingegangen werden, für die sich weitere Details in [26_7*) finden.

Zunächst wurden Versuche mit einzelnen Kornfraktionen durchgeführt. Dabei zeigte sich, daß Fraktionen unter 0,8 mm Korngröße zu keinerlei Ablagerungen im Bereich eines Abstandshaltergitters der verwendeten Art führen. Verständlich wird dies aus der Modellaufnahme in Abb. 25. Der Durchmesser der größten Kugel, welche den freien Querschnitt zwischen Gitter und Stab noch passieren könnte, liegt bei ca. 1,3 mm (s.a. Abb. 30).

Erst Kornfraktionen zwischen 0,8 mm und 1 mm Korngröße zeigten einen deutlichen Ablagerungseffekt. Zunächst fand eine Anlagerung von einzelnen Körnern in den Unterkanalbereichen direkt um den Austrittsstab statt. Sobald ein Unterkanal eine Ablagerung von auch nur einem Sandkorn aufwies, erfolgte in der Nähe des verstopften Bereiches durch die Ausströmung eine Ablenkung ankommender weiterer Körner radial nach außen. Beispiele für den Transportweg von einzelnen Feststoffpartikeln zeigt die Abb. 26.

Die Zugabe der Feststofffraktion Sand erfolgte in Chargen zu je 5 g, dies entspricht dem Volumen von ca. 19 Brennstofftabletten. Etwa ab der 3. Charge zeigte sich, daß die Blockaden radial mit einem Böschungswinkel von 10° wuchsen (Abb. 27). Eine größere Teststrecke mit NW 100 ergab das gleiche Verhalten. Mit den verwendeten Korngrößen bis max.

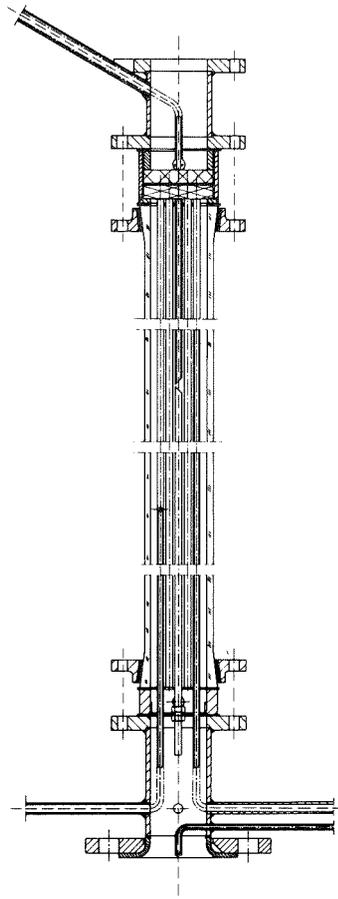


Abb. 24: Teststrecke für Untersuchungen zum Blockadewachstum

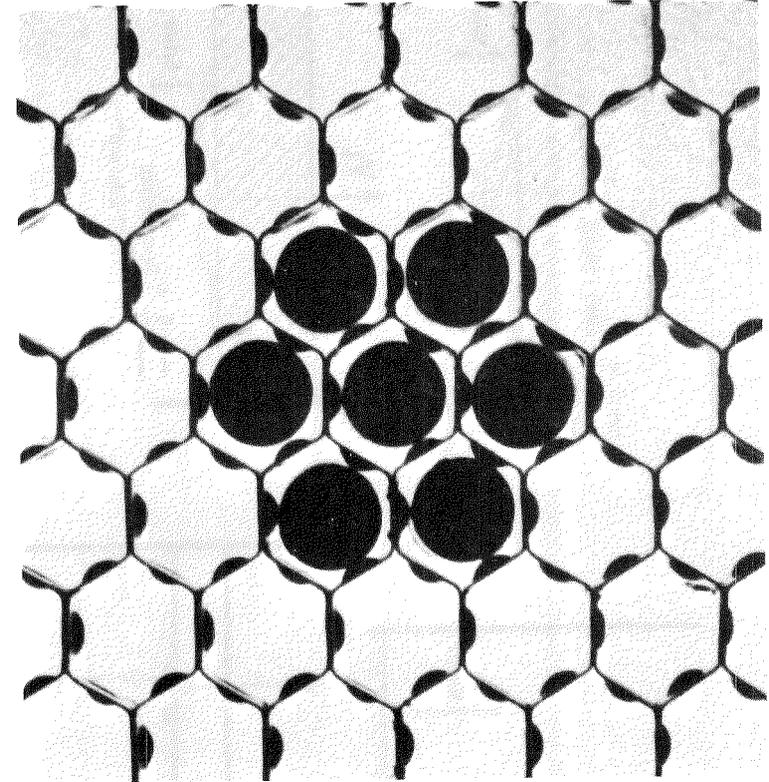
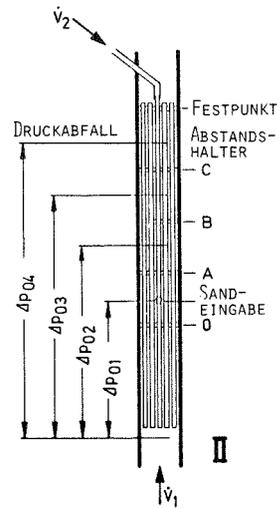


Abb. 25: Freier Querschnitt zwischen Stabmodell und Noppen-Gitterabstandshalter (Siebdurchmesser: 6 mm)

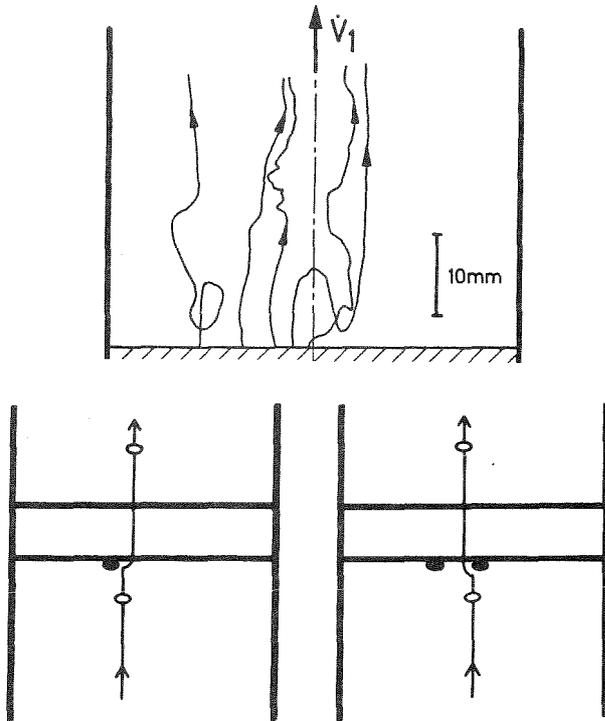


Abb. 26: Beispiele für den Transportweg von Partikeln bei der Blockadebildung

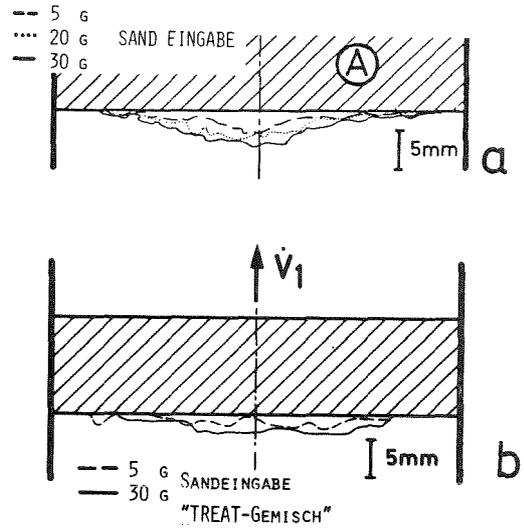


Abb. 27: Blockadewachstum in Abhängigkeit von der Feststoffzufuhr
 a) Kornverfahren 0,8-1,0 mm
 b) "TREAT-Gemisch", s. Abb. 28

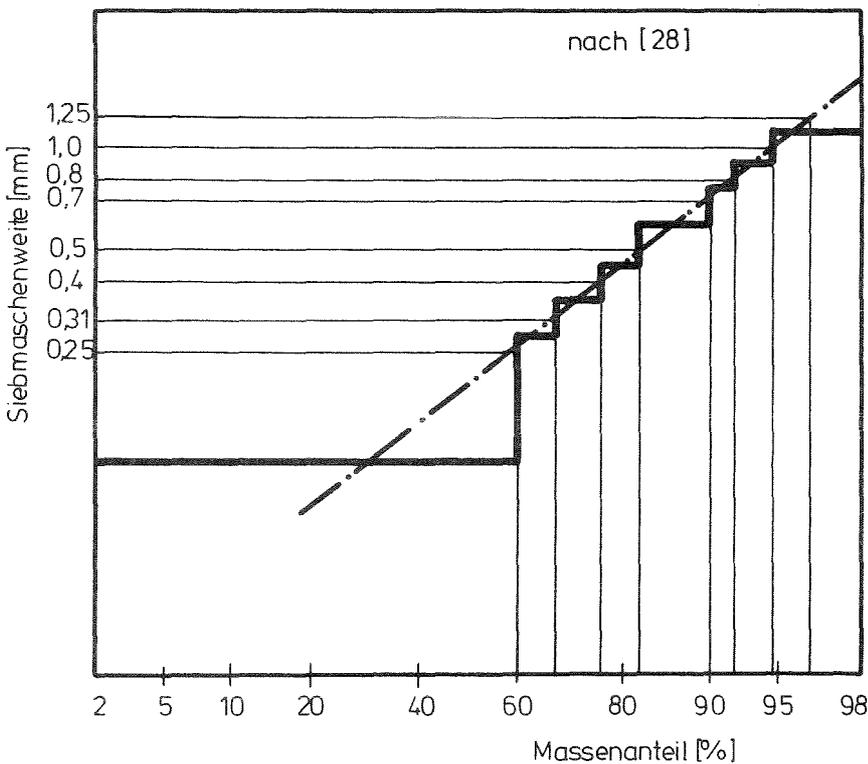


Abb. 28: Nachbildung des TREAT-Gemisches (vgl. Abb. 6) durch Sand; Gemischanteile in Abhängigkeit von der Siebmaschenweite

1,25 mm \emptyset konnte keine bevorzugt axial ausgedehnte Blockade erzielt werden. Die größten Blockadedicken bei NW 50 lagen bei 6 mm, während ein Durchmesser von ca. 40 mm erreicht wurde.

Abb. 26 zeigt auch einige Beispiele für Bewegungspfade von Partikeln hinter der Blockade. Eine eindeutige Rezirkulationszone kann daraus nicht abgeleitet werden. Aufgrund des Restdurchsatzes durch die poröse Blockade wurde allerdings auch nicht mit einer deutlichen Rezirkulationsströmung gerechnet.

Neben definierten Korngrößenfraktionen wurde auch ein Gemisch untersucht, das in etwa den in [28] berichteten Versuchsergebnissen aus dem TREAT-Reaktor entspricht (Abb. 28). Dieses Kornspektrum wurde hier lediglich als ein Anhaltspunkt genommen, da bisher keine Werte für Gemische nach einer Brennstoffaustragung vorliegen. Durch den geringeren Anteil an größeren Körnern in diesem Gemisch ergaben sich bei gleicher Massenzufuhr kleinere Blockaden als z.B. bei der Fraktion (0,8 - 1 mm). Der Unterschied wird bei einem Vergleich der Abbildungen 27a und 27b deutlich.

Bemerkenswert im Zusammenhang mit der Blockadebildung erscheint eine Beobachtung, die während des Versuchsablaufs gemacht wurde. Aufgrund der für den Zusammenbau erforderlichen Toleranzen bestand ein Spiel zwischen den Abstandshaltergittern und den Glasstäben. Durch die Strömungskräfte wurden die Glasstäbe zu Vibrationen angeregt. Ein Drehen der Glasstäbe war durch die Aufhängung verhindert. Durch die vibrierenden Glasstäbe wurden die zurückgehaltenen Sandkörner im Blockadebereich regelrecht verdichtet und einvibriert. Nach Abschalten der Hauptströmung blieb die Blockade bis auf die an der Oberfläche durch Strömungskräfte gehaltenen Körner intakt. Die Stabvibration im Blockadebereich ging durch die Beseitigung des Spiels praktisch auf Null zurück.

Die Vibration von Stäben aufgrund eines nicht spielfreien Einbaus kann dreierlei Auswirkungen haben:

- erhöhten Brennstoffaustrag [12]
- Verfestigung von lokalen Blockaden durch Einvibrieren der Partikel [26]*) und
- Zerkleinerung von porösen oder weicheren Partikeln zwischen Abstandshalter und Stab solange Vibrieren möglich ist und damit Verhinderung einer Partikelanlagerung.

Für ein Brennelement mit Hüllschaden folgt aus dem Experiment aber auch, daß bei Behinderung der Vibration des beschädigten Stabes durch die Blockadebildung der Brennstoffaustrag stark verlangsamt werden kann.

4.2 Betrachtung des Transportsystems

Ausschlaggebend für die Transporteigenschaften im betrachteten System sind sowohl Merkmale der transportierten Feststoffpartikel als auch solche der transportierenden Flüssigkeit [65]. Auf die Feststoffpartikel können folgende Kräfte wirken:

- Feldkräfte, wie z.B. die Schwerkraft,
- Strömungskräfte, die von den Flüssigkeitseigenschaften und der Geometrie (Reynoldszahl) und dem Turbulenzgrad sowie von der Partikelgestalt abhängen können,
- Druckkräfte, wie z.B. der statische Auftrieb und
- Trägheitskräfte, z.B. in beschleunigten Bewegungszuständen.

Zu diesen mehr makroskopischen Kräften können im mikroskopischen Bereich noch Diffusionskräfte (z.B. durch Konzentrationsgradienten) und Kontaktkräfte hinzukommen. Solange es sich um reine Siebvorgänge bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten handelt, werden nur makroskopische Einflüsse berücksichtigt.

Als charakteristische Größe für den Vergleich von Transportsystemen dient im allgemeinen die Sinkgeschwindigkeit. Sie ergibt sich aus dem Gleichgewicht zwischen Feldkräften (Schwerkraft, Auftrieb) und Strömungskräften. Unter Vernachlässigung der Einflußgrößen Partikelform, Oberflächenbeschaffenheit, instationäre Strömungsform u.a. wird nach Rumpf [65] für glatte Kugeln der Korngröße x_p die Sinkgeschwindigkeit in einem weiten Reynoldszahlbereich etwa:

$$v_{\text{sink}} = \sqrt{\frac{8x_p(\rho_p - \rho_f)g}{3\rho_f}} \quad (7)$$

Dabei wurde der Widerstandsbeiwert c_w mit 0,5 als konstant angenommen, was nach Schlichting [66] etwa im Bereich $800 < Re < 2 \cdot 10^5$ gilt.

Bei geometrisch gleicher Partikel ergibt sich danach als Vergleichsgröße zweier betrachteter Systeme der Wert

$$K' = \sqrt{\left(\frac{\rho_p}{\rho_f} - 1\right)} \quad (8)$$

Ist die Größe K' für verschiedene Transportsysteme in etwa gleich, so können sie im genannten Bereich als einander gleichwertig bezeichnet werden. Damit wurden die Systeme UO_2 /Natrium, SiO_2 /optische Flüssigkeit, ZrO_2 /optische Flüssigkeit und TaC/optische Flüssigkeit¹⁾ untersucht:

Mit den Dichtewerten

| | |
|--------------------------------------|---|
| $\rho_{UO_2} = 10 \text{ g/cm}^3$ | $\rho_{Na} (500^\circ\text{C}) = 0,83 \text{ g/cm}^3$ |
| $\rho_{SiO_2} = 2,65 \text{ g/cm}^3$ | $\rho_{\text{opt.F.}} (30^\circ\text{C}) = 0,85 \text{ g/cm}^3$ |
| $\rho_{ZrO_2} = 5,7 \text{ g/cm}^3$ | |
| $\rho_{TaC} = 14,5 \text{ g/cm}^3$ | |

¹⁾ Als optische Flüssigkeit wurde ein Gemisch aus 100 Volumenteilen Petroleum und 18 Volumenteilen Monochlor-naphthalin verwendet

ergibt sich folgender Vergleich:

| | | | | | | |
|-----------------------|---|--------------|---|----------------------------|---|----------------------------|
| (UO ₂ /Na) | : | (TaC/opt.F.) | : | (ZrO ₂ /opt.F.) | : | (SiO ₂ /opt.F.) |
| 1 | : | 1,21 | : | 0,72 | : | 0,47 |

Die verwendeten Simulationsstoffe liegen also nicht sehr weit vom nachzubildenden System UO₂/Na entfernt nach beiden Seiten (TaC, ZrO₂ u. SiO₂). Wie Versuche von Franke [67_7*]) zeigen, besteht auch kein prinzipieller Unterschied im Transportverhalten der Simulationsstoffe.

Da bei Unterschreiten der Sinkgeschwindigkeit in der Flüssigkeitsströmung eine Sedimentation einsetzt, hat Franke [67_7*]) unter verbesserten Annahmen für den c_w -Wert der Partikel die Sinkgeschwindigkeiten für die verschiedenen verwendeten Stoffe in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser x_p errechnet (Abb. 29). Besonders UO₂ erreicht bei Partikelgrößen von über 1 mm bereits Sinkgeschwindigkeiten im Bereich um 1 m/s. Das kann bei einer Blockadebildung auch zu einem Wachstum "von oben" her im Totwasserbereich führen, wenn entsprechende Stoffmengen verfügbar sind. Versuche mit TaC [67_7*]) zeigten diesen Effekt bereits in geringem Umfang.

4.3 Modellentwicklung zum Siebvorgang

Das Modell für den Siebvorgang wird mit dem Ziel entwickelt, Aussagen über den zeitlichen Ablauf und den Massebedarf bei der Bildung lokaler Blockaden an Abstandshaltergittern zu gewinnen.

4.3.1 Modellbeschreibung

An einem Brennstab eines BE in der Zone höchster Leistung sei ein Riß mit der Breite b vorhanden, der unterhalb des letzten oberen Gitterabstandshalters im Corebereich liege.

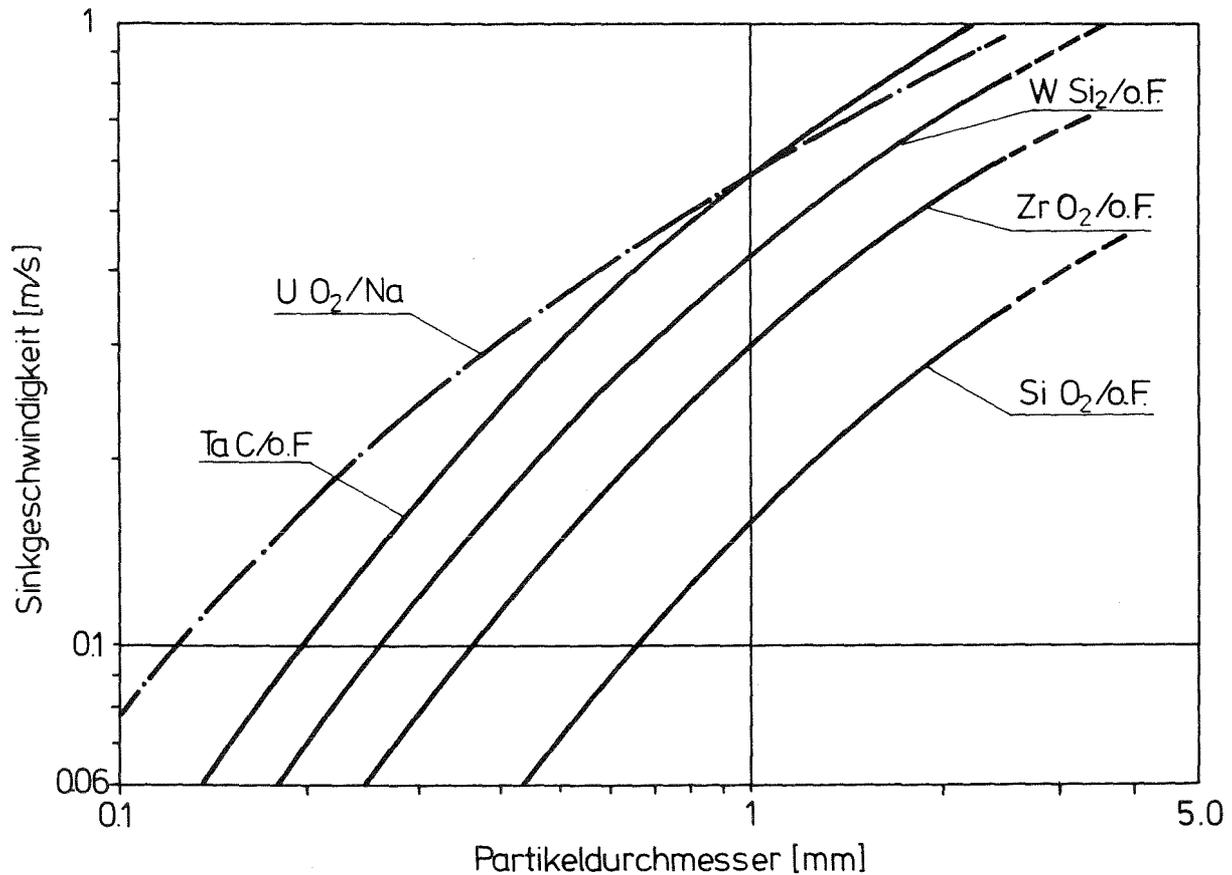


Abb. 29: Sinkgeschwindigkeit von etwa kugelförmigen Partikeln ($\psi = 1$) für verschiedene Stoffkombinationen in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser ($[-67_7^*]$). o.F. = optische Flüssigkeit

Nicht betrachtet werden Fragen nach der Wahrscheinlichkeit dafür:

- daß ausgerechnet am Stab i ein Riß auftritt,
- daß der Riß gerade in der angegebenen axialen Position liegt und
- daß der Riß die Breite b erreicht und nicht sehr viel kleiner bleibt.

Für die Gesamtanalyse hinsichtlich der lokalen Schadensanfälligkeit eines Reaktors sind die Punkte sicher von Interesse, jedoch nicht primär für die Entwicklung eines Siebmodells.

Die experimentellen Erkenntnisse aus der Schadensauswertung bestrahlter Brennelemente zeigen, daß bei einem Riß der betrachteten Art das Kühlmittel Natrium mit dem Brennstoff in Kontakt kommt. Dadurch führen thermische Belastungen im heißen Brennstoff und chemischer Angriff zu Bruchvorgängen im Kristallgefüge und der Brennstoff wird mit fortschreitender Zeit in Form einzelner Körner ausgetragen. Die geometrischen Abmessungen der Körner weisen erfahrungsgemäß eine Korngrößenverteilung auf, die - da keine experimentellen Werte verfügbar sind - angenommen werden muß. Die Verteilung ist zu großen Körnern hin durch die Spaltweite b begrenzt.

Die Spaltweite kann sich mit der Zeit ändern, da die chemische Wechselwirkung zwischen Na und UO_2 bzw. PuO_2 zur Uranat- und Plutonatbildung mit vergrößertem Volumenbedarf führt und dadurch eine Hüllrohraufweitung möglich ist. Durch Kornaustrag aufgrund der Kühlmittelströmung und durch Stabvibrationen wird andererseits Volumen freigesetzt, so daß eine Aufweitung u.U. nur in begrenztem Umfang eintritt.

Die Zerkleinerungs- und Transportvorgänge benötigen Zeit. So wird nicht auf einmal das gesamte Brennstoffinventar im Rißbereich ausgeschwemmt, sondern es erfolgt jeweils nach einer Wartezeit ein weiterer Materialschub in Form eines oder mehrerer Körner unterschiedlicher Größe. Es kommt zu einer Wartezeitverteilung, für die Annahmen zu treffen sind, da bisher keine Erfahrungswerte vorliegen. Damit wird die Wahrscheinlichkeit dafür, daß die Korngröße x_p eines nach einer bestimmten Wartezeit ausgetragenen Brennstoffpartikels einen Grenzwert x_g hat oder überschreitet gleich dem Produkt aus den Einzelwahrscheinlichkeiten für die Korngröße und die Austragungszeit.

Das Korn gerät nach dem Austrag aus dem Hüllrohr in die turbulente Kühlmittelströmung. Aufgrund der gegenseitigen Wechselwirkung besteht die Möglichkeit, daß das Korn den Unterkanal in den es freigesetzt wurde verläßt. Es handelt sich hier zwar nicht um einen Diffusionsvorgang, wie z.B. bei der Ausbreitung von Schadstoffen aus einem Kamin, aber es erscheint dennoch sinnvoll, zunächst näherungsweise von den von Pasquill [68] entwickelten Vorstellungen zur Ausbreitung auszugehen. Die Beeinflussung durch das Stabbündel wird dabei vernachlässigt. Die entstehende Konzentrationsverteilung für den Feststoff überlagert sich den bereits angeführten.

Das ausgeschwemmte Material nähert sich dem nächsten Abstandshaltergitter, welches die Funktion eines Siebes hat. Dieses Sieb hat eine begrenzte Verteilung von Maschenweiten. Es ergibt sich die Frage nach der Belegungsdichte in Abhängigkeit von der Zeit, wenn die Rißbreite b so dimensioniert ist, daß Körner entstehen und ausgetragen werden, die am Sieb auf jeden Fall hängen bleiben. Als Minimalforderung ergibt sich bei der vorgegebenen Geometrie, daß als "Grundblockade" eine Grobkornschicht mit mindestens drei Körnern pro Unterkanal zum weiteren Aufbau einer lokalen Blockade aus Brennstoffpartikeln unbedingt erforderlich ist. Dies ist aus Abb. 30 zu ersehen, denn erst wenn die großen freien Querschnitte blockiert sind, lagern sich auch kleinere Partikel an. Solange eine große Passage frei ist, können Partikel durch den Umströmungsvorgang immer noch weitergetragen werden.

Wenn die Kristalle aus dem Randbereich des Brennstoffvolumens im Schadensgebiet stammen, kann man davon ausgehen, daß sie in etwa der Kugelform nahekommen und somit eine Sphärizität ψ ¹⁾ nahe bei 1 haben. Wird jedoch das Zeilenkorn eines Brennstabes in den Austragungsprozeß mit einbezogen,

1) Sphärizität ψ : Verhältnis zwischen dem Durchmesser einer oberflächengleichen oder volumengleichen Kugel und der Korngröße x_p einer Partikel

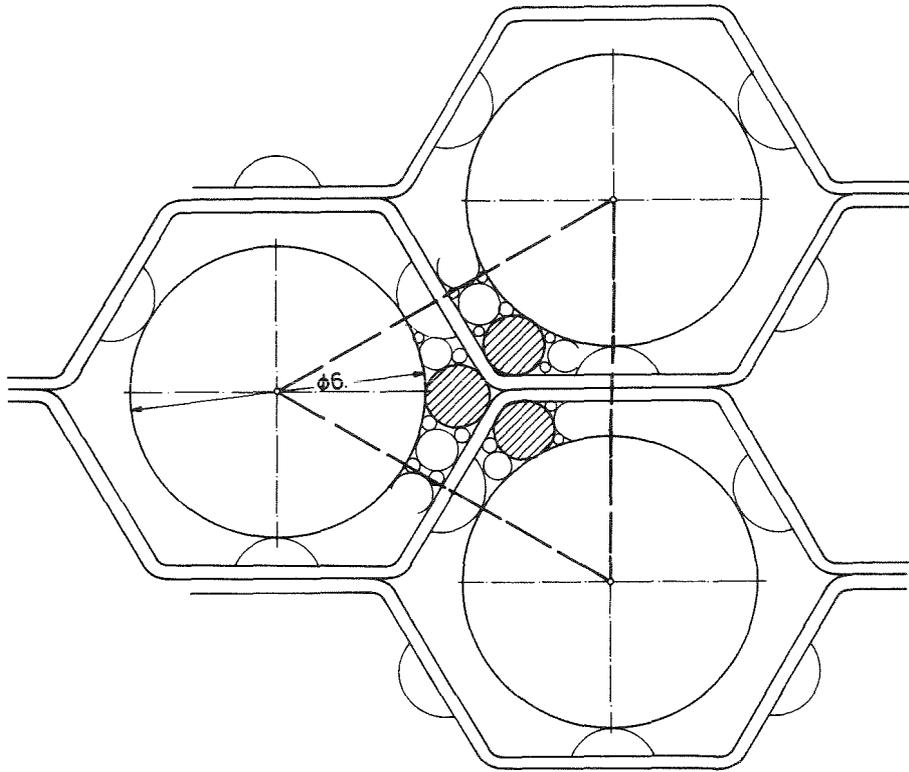


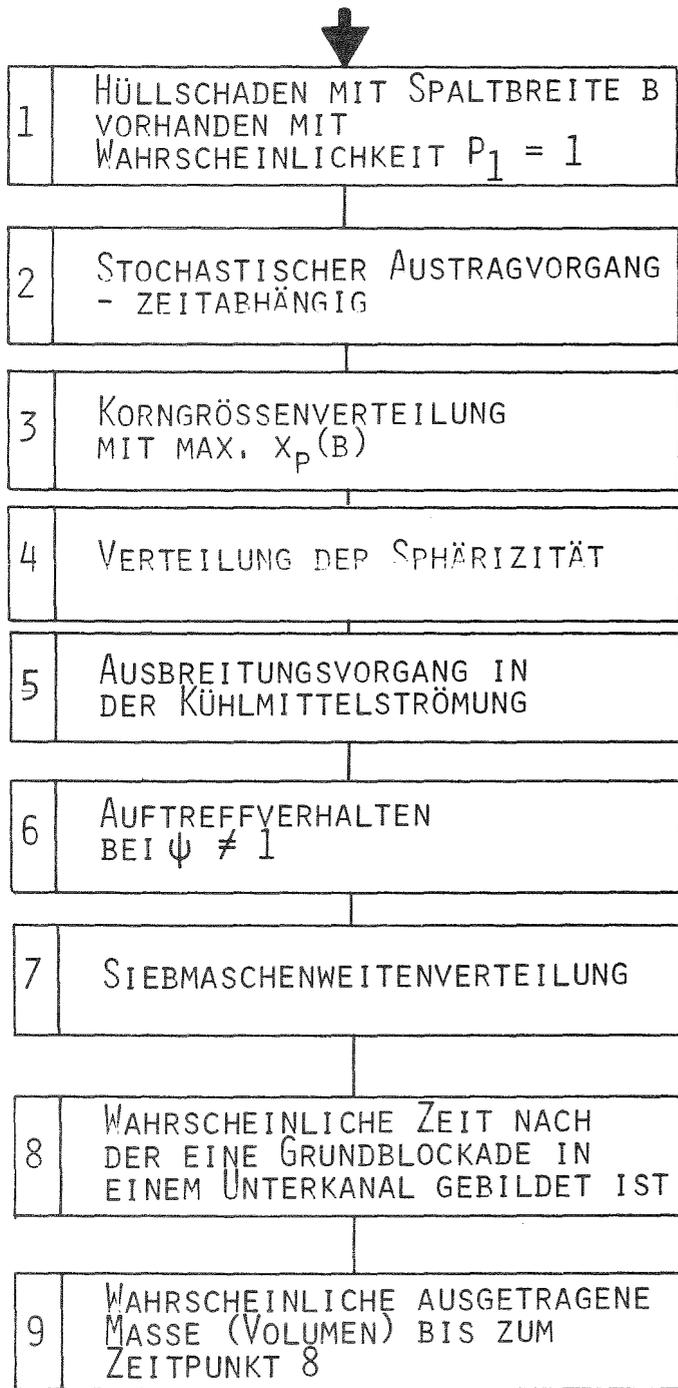
Abb. 30: Siebmodell zur Feststellung der größten freien Durchlässe in einem Unterkanal eines Brennelementbündels (vgl. Abb. 25):
Je Unterkanal ergeben sich drei Passagen für Kugeln mit ca. 1,3 mm Durchmesser (schraffierte Querschnittsbereiche), die Bildung einer "Grundblockade" zu verstopfen sind. Erst danach wird ein weitergehendes Blockadewachstum möglich. Anlagerungen an anderen Stellen des Unterkanals (---) führen durch lokale Umströmungseinflüsse zu einer Materialabfuhr durch die schraffierten Passagen, solange diese frei sind; der Gesamtmaterialbedarf stieg dadurch.

so gilt eine derartige Annahme nicht mehr in vollem Umfang. Dann können auch längliche Kornformen auftreten. Da von der Schadensstelle aus gesehen sehr bald Randbereich und Zeilenkornbereich gleichzeitig angegriffen werden, tritt eine Sphärizitätsverteilung auf. Körner mit $\psi < 1$ haben dann aber auch die Möglichkeit, Siebe mit gegebenen Maschenweiten zu passieren, wenn ihre größte Abmessungen die Maschenweite überschreiten. Dieser Aspekt überlagert das ganze Geschehen, da bereits beim Austrag aus dem Hüllrohr zu fragen ist, ob ein Korn aus dem Rand- oder Zeilenkornbereich stammt. Für $\psi \neq 1$ müßte die Frage des Hängenbleibens am Gitter in Abhängigkeit von der Auftreffrichtung gesondert behandelt werden.

Unter Einbeziehung der dargelegten Abläufe soll die Entwicklung einer Modellvorstellung zur Bildung lokaler Blockaden hier abgebrochen werden, da zunächst mit mathematischen Ansätzen abgeschätzt wird, welchen Wert der Materialbedarf zur Bildung der unbedingt erforderlichen ersten Blockadeschicht erreicht. Erst danach kann entschieden werden unter Berücksichtigung empirischer Ergebnisse, ob es sinnvoll ist, in der begonnenen Weise die weitere Entwicklung einer Blockade zu verfolgen.

4.3.2 Annahmen zur Geometrie

| | | | |
|------------------|--|-----------|-----------------|
| Brennstabbündel: | Stabdurchmesser | 6 | mm |
| | Stabmittenabstand | 7,9 | mm |
| | Spaltweite | 1,9 | mm |
| | Blechstreifen-Wabengitter-Abstandshalter | | |
| Brennstoffsäule: | Tablettendurchmesser | 5,09 | mm |
| | Tablettenhöhe | 6,0 | mm |
| | Zentralkanaldurchmesser | ca. 1,7 | mm |
| | Pelletvolumen mit Zentralkanal V_p | ca. 108,5 | mm ³ |
| | Pelletvolumen ohne " V_{po} | ca. 117,8 | mm ³ |



BEMERKUNGEN:

AUFWEITUNG DER HÜLLE
HIER VERNACHLÄSSIGT

POISSON-VERTEILUNG

LOGARITHMISCHE
NORMALVERTEILUNG

-

NORMALVERTEILUNG

-

GRENZBEDINGUNG:
3 MAX. MASCHEN MÜSSEN
BLOCKIERT WERDEN

Abb. 31: BLOCKDIAGRAMM EINES MODELLS ZUM MASSENBEDARF FÜR DIE BILDUNG EINER GRUNDBLOCKADE IN EINEM KÜHLKANAL EINES BRENNELEMENTBÜNDELS

| | | | |
|-----------------|-----------------------------|-----|---------|
| Schadensstelle: | Rißbreite | b = | 1,35 mm |
| | Rißlänge | ca. | 20 mm |
| | Abstand zum nächsten Gitter | ca. | 70 mm |

4.3.3 Mathematische Beschreibung

Die in Abschnitt 4.3.1 dargelegte Modellbeschreibung ist in Abb. 31 zu einem Blockdiagramm zusammengefaßt. Die Einzelfelder werden nun mit geeigneten Verteilungsansätzen versehen, womit dann unter entsprechenden Annahmen eine parametrische Untersuchung durchgeführt wird.

In BLOCK 1 sei mit der Wahrscheinlichkeit $P_1 = 1$ ein Hüllschaden der Spaltweite b vorhanden.

Von dem in BLOCK 2 genannten stochastischen Austragvorgang der Brennstoffpartikel ist bisher nur bekannt, daß in einer verhältnismäßig langen Zeitspanne von mehreren Tagen eine begrenzte Anzahl von Partikeln anfallen. Für diese Untersuchung wird nun angenommen, daß die Partikel alle nacheinander in nicht voneinander abhängigen Zeitabständen die Schadensstelle verlassen. Derartige Vorgänge können z.B. nach Weinberg [72] mit der Poisson-Verteilung beschrieben werden, die oft auch als die Verteilung der "seltenen Ereignisse" bezeichnet wird und in zahlreichen Fällen die Beschreibung des Ablaufs auch natürlicher Verhältnisse erlaubt. Voraussetzung für die vollständige Gültigkeit des Poisson-Gesetzes ist, daß die jeweils zwischen zwei Ereignisrealisationen verstreichenden Zeiten gegenseitig unabhängig und exponentiell verteilt sind. Im hier betrachteten Fall ist eine Überprüfung dieses Punktes allerdings sehr schwierig, so daß hier nur eine Näherung erreicht wird, solange keine ausreichenden experimentellen Ergebnisse vorliegen.

Die vermutete Verteilung sei

$$\phi(r) = e^{-\alpha t} \cdot \frac{(\alpha t)^r}{r!} . \quad (9)$$

mit $r = 0, 1, 2, \dots$

Die Konstante α kann nach [72] etwa abgeschätzt werden aus einer Gesamtzahl K von Ereignissen in einer Gesamtdauer $N \cdot t = T$ Sekunden zu

$$\alpha = \frac{K}{T} \quad [s^{-1}] \quad (10)$$

Dies gilt insbesondere dann mit der Wahrscheinlichkeit 1, wenn die Anzahl N der Zeitintervalle mit der Dauer t gegen Unendlich geht. Da die bisher bekannten Zeitintervalle von Austragvorgängen mit Werten von mehreren Tagen sehr groß und andererseits die auftretenden Transportzeiten sehr klein ($\approx 10^{-2}$ s) sind, wird im folgenden die Dauer eines Zeitintervalls dazwischen liegend mit $t = 1$ s gewählt.

Theoretisch gibt es dann ν_r theor Zeitintervalle mit jeweils genau r Kornaustragsereignissen bei insgesamt N Intervallen. Es ist mit

$$\nu_r \text{ theor} = N \phi(r) \quad (11)$$

über $r = 1, 2, 3 \dots i_{\max}$ aufzusummieren. Wird eine Anzahl Ereignisse (Kornfreisetzungen) K verlangt, so ist mit einem Zeitintervall $t = 1$ s für jeden der N Versuche eine Gesamtzeit

$$\tau = \frac{K}{\sum_{r=0}^{i_{\max}} \phi(r)} = \frac{K}{\sum_{r=0}^{i_{\max}} e^{-\alpha t} \frac{(\alpha t)^r}{r!}} \cdot \frac{1}{3600} \quad [h] \quad (12)$$

erforderlich. Für $\alpha t \ll 1$ läßt sich durch Reihenentwicklung der Exponentialfunktion zeigen, daß bei Vernachlässigung der höheren Potenzen von αt

$$\tau \approx \frac{K}{\alpha} \cdot \frac{1}{3600} \quad [h] \quad (13)$$

Physikalisch bedeutet dies, daß die Intervalle mit einem Ereignis beim Austragprozeß das Übergewicht haben, was in erster Näherung

durch den Mittelwert α beschrieben wird. Diese Kornaustragsereignisse weisen insgesamt eine bestimmte Verteilung der Korngröße x auf. Nach Leschonski [73] wird in BLOCK 3 eine logarithmische Normalverteilung eingeführt, die sich nach Rumpf [65] besonders bei nicht zu grobem Gut eignet:

$$q_n^*(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} t^2\right) = \frac{dQ_n^*(t)}{dt} \quad \text{für } x > 0 \quad (14)$$

mit der Substitution

$$t = \frac{1}{\sigma} \ln\left(\frac{x}{x_{50,n}}\right) \quad (15)$$

und $x_{50,n}$ als Korngröße bei 50 % Anteil in der n -Mengen-summenkurve¹⁾. Unter Zuhilfenahme des logarithmischen Wahrscheinlichkeitsnetzes (DIN 66144) läßt sich eine derartige Verteilung leicht in andere Mengenarten n ¹⁾ überführen und die dimensionslose Standardabweichung σ ist einfach zu ermitteln. Ihr entspricht auf der x -Skala (vgl. Abb. 33) der Wert σ_x aus $\sigma = \ln \sigma_x - \ln x_{50,n}$; für $x = \sigma_x$ wird $t = 1$.

Aus den angenommenen Verteilungen lassen sich die Anteile bestimmen, für welche die Körner eine bestimmte Grenze x_g überschreiten. Von Vorteil ist in diesem Zusammenhang, daß sich auch erste Anhaltswerte für die volumenspezifische Oberfläche der jeweils betrachteten Verteilung angeben lassen:

$$S_V = 6 \frac{\psi_{S,X}^2}{\psi_{V,X}^3} (x_{50,3})^{-1} \exp(0,5 \cdot \sigma^2) \left[\frac{-\text{mm}^2}{\text{mm}^3} \right] \quad (16)$$

¹⁾ Mengenarten: $n=0$: Anzahl; $n=1$: Länge; $n=2$: Fläche; $n=3$: Masse oder Volumen bei $\rho = \text{konst.}$

Q_0 = Anzahlsummenkurve

Q_3 = Massensummenkurve

Hinsichtlich der Sphärizität könnte auch eine Verteilung angesetzt werden, die allerdings unter Einbeziehung von Erfahrungswerten nach Rumpf [65] sehr steil verlaufen wird. Da für einen Verteilungsansatz keine Erfahrungswerte vorliegen, wird im Modell generell $\psi_{i,x} \approx 1$ verwendet (BLOCK 4).

Das Ausbreitungsverhalten soll in x- wie auch y-Richtung der gleichen Normalverteilung entsprechen und sowohl für die Massen wie für die Kornanzahl gelten. Wie Meßergebnisse von Franke [67]* zeigen, ist bereits kurz nach der Freisetzung eine in etwa gleichförmige Geschwindigkeit der Partikel erreicht. Es wird daher keine Abhängigkeit der Standardabweichungen $\sigma_x = \sigma_y$ in Strömungsrichtung von der Entfernung z angesetzt. Die Breite der Verteilung soll vielmehr an experimentellen Erfahrungen ausgerichtet werden. Der Ansatz würde damit lauten

$$c(x,y) = c_0 \frac{1}{2\pi \sigma_x^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_x^2}\right) \quad (17)$$

für die Konzentration der Partikel über den Querschnitt an den Punkten (x,y). Für die Modellbetrachtung wird eine Vereinfachung vorgenommen derart, daß in Zonen zu jeweils 1 σ Breite ausgehend von der Freisetzungsstelle aufgeteilt wird. In Abb. 32 sind die Unterkanäle, die jeweils zu einer Zone gerechnet werden, angegeben.

Entsprechend der angenommenen Normalverteilung wird dann für den Anteil $\Delta H(Z)$ für eine drei Unterkanäle breite Verteilung

| Z | $\Delta H(Z)$ |
|-----------------------------------|---------------|
| Zone 1 (0 - σ): | 68 % |
| Zone 2 (σ - 2σ): | 27 % |
| Zone 3 (2σ - 3σ): | 4 % |

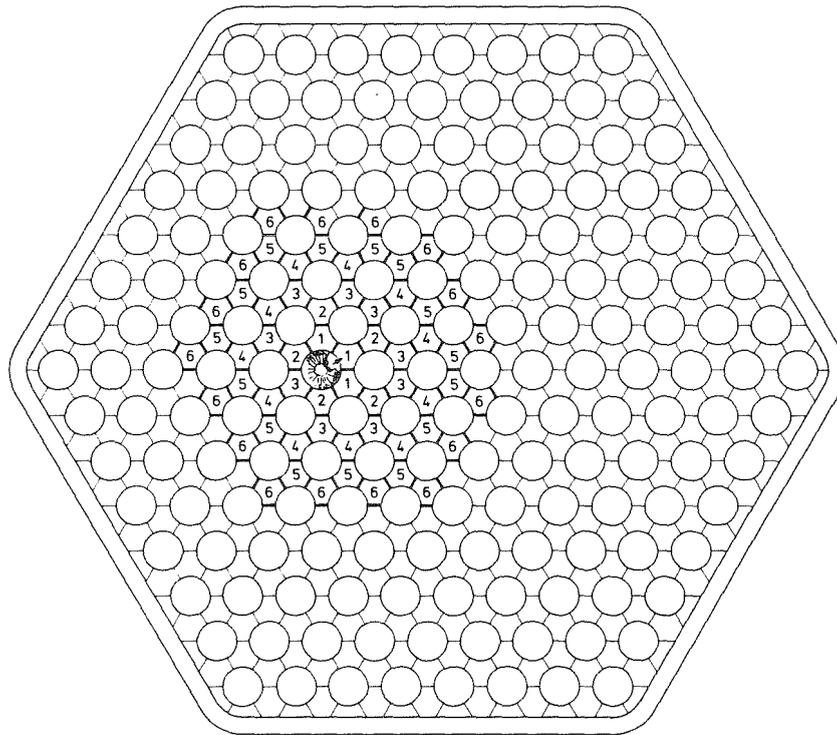


Abb. 32: Aufteilung der Unterkanäle um eine Schadensstelle in Zonen, deren Breite jeweils zu einer oder einer halben Standardabweichung σ angenommen wird.

| Zone Z | Zahl der Unterkanäle |
|--------|----------------------|
| 1 | 3 |
| 2 | 5 |
| 3 | 9 |
| 4 | 11 |
| 5 | 15 |
| 6 | 17 |

bzw. bei doppelter Breite

| | |
|-----------------------|------|
| Zone 1 (0 - 0,5σ): | 38 % |
| Zone 2 (0,5σ - 1 σ): | 30 % |
| Zone 3 (1,0σ - 1,5σ): | 18 % |
| Zone 4 (1,5σ - 2 σ): | 9 % |
| Zone 5 (2 σ - 2,5σ): | 3 % |
| Zone 6 (2,5σ - 3 σ): | 1 % |

des Materialstromes integral eingesetzt, um erste Richtwerte für BLOCK 5 zu erhalten.

Für das Auftreffverhalten (BLOCK 6) bei $\psi \neq 1$ wird kein Ansatz getroffen. Prinzipiell erniedrigen sich bei Einbeziehung dieses Blockes in die Betrachtung die Anlagerungsraten, d.h., daß der Materialbedarf insgesamt steigt.

Die angeführte Siebmaschenweitenverteilung läßt sich bei der vorliegenden Geometrie im Abstandshalterbereich nur fiktiv als wirksam annehmen, da nur an drei Stellen echte Begrenzungen vorhanden sind. Daher werden die Spalten zwischen Gitter und Stäben so behandelt, als ob ankommende Körner immer auf die größte Durchlaßöffnung zu transportiert werden. Für BLOCK 7 wird als Grenzbedingung angesetzt, daß 3 Maschenpositionen der größtmöglichen Ausdehnung (vgl. Abb. 3a) zu besetzen sind, damit ein Unterkanal die unbedingt erforderliche Grundblockade aufweist. Die Ergebnisse aus den Gln.(18) und (19) werden damit zu konservativen Mindestwerten, denn eine Anlagerung an anderen Stellen eines Unterkanals erhöht sowohl den Austragungszeitbedarf als auch die auszutragende Masse.

Mit den vorliegenden Daten ergibt sich die in BLOCK 8 genannte "Wahrscheinliche Zeitspanne" τ , bis zu der eine Grundblockade in der betrachteten Zone Z mit U(Z) Unterkanälen gebildet ist, zu

$$\tau (Z) = \frac{3}{R_o(x_g)} \cdot \frac{U(Z)}{\Delta H(Z)} \cdot \frac{1}{\alpha \cdot 3600} \quad \text{[h]} \quad (18)$$

Dabei wird ausgehend von 3 benötigten Körnern rückwärts gerechnet. Der erste Term gibt an, wieviel Körner insgesamt im Unterkanal ankommen müssen bei der Anzahlsummenkurve Q_0 mit dem Rückhalteanteil $R_0(x_g)$, wobei x_g die Grenzkorngröße sei, die gerade nicht das Gitter passiert. Im zweiten Term wird ermittelt wieviel Körner die Anzahl $U(Z)$ aller Unterkanäle der Zone Z erreichen müssen und welche Gesamtheit sich aus dem Anteil $H(Z)$ ergibt. Der Wert entspricht dem K in Gl.(13), mit dem die Austragzeit τ errechnet wird.

Die für den Aufbau der Grundblockade je Unterkanalzone wahrscheinlich auszutragende Mindest-Pelletzahl beträgt

$$I(Z) = \frac{3 \frac{x_g^3 \pi}{6}}{R_3(x_g)} \cdot \frac{U(Z)}{H(Z)} \cdot \frac{1}{V_p} \quad \text{[Pellet]} \quad (19)$$

In Gl.(19) wird vom Kugelvolumen der zurückgehaltenen Partikel mit dem Grenzdurchmesser x_g ausgegangen und über den Massenrückhalteanteil $R_3(x_g)$ in gleicher Weise wie bei Gl.(18) die Gesamtmasse bzw. das Gesamtvolumen bei $\rho = \text{const.}$ für die einzelnen Zonen in der Einheit [Pellet] bestimmt.

In der nachfolgenden Parameteruntersuchung werden die so ermittelten Werte mit den bisher bekannten Erfahrungswerten verglichen soweit dies möglich ist.

4.3.4 Parametrische Betrachtung

Ausgangspunkt bleibt, daß je Unterkanal mindestens 3 Körner einer Grenzgröße x_g erforderlich sind, um die Grundlage für den Aufbau einer Blockade zu bilden (vgl. Abb. 30). Für x_g werden nach experimentellen Erfahrungen 800 μm und 1000 μm festgelegt. Es wird geprüft, wie sich bei gegebener Verteilung die Erhöhung von x_g auf die Zeit und den Materialbedarf bis zur Belegung der Unterkanäle auswirkt. Der eigentliche

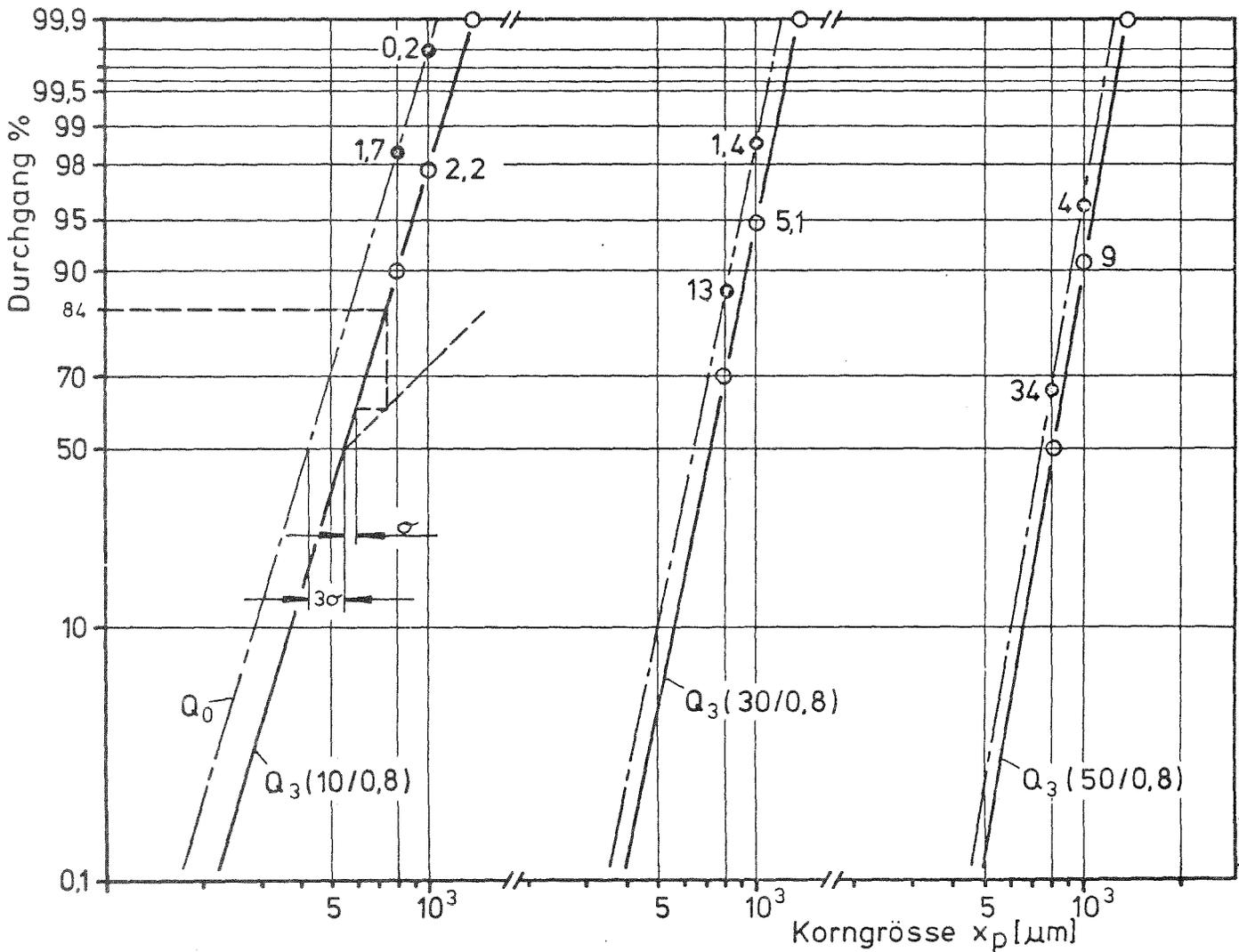


Abb. 33: Auszug aus dem logarithmischen Wahrscheinlichkeitsnetz (DIN 66144) mit den Massen- und Anzahlverteilungen Q_0 und Q_3 der Parameteruntersuchung 4.3.4 (z.B. $Q_3(10/0,8)$ bedeutet der Rückstand für Korngrößen $x_p \geq 800 \mu\text{m}$ betrage 10 %)

TABELLE 2

VERTEILUNGSWERTE AUS LOG. NORMALVERTEILUNG

| $R_3(800/\mu\text{m})$ | $R_0(800/\mu\text{m})$ | $R_3(1000/\mu\text{m})$ | $R_0(1000/\mu\text{m})$ | $x_{50,3}$ | $\text{EXP}(0,5\sigma^2)$ | S_V | S'_V |
|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------|---------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| [%] | [%] | [%] | [%] | [μm] | | $\frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^3}$ | $\frac{\text{cm}^2}{\text{Pellet}}$ |
| 10 | 1.7 | 2.2 | 0.2 | 550 | 1,045 | 114 | 12,4 |
| 30 | 13 | 5,1 | 1,4 | 720 | 1,02 | 85 | 9,2 |
| 50 | 34 | 9 | 4 | 800 | 1,013 | 76 | 8,2 |

Grenzdurchmesser für die größte Kugel, die gerade noch das Gitter passiert, liegt bei ca. 1,3 mm. Mit der Reduzierung der Werte für x_g wird auch $\psi \neq 1$, d.h. der in Wirklichkeit nicht gegebenen idealen Sphärizität Rechnung getragen.

Die Kornverteilungen werden durch zwei Punkte im logarithmischen Wahrscheinlichkeitsnetz als Gerade festgelegt:

- oberer Maximalwert für $x < b = 1350 \mu\text{m}$ bei 99,9 %
- der Massenanteil von $x_g = 800 \mu\text{m}$ wird in den Werten 10 %, 30 % und 50 % variiert.

Die Standardabweichung und danach die Anzahlverteilung wird nach Rumpf [65] graphisch bestimmt (Abb. 33). Die daraus folgenden Anteilswerte sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Die Abschätzung über die jeweilige volumenspezifische Oberfläche S_v bzw. S'_v wurde unter der Annahme $\psi_{i,k} \approx 1$ durchgeführt.

Um die Austragungsrate zu ermitteln, wird in einer ersten Annahme davon ausgegangen, daß 3 Pellets in ca. 6 Tagen ausgetragen werden. Nach bisherigen Erfahrungen aus Bestrahlungsexperimenten dürfte der Wert etwa in dieser Größenordnung liegen und zu noch größerem Zeitbedarf tendieren. Bei der vorgegebenen $Q_3(30/0,8)$ Verteilung (vgl. Abb. 33) bedeutet das, daß 1000 Körner in 10^6 s (11,6 d) freigesetzt werden. Damit wird die mittlere Anzahl der sekundlich ausgetragenen Körner $\alpha = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

Hinsichtlich der Ausbreitung in der Strömung werden zwei Fälle betrachtet:

- Standardabweichung σ der Verteilung ist eine Unterkanalweite groß in jeder Richtung
- σ beträgt zwei Unterkanalweiten (vgl. 4.3.3).

In Abb. 34 sind zusammenfassend für die betrachteten Verteilungen und für zwei unterschiedliche Ausbreitungsformen die wahrscheinlichen erforderlichen Bildungszeiten für die Grundblockade über der Zonenummer für die Unterkanäle nach Abb. 32 aufgetragen. Zunächst ist festzustellen, daß für die ersten drei Zonen kein gravierender Unterschied bei gleicher Korngrößenverteilung besteht. Wobei gerade diese Zonen nach den experimentellen Ergebnissen von Franke [67]* als die direkt betroffenen angesehen werden müssen, da die Partikel in der hier betrachteten Phase des Aufbaus einer Grundblockade noch nicht zusätzlich im Blockadebereich radial nach außen transportiert werden. Damit ist nur der 3 σ -Bereich des Ausbreitungsvolumens von Bedeutung. Die Zeiten liegen durchweg über 10 Stunden. Unter Einbeziehung bisheriger Untersuchungsergebnisse über das Siebverhalten darf davon ausgegangen werden, daß der relevante Bereich für die Korngrößengrenze etwa zwischen den Kurven 30/1,0 und 50/1,0 ($R_3(800 \text{ } \mu\text{m}) = 50 \%$, $x_g = 1000 \text{ } \mu\text{m}$) liegt. Dann reicht der Zeitbedarf zur Grundblockadebildung von einigen Tagen bis über ein Jahr.

Deutlicher wird die Beschränkung hinsichtlich der Reichweite aus Abb. 35, in welcher der wahrscheinliche erforderliche Materialbedarf für den als relevant erachteten Korngrößenbereich über den Unterkanalzonen dargestellt ist. Der Volumenbedarf erlaubt bei den bisher festgestellten Maximalwerten für die Freisetzung von Brennstoff in der Größenordnung 2 bis 4 Pellets nur noch die Bildung von Grundblockaden in den zwei ersten Zonen der Unterkanäle um den defekten Stab.

Die Reduktion für den gerade noch zurückgehaltenen Korndurchmesser von $x_g = 1000 \text{ } \mu\text{m}$ auf $x_g = 800 \text{ } \mu\text{m}$ verringert den Materialbedarf um eine Größenordnung, wie die Kurven 10/1,0 und 10/0,8 zeigen. Es liegen aber bisher keine Anhaltspunkte dafür vor, daß bereits im Korngrößenbereich um $800 \text{ } \mu\text{m}$ die Grundblockade gebildet wird bei einer größten freien Öffnung von $1300 \text{ } \mu\text{m}$ Durchmesser.

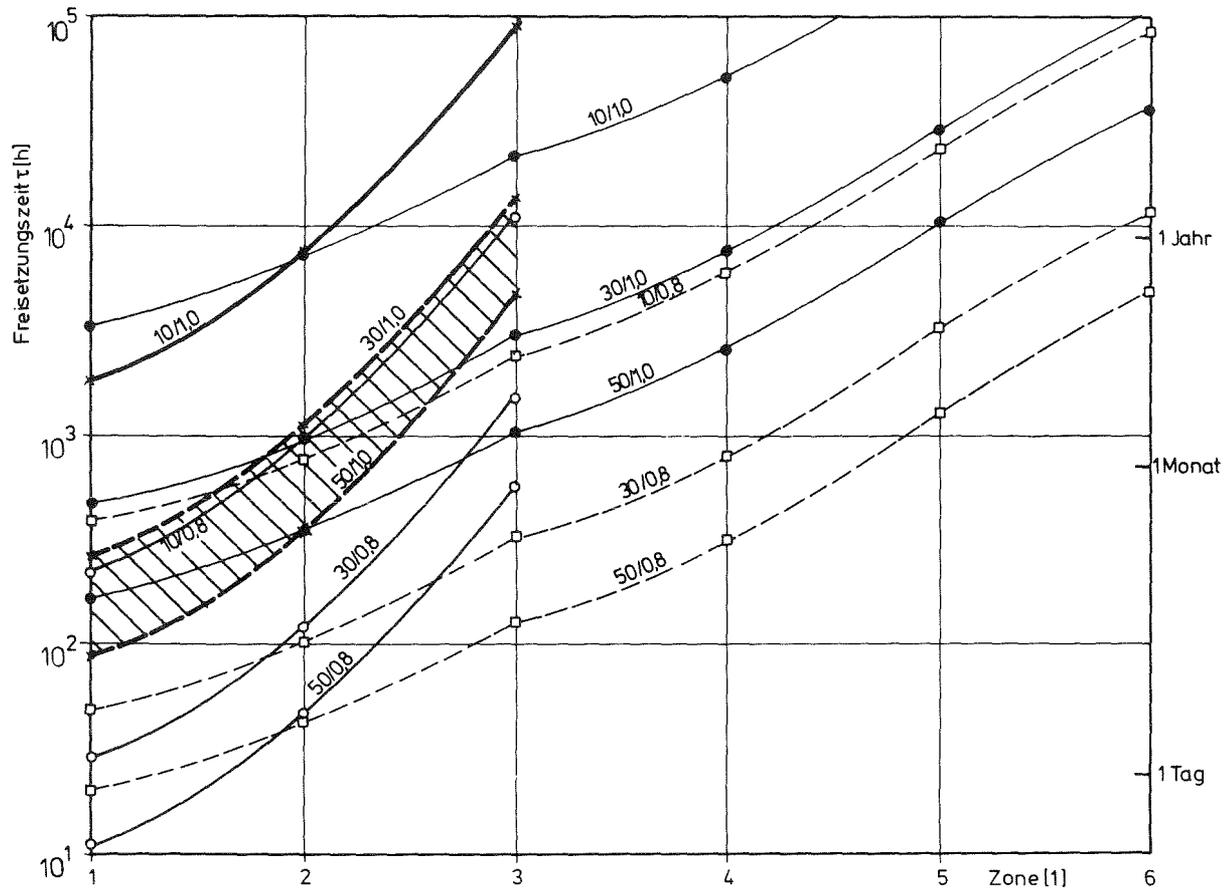


Abb. 34: Erforderliche Austragungszeit τ für die Bildung einer Grundblockade über der Unterkanalzonenzahl für verschiedene Korngrößenverteilungen (vgl. Abb. 33) und Ausbreitungsweiten (vgl. Abb. 32). Der nach experimenteller Erfahrung wahrscheinlichste Korngrößenbereich ist schraffiert. Dabei bedeutet z.B. die Bezeichnung 50/1,0: Bei einer Massensummenkurve mit 50 % Anteil von $x_p > 800 \mu\text{m}$ sei der Grenzdurchmesser der gerade noch zurückgehaltenen Körner 1,0 mm.

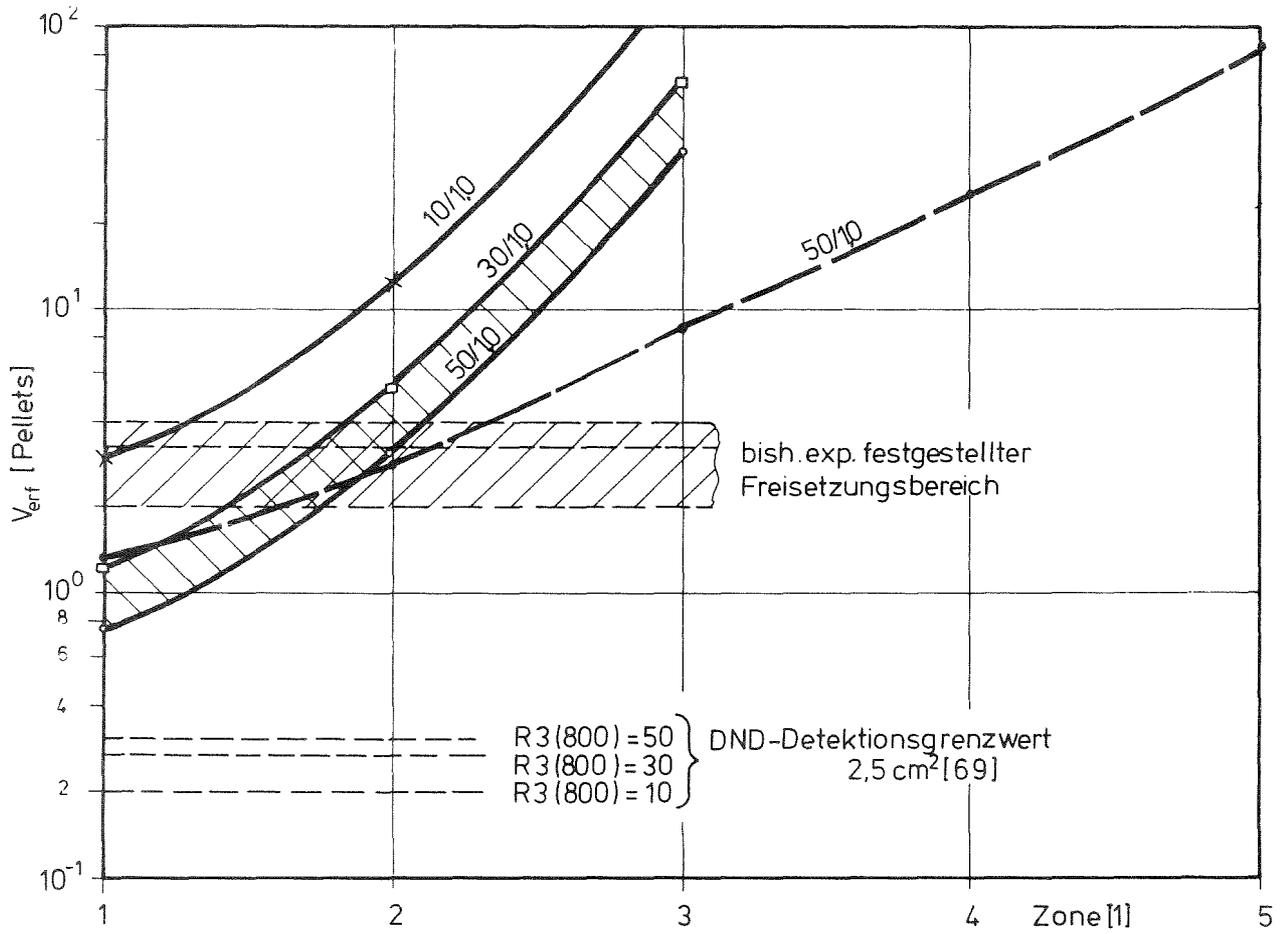


Abb. 35: Vergleich der erforderlichen Volumina zur Bildung einer Grundblockade mit bekannten Grenzwerten für Brennstofffreisetzungen und DND-Detektion

Bevor im nachfolgenden Abschnitt in einer Reihe von Grenz-betrachtungen weitere Anhaltspunkte für eine abschließende sicherheitstechnische Relevanzüberprüfung des Problems "lokale Kühlkanalblockaden" gewonnen werden, müssen abschließend die in Tabelle 2 aufgeführten Werte für die volumenspezifische Oberfläche S_V bzw. die auf ein Pellet bezogene S_V' bewertet werden. Die Werte für S_V' liegen für alle Verteilungen so hoch, daß sie zu deutlichen Signalen eines DND-Systems führen würden und vor allem den in 4.4.2 näher behandelten Grenzwert von $2,5 \text{ cm}^2$ eindeutig übersteigen. Die entsprechenden Grenzen sind für die drei Verteilungen in Abb. 35 eingetragen.

Auf Grund der dargelegten Überschreitungen wird die Modellentwicklung nicht weiter ausgedehnt.

4.4 Grenzbetrachtungen zum Materialbedarf für lokale Kühlkanalblockaden

Neben den Modellvorstellungen in Abschnitt 4.3 sollen in den folgenden Unterabschnitten drei an den bisher verfügbaren Erkenntnissen orientierte Einzelfälle in Form von Grenz-betrachtungen zum Materialbedarf behandelt werden:

- 4.4.1 Eine Blockade, die von den Temperaturfühlern am Brennelementaustritt der Verringerung des Durchflusses gerade detektiert werden kann.
- 4.4.2 Eine Blockade, die von den Meßsystemen nach der "delayed neutron"-Methode (DND) [70] gerade als Alarm-würdig für SCRAM empfunden wird.
- 4.4.3 Eine Blockade, wie sie aufgrund der bisherigen Bestrahlungsuntersuchungen von Brennstäben und Bündeln als wahrscheinlich zu erwarten ist.

Bei allen drei Fällen wird neben den Annahmen und den Zahlenwerten abschließend eine Aussage zur sicherheitstechnischen Relevanz angestrebt.

4.4.1 Detektion durch Temperaturfühler

Wie die von Basmer et.al [56] vorgelegten experimentellen Ergebnisse für den Druckabfall und damit die Durchsatzreduktion aufgrund von Blockaden in Brennelementbündeln zeigen, führt der allergünstigste Fall einer mit Temperaturfühlern noch erfaßbaren randnahen Blockade zu einer Verstopfung von 35 % des freien Querschnitts. Dabei wird eine meßbare Temperaturdifferenz von ca. 4 K (entsprechend 2 % $\Delta V/V$) vorausgesetzt, was nach Schleisiek [69] der niedrigste zu erreichende Wert wäre.

Hier soll nun ermittelt werden, welcher Materialbedarf dazu erforderlich ist. Dabei wird davon ausgegangen, daß das Material nicht von "außen" in das Brennelement eingeschwemmt, sondern ausschließlich nach Hüllschäden von ausgetragenen Brennstoff gestellt wird. Eine Bündeleintrittsblockade wird durch konstruktive Maßnahmen ausgeschlossen [3]. Die Annahmen erscheinen berechtigt, da sich ein so erheblicher Stoffbedarf herausstellen wird, für den ein "Einschwemmen" von außerhalb nicht als wahrscheinlich angenommen werden darf.

Die freie Fläche im Querschnitt eines Brennelements beträgt

$$A_{\text{ges}} = 4730 \text{ mm}^2 \quad (\text{z.B. [50]})$$

wovon der Blockadeanteil in diesem 1. Fall

$$A_{B,1} = 0,35 \cdot A_{\text{ges}}$$

sein soll. Da von den angeschwemmten Brennstoffkörnern zur Blockadebildung unbedingt eine Schicht von der Dicke eines

Korndurchmessers (mittlere Höhe $h = 1 \text{ mm}$) aus Körnern der Fraktion ab $0,8 \text{ mm}$ Durchmesser zur Verstopfung des nächsten Abstandshalters nötig ist, muß eine Annahme über den Anteil dieser Fraktion am gesamten freigesetzten Stoff gemacht werden. Die bisher verfügbaren Angaben über Korngrößenverteilungen [19, 28] weisen darauf hin, daß es sich dabei um nicht wesentlich mehr als 15% der Gesamtmasse handeln kann. Um eine konservative Komponente in die Abschätzung zu bringen, wird ein Rückhalteanteil bei der Korngröße $x_g = 800 \text{ }\mu\text{m}$

$$R_1(800) = 0,3$$

eingesetzt. Die Porosität der entstehenden Schicht soll

$$\epsilon = 0,5$$

sein [65]. Damit ergibt sich ein gesamter Volumenbedarf

$$V_1 = F \cdot \frac{A_{B,1}}{A_{\text{ges}}} \cdot h \cdot (1-\epsilon) \cdot \frac{1}{R_1} = 2760 \text{ mm}^3 \quad (20)$$

Da ein Brennstoffpellet im SNR 300 mit $d = 5,09 \text{ mm}$ und $h = 6 \text{ mm}$ ca. 118 mm^3 Volumen repräsentiert, ist der Volumenbedarf der Blockade zur Absperrung von 35% nur durch die vollständige Freisetzung von etwa 23 Brennstofftabletten zu decken. Dies entspricht einer Säulenlänge von 138 mm , die gleichzeitig auch die Hüllschadenrißlänge repräsentiert, die im Bereich zwischen zwei Abstandshaltern entstehen muß. Schäden dieser Größenordnung sind bisher selbst bei extremen Bestrahlungsbedingungen nicht beobachtet worden. Die Tablettenzahl könnte sich etwas erhöhen, wenn ein ausgebildeter Zentralkanal angenommen wird, wie in der Betrachtung im Fall 4.4.3, jedoch könnte durch die Umkristallisation in diesem Fall auch die Korngrößenverteilung beeinflußt werden, so daß über die genauen Auswirkungen derzeit keine Angaben möglich sind.

4.4.2 Detektion durch DND-System

Legt man für die Sicherheitsbetrachtung die Auslegungsdaten des französischen DND-Systems am PHENIX zugrunde, so darf davon ausgegangen werden, daß $2,5 \text{ cm}^2$ freie Brennstoffoberfläche bereits zu einem Alarmsignal für SCRAM führen [69_7]. Das heißt, daß die im Fall 4.4.1 behandelte Blockade mit einer Projektionsoberfläche (Ober- und Unterseite) von mehr als 30 cm^2 lange vor vollständiger Ausbildung vom DND-System entdeckt wird.

Es ist leicht einzusehen, daß eine Zerkleinerung des Brennstoffes, wie sie zum Austrag bei Hüllschäden notwendig ist, zu einer beachtlichen Vergrößerung der freien Oberfläche S des betrachteten Brennstoffvolumens führt, welches letztlich die Spaltproduktanteile freisetzt, die für die DND-Technik benützt werden (z.B. J-137, Br-87). Anhaltswerte für S'_V (bezogen auf ein Pelletvolumen) wurden durch die Modellentwicklung (s.a. 4.3) für verschiedene Kornverteilungen in Tab. 2 gegeben. Die Freisetzung wird bei einer sog. aktiven Blockade aus Brennstoff auch nach dem Austrag aufgrund der weiteren Spaltungen fortgesetzt. Geht man auch bei dieser Betrachtung konservativ vor und verringert die erforderliche Pelletzahl durch entsprechende Annahmen, so könnte sich folgendes Bild ergeben:

Je ein Drittel des Volumens und damit der Masse soll in gleicher Korngröße anfallen. Die Teilchenzahlen seien i, j, k , die Durchmesser $d_i = 0,1 \text{ mm}$; $d_j = 0,4 \text{ mm}$; $d_k = 1,0 \text{ mm}$. Die Annahmen sind gegenüber den TREAT-Ergebnissen konservativ (vgl. Abb. 6) hinsichtlich der Massenanteile, zu Bestrahlungsergebnissen liegen keine Vergleichsmöglichkeiten vor.

Zunächst ergibt sich Anzahl der Teilchen k , welche zur Blockadebildung unbedingt erforderlich sind, mit

$$V_i = V_j = V_k \quad \text{und} \quad i = k \frac{d_k^3}{d_i^3} ; \quad j = k \frac{d_k^3}{d_j^3} \quad \text{aus}$$

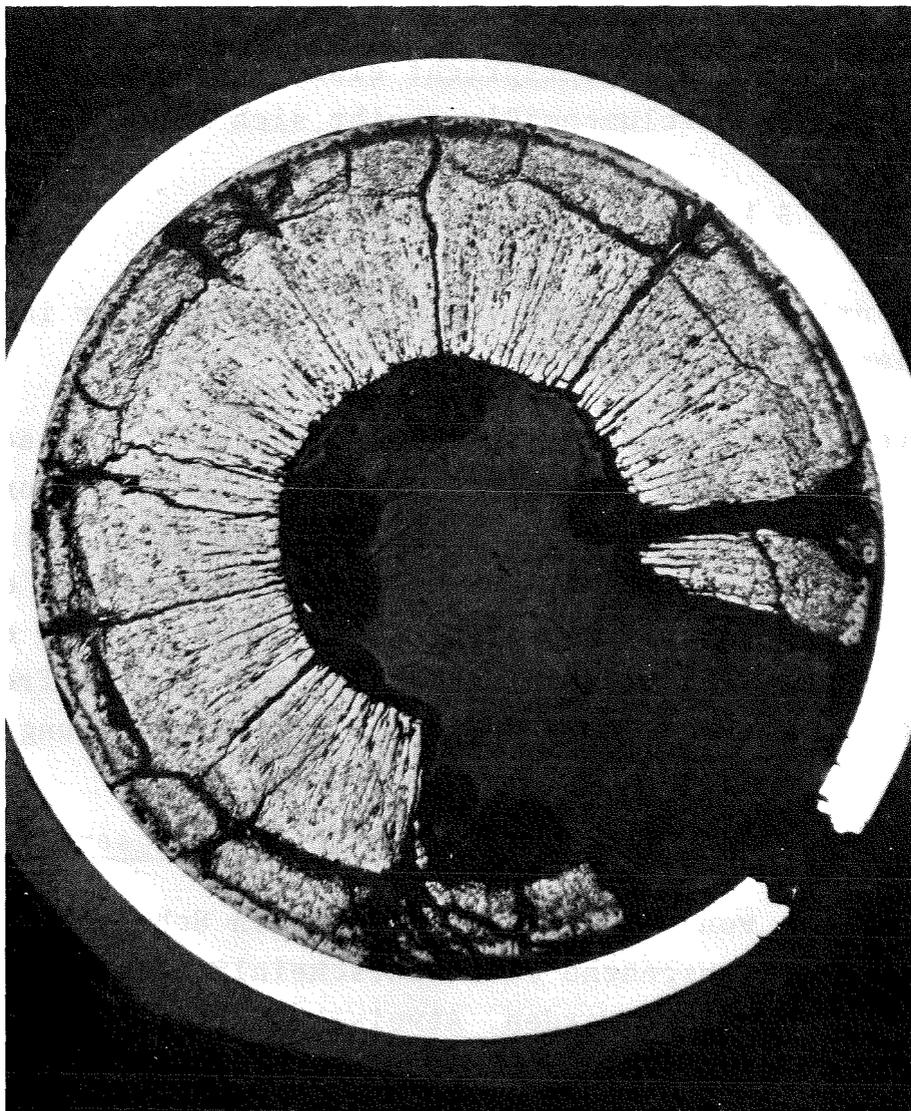


Abb. 35: Querschnitt durch einen defekten Brennstab aus dem Bestrahlungsexperiment DFR-435 [22_7]. Hüllenriß und Brennstoffaustragszone sind ebenso deutlich zu erkennen wie die geringen Abmessungen der durch Rißzonen abgegrenzten Partikel.

$$\frac{4}{\pi} \cdot S = k \frac{d_k^3}{d_j} + k \frac{d_k^3}{d_j} + k d_k^3 \quad (23)$$

bei $S = 250 \text{ mm}^2$ zu $k = \frac{1000}{13,5} = 23,6$. Damit werden bestenfalls 24 mm^2 blockiert, das entspricht einem Blockadeanteil von $A_{B,2}/A_{\text{ges}} < 1 \%$. Volumenmäßig ergibt sich mit

$$V_2 = 3 k d_k^3 \frac{\pi}{6} = 37,04 \text{ mm}^3. \quad (24)$$

Das entspricht dem Volumen von 0,3 Tabletten, der im Fall 4.4.1 bereits beschriebenen Art.

Abschließend ist hier festzustellen, daß eine Blockade von diesem Typ zwar vom DND-System sicher, aber dafür von den Temperaturfühlern überhaupt nicht entdeckt wird. Zur sachlichen Richtigkeit muß allerdings angeführt werden, daß die DND u.U. auch nicht feststellen kann, ob es sich um einen echten Brennstoffaustrag handelt oder nur um eine freie Brennstoffoberfläche aufgrund einer Hüllenschädigung.

4.4.3 Erwartungswert aufgrund von Bestrahlungsergebnissen

Hier soll nun von den bisher beobachteten Schadensausmaßen an Brennstäben ausgehend eine wahrscheinlich zu erwartende Blockade abgeschätzt werden. Atypische auftretende Schäden, wie z.B. [13_7], werden aus der Betrachtung ausgeschlossen. Nach [22_7] ist damit zu rechnen, daß ein aufgetretener Hüllenriß bei ungünstigen Bedingungen - z.B. Vibration des Stabes - ein Brennstoffvolumenäquivalent von etwa 3 Tabletten freisetzen kann. Allen Schäden ist dabei gemeinsam, daß sie erst nach einem gewissen Abbrand und entsprechender Umkristallisation des Brennstoffes mit Zentralkanalbildung auftraten. Entsprechend den Querschnittsverhältnissen in Abb. 36 wird der Durchmesser des Zentralkanals mit ca. 1,7 mm angenommen. Dadurch verringert sich das Feststoffvolumen eines Pellets auf ca. 108 mm^3 .

Durch Umstellung von Gl.(20) ergibt sich bei festgehaltenen Werten für ϵ , h und R_1 für 3 freigesetzte Tabletten

$$A_{B,3} = 187,2 \text{ mm}^2$$

oder eine Blockierung von 4 %.

Auch dieser Wert liegt weit unterhalb von denjenigen, die noch durch Kühlmittel-Temperaturmessungen detektierbar sind. Dem Volumen des Brennstoffs nach wird er allerdings vom DND-System erfaßt, wenn die Voraussetzungen nach Fall 4.4.2 gelten sollen. Eine wesentliche lokale Temperaturerhöhung ist nach dem derzeitigen Kenntnisstand nicht zu erwarten.

5. SICHERHEITSTECHNISCHE BEURTEILUNG DER BISHERIGEN ERGEBNISSE

Nach der Darstellung der möglichen Ursachen für lokale Kühlungsstörungen, der dabei auftretenden Phänomene sowie der Auswirkungen von solchen Ereignissen und einer Darlegung der bisher vorliegenden thermohydraulischen Untersuchungsergebnisse wurde ein Modell zur Blockadeentstehung entwickelt. Die Möglichkeiten für das Blockadewachstum wurden danach durch Grenzbetrachtungen abgeschätzt. Die Ergebnisse sollen nun einer sicherheitstechnischen Beurteilung unterzogen werden, wobei insbesondere die Detektierbarkeit von Störungen im Zusammenhang mit dem Instrumentierungskonzept zu betrachten ist.

5.1 Plausibilitätsbetrachtung der Bildungswahrscheinlichkeit lokaler Kühlkanalblockaden

Im folgenden wird versucht, eine geschlossene Betrachtung für ein einzelnes Brennelement im Zusammenhang mit dem gesamten Reaktorkreislauf hinsichtlich der Frage der Kühlkanalstörungsmöglichkeiten durchzuführen. Zunächst soll dabei die Frage

der Materialquelle für eine Brennelementblockade behandelt werden:

Eine globale Verstopfung am Brennelementeintritt kann aus konstruktiven Gründen ausgeschlossen werden [37]. Eine Verstopfung durch Materialanlagerung in den Abstandshaltergittern, die nahe am Eintritt des Brennelementes liegen, erfordert eine ausreichende Zufuhr von Fremdmaterial (Produktionsrückstände) oder von Brennstoff aus früheren Schadensfällen. Diese Partikel müssen durch das untere Reaktorplenum transportiert werden, wo in weiten Bereichen relativ langsame Strömungsgeschwindigkeiten vorherrschen, die teilweise von der Sinkgeschwindigkeit der Partikel übertroffen werden. Durch die damit ermöglichte Sedimentation findet eine Abscheidung von Feststoffen statt. Im Gasabscheider im unteren Kühlmittelplenum erfolgt eine zusätzliche Aussonderung von Partikeln mit höherer Dichte.

Wie die im 4. Kapitel durchgeführten Grenzabschätzungen zeigten, ist für die Blockierung selbst eines Unterkanals in einem Gitterabstandshalter ein relativ großer Materialbedarf erforderlich. Aufgrund der Verteilungsfunktion des Kühlmittelstromes im unteren Corebereich ist die Wahrscheinlichkeit sehr klein, daß in einer BE-Standzeit in einem einzigen Brennelement soviel Material konzentriert wird.

Als Materialquelle bleibt somit der Brennstoff zu betrachten, der aufgrund von Hüllendefekten innerhalb eines Brennelementes freigesetzt wird. Die Möglichkeiten, mit derartig freigesetztem Brennstoff eine lokale Kühlkanalblockade größeren Ausmaßes im Bereich eines Abstandshaltergitters zu erzeugen, wurden ausführlich in 4.4 diskutiert. Die Tatsache, daß der ausgetragene Brennstoff in einer Korngrößenverteilung anfällt, die nicht in ihrem vollen Umfang vom Gitter ausgesiebt wird, führt zu einer weiteren Verringerung der Bildungswahrscheinlichkeit. Speziell die Ergebnisse von Bestrahlungsexperimenten zeigen, daß man von der

Annahme relativ geringer Massenfreisetzungen ausgehen kann. Es bleibt die Frage, ob dann entstehende kleine Blockaden noch zu einer Propagation der Hüllrohrschäden führen können. Der Effekt der Einzelkornanlagerung wurde in 3.4 betrachtet. Von dieser Seite sind nach den bisherigen Kenntnissen keine Störungen derart zu erwarten, daß die für Hüllschäden erforderlichen Temperaturerhöhungen größeren Ausmaßes entstehen.

Zwar besteht insgesamt eine sehr geringe Wahrscheinlichkeit, eine größere Blockade zu bilden, die man im Sinne einer propagativen Wirkung als kritisch bezeichnen kann, oder die sogar zum Sieden des Kühlmittels Natrium führt. Faßt man die Möglichkeit einer solchen Blockade trotzdem ins Auge, so ist von ausschlaggebender Bedeutung genauer zu betrachten, welcher Ort für eine solche Blockadebildung in Frage kommt. Die bisher bekannten Bestrahlungsexperimente [22] weisen darauf hin, daß die meisten Hüllrohrschäden zum einen durch die erhöhte thermische Belastung des Hüllrohres im oberen Kernbereich - also im Bereich des heißen Kühlmittels - entstehen und zum anderen insbesondere an der Stelle, an welcher der Spaltstoff mit dem Brutstoff zusammenstößt, da dort eine erhöhte Anreicherung des Spaltproduktes Cäsium zu erhöhter Innenkorrosion und Brennstoffschwellen führt. Deshalb ist auch die Bildung von lokalen Blockaden mehr oder weniger großen Ausmaßes in diesem Kernbereich zu erwarten. Tritt eine lokale Kühlkanalblockade allerdings am letzten Abstandshaltergitter der Spaltstoffzone auf, so ist die propagative Wirkung dieser Blockade erst in der Brutstoffzone mit ihrer geringeren Leistungsdichte zu erwarten. Die Gefahr, daß sich in diesem Bereich Schadensereignisse ausbilden, wie sie im Hochleistungsbereich des Reaktorkerns erwartet werden, ist außerordentlich gering.

Nimmt man als Ergebnis der Bestrahlungsuntersuchungen hinzu, daß eine Ausbreitung der Hüllrohrschäden von Stab zu Stab in

einer Ebene bisher nicht beobachtet wurde und daß ebenfalls keine Anzeichen dafür vorliegen, daß sich ein einzelner Stab entgegen dem Verhalten des restlichen Brennelementes so verbiegt, daß eine schadensfördernde Kühlkanalverengung zustande kommt, so ergibt sich aus dem bisher Gesagten, daß mit den bekannten Ergebnissen insgesamt eine sehr geringe Wahrscheinlichkeit für die Bildung lokaler Kühlkanalblockaden mit nachfolgenden größeren Schadensauswirkungen besteht.

5.2 Zur Detektion von lokalen Kühlungsstörungen

Die in dieser Arbeit dargelegten Überlegungen, insbesondere die Grenzabschätzungen im 4. Kapitel, lassen es angemessen erscheinen, die Frage der Detektierbarkeit von lokalen Kühlungsstörungen zu behandeln. Speziell betroffen von dieser Fragestellung wird selbstverständlich das entsprechende Instrumentierungskonzept.

Betrachtet man die F+E-Programme verschiedener Brutreaktor-entwicklungen, so zeigt sich, daß man bei der Untersuchung der Kühlungsstörungen, historisch angeregt nicht zuletzt durch den FERMI-Störfall [75], mit der globalen Durchflußstörung begonnen hat. Der lokalen Kühlungsstörung wurde erst nach einiger Zeit Bedeutung zugemessen und die Fragen der Bildung und des Wachstums von lokalen Kühlungsstörungen sind zu allerletzt in den Blickpunkt der Untersuchungen gerückt.

Betrachtet man in diesem Licht das Konzept für die Sicherheitsinstrumentierung, so stellt man fest, daß dieses sich entsprechend entwickelt hat. Zunächst wurde besonderes Augenmerk auf die Kühlmittelaustrittstemperatur und den Durchfluß an einem Brennelement gerichtet.

Nachdem festgestellt wurde, daß der Einsatz von Incore-Durchflußmessern sehr große Schwierigkeiten mit sich bringt, hat man sich in verstärktem Maße auf die Entwicklung der Temperaturüberwachung abgestützt. Hinsichtlich der lokalen

Störungen hat sich aber mittlerweile die DND-Technik als wesentlich sensibler erwiesen. Die durchgeführte Grenzbeurteilung zeigt dies sehr deutlich. Noch ehe ein Temperatursignal ansprechen würde, würde der DND-Monitor bereits ein Signal liefern. Zwar geht man bisher davon aus, daß die DND-Technik alleine keine ausreichende Instrumentierung für ein Sicherheitssystem ist. Jedoch kann festgestellt werden, daß im hier betrachteten Sinne die Temperaturüberwachung lediglich ein diversitäres und redundantes Instrument ist, das zu einem Zeitpunkt anspricht, zu welchem größere lokale Blockaden bereits vorhanden sind. Die Auswirkungen von großen lokalen Blockaden im Brennelement auf die Bildung der Temperaturfelder hinter den Blockaden und den Ablauf der Siedevorgänge wird z.Z. untersucht [61; 62_7].

Für die Sicherheitsinstrumentierung des SNR 300 ist eine sektorale DND-Überwachung vorgesehen, eine echt brennelementbezogene Überwachung auf Hüllschäden wäre wünschenswert. Die französischen Erfahrungen deuten darauf hin, daß damit ein echter Sicherheitsvorsprung zu erlangen ist.

Abschließend soll noch ein Hinweis zur Weiterentwicklung der DND-Technik gemacht werden. Aus den bisherigen Untersuchungen zu den Möglichkeiten der lokalen Blockadebildung kann festgestellt werden, daß es sicher nützlich und sinnvoll wäre, wenn über die DND-Technik eine Möglichkeit bestünde festzustellen, ob ein echter Brennstoffaustrag aus einem Brennelement mit Hüllrohrschäden vorliegt. Nur so kann unterschieden werden, ob lediglich ein Hüllschaden vorliegt, der eine offene Brennstoffoberfläche zeigt, oder mit der Gefahr einer lokalen Blockadebildung durch Brennstoffaustrag größeren Umfangs gerechnet werden muß.

Bei der großen Stabzahl in einem Reaktorkern ist es nach aller Wahrscheinlichkeit nicht auszuschließen, daß immer Hüllschäden in mehr oder weniger geringem Umfang auftreten. Auch ein nachfolgender Brennstoffaustrag aus derartigen

Schadensstellen ist nicht mit Sicherheit auszuschließen. Daß sich aus derartigen Beschädigungen keine schwerwiegenden Störfallfolgen entwickeln, hängt nicht zuletzt von einer ausreichenden Instrumentierung ab.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Bei Sicherheitsbetrachtungen für schnelle natriumgekühlte Reaktoren führt ein Ereignispfad zu Störfällen mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit über lokale Kühlkanalblockaden in Brennelementbündeln. Während sich bisher die theoretischen und experimentellen Arbeiten mit den Auswirkungen mehr oder weniger großer Blockaden auf Temperaturverteilungen oder auf den propagativen Charakter von Einzelphänomenen bezogen, werden hier Fragen der Bildungsmöglichkeit und des Wachstums von lokalen Blockaden genauer betrachtet. Das Grundproblem dabei ist festzustellen, ob und auf welche Weise ausreichend Materie bereitgestellt werden kann, um eine im sicherheitstechnischen Sinn kritische Blockadegröße zu erzeugen, d.h. eine Störung, die kurzfristig weitere Schäden mit möglicherweise steigendem Ausmaß bewirkt.

Dazu wurden zunächst die möglichen Ursachen für einen Blockierungsvorgang zusammenfassend dargestellt und eine Reihe von Einzelphänomenen untersucht. Dabei wurden insbesondere auch Ergebnisse aus Bestrahlungsuntersuchungen an Brennstäben einbezogen. Folgende Feststellungen können danach getroffen werden:

- Für eine Blockadebildung größeren Umfangs in einer Hochleistungszone des Reaktorkerns kommt ausschließlich Brennstoff in Frage, der nach einem Hüllschaden ausgebracht wird.
- Zur Vermeidung von Hüllschäden in den kritischen Bereichen sind:

- a) die qualitätssichernden Vorkehrungen während des Herstellungsprozesses zu verbessern,
 - b) Vorkehrungen zu entwickeln, die das Problem der Spalt-Cäsiumanreicherung am Übergang von Brennstoff zu Brutstoff derart entschärfen, daß eine übermäßige Hüllrohrbelastung vermieden wird und
 - c) die Abstandshaltergitter (falls solche verwendet werden) so zu gestalten, daß eine Verletzung der Hüllrohre in Form von äußeren Kerben auch bei engen Einbautoleranzen reduziert wird. Die Brennstäbe sind gegen Verdrehen im Bündel während des Betriebes zu sichern.
- Im brutreaktortypischen Bestrahlungsversuchen konnten bisher keine Hinweise auf Stabverbiegungen mit daraus folgenden Hüllschäden gefunden werden.

Eine Propagation von Schäden auf Nachbarstäbe in größeren Bündeln wurde nicht beobachtet.

Zur Vervollständigung des Überblicks über den Problembereich "Lokale Kühlungsstörungen" wurden auch eine Reihe von thermohydraulischen Untersuchungen insoweit referiert als sie nicht weitergehende Sicherheitsbetrachtungen und Störfalluntersuchungen betreffen. Es zeigte sich, daß mit der entwickelten Experimentiertechnik Aussagen auch hinsichtlich der Verhältnisse in natriumgekühlten Bündelgeometrien möglich sind. Jedoch stellte sich mit verbessertem Wissen über die Vorgänge an Blockaden größeren Ausmaßes immer deutlicher die Frage nach der Bildungswahrscheinlichkeit für Verstopfungen.

Zur Aufklärung der Bildungsvorgänge wurden eine Reihe von Vorversuchen durchgeführt, die zu einem Versuchskonzept mit einer durchsichtigen Bündelteststrecke und einer optischen Flüssigkeit führte, welche genauere Beobachtungen bis in ein Abstandshaltergitter hinein erlaubt. Untersucht wurden in den

Simulationsversuchen ausschließlich Siebvorgänge und deren Beeinflussung durch die Kühlmittelströmung. Physikalisch-chemische Prozesse an Oberflächen, die beim Filtern z.B. im Haufwerk einer ausgesiebten Blockade eine Rolle spielen, können nicht simuliert werden. Die Versuche ergaben:

- Erst Kornverteilungen mit Anteilen von Korngrößen über 800 μm zeigen beim untersuchten Blechstreifen-Wabengitter-Abstandshalter eine Anlagerung im Gitterbereich.
- Die Anlagerung breitet sich aufgrund der Umströmungsvorgänge vorwiegend radial aus. Eine axiale Ausdehnung größeren Ausmaßes in einem oder wenigen Unterkanälen um die Austrittsstelle konnte mit Korngrößen bis 2000 μm ($\sim 67 \cdot 7^*$) nicht verwirklicht werden.
- Grundbedingung für eine Unterkanalblockade ist die Verstopfung der drei größten Durchlaßöffnungen zwischen Stäben und Gitter.
- Der Materialbedarf zur Bildung eines als Blockade zu bezeichnenden Haufwerks ist groß.

Unter Einbeziehung der experimentellen Ergebnisse und der Erkenntnisse aus Bestrahlungsversuchen wurde ein Modell entwickelt, welches es erlaubt, den Materialbedarf und den Zeitbedarf für die Bildung von Blockaden im Bereich eines Hüllschadens abzuschätzen. Von besonderer Wichtigkeit sind dabei die Vergleiche der Modellwerte mit bekannten Grenzwerten für die Brennstofffreisetzung bzw. für freie Oberflächen im Rahmen der DND-Anwendung. Die Ergebnisse zeigen:

- daß der Blockadebildungsvorgang im Vergleich zu den bei Propagationsvorgängen üblichen Zeitmaßstäben ausgesprochen langsam ist,
- daß der Materialanfall schon für die 2. Unterkanalreihe (von der Schadensstelle aus gesehen) nur mühsam ausreicht, um eine Grundblockade in den drei größten "Siebmaschen" zu bilden,

- daß kein Bestrahlungsexperiment mit Hüllschaden einen Materialaustrag ergab, der ausreichend wäre, um Blockaden zu bilden, die mit Thermoelementen über eine Temperaturerhöhung am Brennelementaustritt zu detektieren sind. Damit kann festgestellt werden, daß die Bildung von Blockaden mit propagativer Wirkung wegen Mangel an Masse sehr unwahrscheinlich ist. Ein langsames Wachsen zu einer kritischen Größe ist ebenso wenig wahrscheinlich, da die hauptsächlich bei solchen Vorgängen wirksamen elektrostatischen Kräfte unter Natrium entfallen.

Weitere Grenzabschätzungen ergeben eindeutig, daß eine Blockadedetektion über DND-Systeme bereits lange vor einer Temperaturanzeige zumindest zu einem Schnellabschaltalarm führen wird. Die freien Oberflächen, welche beim Austragvorgang gebildet werden, übersteigen die bisher verwendeten DND-Grenzwerte beträchtlich. Eine Weiterentwicklung der DND in Richtung "Detektion von Brennstoffaustrag" ist für das frühzeitige Erkennen von potentiellen Blockadebildungen zumindest zu versuchen.

Von den Bestrahlungsexperimenten können in Zukunft noch eine Reihe von ergänzenden Erkenntnissen gewonnen werden:

- Die Korngrößenverteilung des ausgetragenen Brennstoffs ist so gut als möglich festzustellen.
- Sobald es die Instrumentierung erlaubt, sind Daten über den zeitlichen Ablauf des Austragvorganges zu ermitteln.
- Die Konsistenz der ausgetragenen Partikel ist zu ermitteln, um Anhaltspunkte darüber zu erlangen, ob sie evtl. durch Stabvibrationen im Gitterbereich zerkleinert werden könnten.
- Die chemische Wechselwirkung zwischen Natrium und $(U,Pu)O_2$ ist hinsichtlich ihres Abtragvermögens von Brennstoffanlagerungen zu überprüfen.

Eine sicherheitstechnische Beurteilung der Situation unterstreicht die Bedeutung der Weiterentwicklung der Detektionsmethoden, zeigt aber außerdem:

- daß die Auftretenswahrscheinlichkeit von Hüllschäden im Übergangsbereich von Brennstoffzone zu Brutzone ihr Maximum hat,
- daß damit die stromab noch formierbaren Blockaden in der Brutzone und deshalb im Bereich niedriger Stableistung liegen.

Für eine propagative Auswirkung müßten Blockaden dort noch größere Ausmaße als in der Brennstoffzone annehmen. Die Wahrscheinlichkeit für eine Propagation nimmt daher noch weiter ab.

Insgesamt gesehen kann festgestellt werden, daß die Entstehung von lokalen Blockaden in mehreren Unterkanälen eines BE durch Materialanlagerung sehr unwahrscheinlich ist und daß eine daraus folgende schadenserhöhende propagative Wirkung nochmals unwahrscheinlicher wird. Das entwickelte Modell zeigt die Bereiche auf, in denen diese Aussagen durch zusätzliche experimentelle Ergebnisse in Zukunft abgesichert werden können. Es soll jedoch abschließend darauf hingewiesen werden, daß im Sinne einer umfassenden sicherheitstechnischen Betrachtung schneller Reaktoren auf im Unfallablauf weitergreifende Untersuchungen nicht verzichtet werden kann, insbesondere um zusätzliche redundante und diversitäre Sicherheitsbarrieren zu entwickeln und den konservativen Charakter des gesamten Sicherheitskonzeptes nachzuweisen und gegebenenfalls auszubauen.

Für die stete Förderung und die hilfreichen Diskussionen zu dieser Arbeit möchte ich den Herren Prof.Dr. D.Smidt, Prof.Dr. W.Dienst und Prof.Dr. U.Müller danken. Die besondere Unterstützung von Herrn Dr. Geithoff verpflichtet mich ebenso zu Dank wie die intensive Problemdiskussion mit den Herren Dr. G.Class und Dr. K.Schleisiek. Ich danke allen Mitarbeitern, die zur Durchführung dieser Arbeit beigetragen haben.

7. NOMENKLATUR

(soweit nicht im Text erläutert)

| | | |
|------------------|----------------------------|---|
| A_B | mm^2 | blockierter freier Querschnitt |
| A_{ges} | mm^2 | freier Strömungsquerschnitt eines Brennelementes |
| b | mm | Spaltweite eines Hüllschadens |
| c | 1 | Konzentration |
| c' | 1 | Konzentrationschwankung |
| c_p | $\text{J kg}^{-1}\text{K}$ | spezifische Wärme |
| c_w | 1 | Widerstandsbeiwert |
| D_c | m^2s^{-1} | Diffusionskonstante |
| d_h | mm | hydraulischer Durchmesser |
| G | J Md^{-1} | Bildungsenthalpie |
| g | ms^{-2} | Erdbeschleunigung |
| ΔH | 1 | Häufigkeitssummenanteil |
| M | kg | Totwassermasse |
| \dot{m} | kg s^{-1} | Massenstrom |
| P | 1 | Wahrscheinlichkeit |
| Δp | mm WS | Druckdifferenz |
| \dot{Q} | J s^{-1} | thermische Leistung |
| R_0 | 1 | Anzahlrückstand |
| R_3 | 1 | Volumenrückstand bei $\rho = \text{const}$ |
| Re | 1 | Reynoldszahl |
| S | mm^2 | Oberfläche |
| S'_V | mm^{-1} | auf ein Pelletvolumen bezogene spezifische Oberfläche einer Kornverteilung |

| | | |
|----------------|---|--|
| T | K | Temperatur |
| t | s | Zeit |
| U | 1 | Unterkanalanzahl |
| u | ms ⁻¹ | Geschwindigkeit |
| u' | ms ⁻¹ | Schwankungsgeschwindigkeit |
| V | mm ³ | Volumen |
| \dot{V}_1 | m ³ h ⁻¹ | Flüssigkeitsdurchsatz in der Hauptströmung |
| \dot{V}_2 | dm ³ h ⁻¹ | Flüssigkeitsdurchsatz im Bypass |
| v | ms ⁻¹ | Geschwindigkeit |
| v' | ms ⁻¹ | Schwankungsgeschwindigkeit |
| x | mm | Koordinate |
| x_p | } mm | Korngröße |
| x_{max} | | |
| x_{min} | | |
| y | mm | Koordinate |
| Z | 1 | Zonennummer (Abb. 32) |
| z | mm | Koordinate in Hauptströmungsrichtung |
| α | s ⁻¹ | Zeitkonstante |
| ϵ | 1 | Porosität |
| $\bar{\theta}$ | K | Kühlmitteltemperatur, zeitl. gemittelt |
| λ | J s ⁻¹ m ⁻¹ K ⁻¹ | Wärmeleitfähigkeit |
| ν | m ² s ⁻¹ | kinematische Zähigkeit |
| ρ | kg m ⁻³ | Dichte |
| σ | 1 | Standardabweichung |
| τ | h | Austragungszeit |

| | | |
|-------------|-------------------------------|-----------------------|
| τ' | s | Zeitkonstante (Gl. 4) |
| \emptyset | $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ | Neutronenfluß |
| ψ | 1 | Sphärizität |

Indizes:

| | |
|-----|---|
| B1 | Blockade |
| f | Fluid |
| g | Grenzwert |
| i | variabler Index |
| K | Kühlmittel |
| O | in Blockadehöhe |
| P | Pellet |
| p | Partikel |
| s,x | Vergleich mit oberflächengleicher Kugel |
| v,x | Vergleich mit volumengleicher Kugel |
| v | volumenbezogener spezifischer Wert |

8. LITERATURVERZEICHNIS

- [-1_] USAEC Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants, USAEC, WASH-1400 (Draft), (Aug. 1974), (Rasmussen-Report)
- [-2_] D.Smidt, K.Schleisiek: Fast Breeder Safety Against Propagation of Local Failures, ANS Winter Meeting, San Francisco, USA, Nov. 17-21 (1975) (unveröffentlicht)
- [-3_] K.Gast: Die Ausbreitung örtlicher Störungen im Kern schneller Reaktoren und ihre Bedeutung für die Reaktorsicherheit, KFK 1380 (Mai 1971)
- [-4_] E.G.Schlechtendahl: Theoretical Investigations on Sodium Boiling in Fast Reactors, Nucl. Science and Eng., 41 (1970), pp. 99-114
- [-5_] P.Wirtz: Ein Beitrag zur theoretischen Beschreibung des Siedens unter Störfallbedingungen in natriumgekühlten Reaktoren, KFK 1858 (Okt. 1973)
- [-6_] K.Schleisiek: Natriumexperimente zur Untersuchung lokaler Kühlungsstörungen in brennelementähnlichen Testanordnungen, KFK 1914 (Febr. 1974)
- [-7_] J.B. van Erp, T.C.Chawla, H.K.Fauske: An Evaluation of Pin-to-Pin Failure Propagation in LMFBR Fuel Subassemblies, Proc.Int. Conf. Fast Reactor Safety, Beverly Hills, CA, USA (April 1974), pp. 615-640

- [-8_] K.Kummerer: Schnellbrüter-Brennstäbe mit Oxidbrennstoff, (1975)
(unveröffentlicht)
- [-9_] F.W.Peppler: Experimentelle Untersuchungen der Siedevorgänge mit Natrium in engen Kanälen und deren Anwendung auf schnelle Reaktoren, KFK-Ext.Ber. 8/72-1 (Feb. 1972)
- [-10_] M.A.Grolmes, R.E.Henry, H.K.Fauske: Transient Sodium Boiling in LMFBR Sub-assemblies under Loss-of-Flow Conditions, 6. Liq.Met.Boiling Working Group Meet., Risley, GB, Oct. 1-3 (1975)
- [-11_] D.Kirsch: Untersuchungen zur Strömungs- und Temperaturverteilung im Bereich lokaler Kühlkanalblockaden in Stabbündel-Brennelementen, KFK 1794 (Mai 1973)
- [-12_] D.Geithoff: Brennstoff-Ausschwemmungen aus defekten UO_2/PuO_2 -Mischoxid-Brennstäben, Reaktortagung des DATF, Nürnberg (1975), pp. 455-458
- [-13_] J.van Miegroet, et.al: Design and Preparation of the Mol 7B Irradiation Experiment, IAEA Symp. on Fuels and Fuel Elements for Fast Reactors, Brussels, Juli 2-6 (1973), Paper SM-173
- [-14_] H.Kwast: Post Irradiation Examination of Fast Reactor Fuel Pins Irradiated in a Sodium Environment up to about 55 MWd/kg UO_2 , RCN-197 (Nov. 1973)

- [-15_] ANL-RDP-25 (Feb. 1974), pp. 7.8-7.14
- [-16_] C.N.Craig, et.al: Behaviour of Failed Fuel, Proc.Int.Conf.Engineering of Fast Reactors for Safe and Reliable Operation, Karlsruhe (1972), pp. 605-625
- [-17_] W.Kramer, et.al: Kühlmittel-Blockade-Experimente im BR-2 (Mol 7C), KFK 1274/4, (Mai 1975), pp. 123-125
- [-18_] R.Semeria: CEN Grenoble, persönliche Mitteilung
- [-19_] H.Mizuta: Fragmentation of Uranium Dioxide after Molten Uranium Dioxide-Sodium Interaction, J.Nucl.Sc.Techn., 11 (11) (Nov. 1974), pp. 480-487
- [-20_] H.Kwast: RCN Petten, persönliche Mitteilung
- [-21_] L.Caldarola: A Theoretical Model with Variable Masses for the Molten Fuel-Sodium Thermal Interaction in a Nuclear Fast Reactor, Nucl.Eng.Design, Vol.34, No.2 (Nov. 1975), pp. 181-201
- [-22_] D.Geithoff: GfK, Karlsruhe, persönliche Mitteilung
- [-23_] F.Hofmann: Geschwindigkeits- und Temperaturfelder in Brennstabbündeln symmetrischer und asymmetrischer Geometrie, KFK 1653 (Jan. 1973)

- [-24_] A.van der Putten, et.al: On Fuel Pin Bowing under LMFBR Conditions, Proc.Int.Conf. Fast Reactor Safety, Beverly Hills, CA, USA (April 1974), pp. 664-676
- [-25_] K.Ehrlich, R.Groß: Das neutroneninduzierte und simulierte Schwellverhalten stabili-sierter Stähle, Reaktortagung des DATF, Berlin (1974), pp. 348-351
- [-26_] H.Buchner: Untersuchung der hydrodynamischen Vorgänge beim Blockadewachstum in Brennelementbündeln, Diplomarbeit, Inst.f.Reaktor-technik, Universität Karlsruhe (TH), (1975)
- [-27_] S.Jacobi, W.Kramer, K.Schleisiek: Zur Frage der Pin zu Pin-Schadenspropagation in natriumgekühlten schnellen Brutreaktoren, KFK 2047, (Feb. 1975)
- [-28_] ANL-RDP-27, April 1974, p. 7.8
- [-29_] P.Menzenhauer, W.Peppler, H.Will: Simulation einer Brennstoff-Natrium-Reaktion mit Thermit, KFK 1275/3 (im Druck)
- [-30_] P.Weimar: Zerstörungsfreie Nachuntersuchung des Mol 7B-Bündels, KFK 1275/2, 112-32/35
- [-31_] F.Bauer: GfK, Karlsruhe, persönliche Mitteilung
- [-32_] H.Kleykamp: Folgerungen aus den Mikrosondenuntersuchungen an bestrahlten UO_2PuO_2 -Brennstäben für das SNR-300-Brennstabverhalten, Reaktortagung des DATF, Nürnberg (1975), pp. 451-454

- [⁻33_] M.Cramer, B.Dorr: Modelleexperimente zum Brennstabverhalten unter Siedeverzug in Natrium, KFK-Ext.Ber. 8/75-3 (Nov. 1975)
- [⁻34_] R.W.Ohse, M.Schlechter: Die Bedeutung des Cäsiums in der Hüllrohrkorrosion austenitischer Stähle oxidischer schneller Brüter-Brennstoffe, Reaktortagung des DAtF, Karlsruhe (1973), pp. 279-282
- [⁻35_] W.Dienst et.al: Auswertung von Untersuchungsergebnissen an bestrahlten UO₂-PuO₂-Brennstäben, Reaktortagung des DAtF, Karlsruhe (1973), pp. 295-298
- [⁻36_] D.Geithoff, W.Ernst: Auswertung der Spaltcäsium-Gamma-Profile an den Rapsodie-Brennstäben, KFK 1275/2, pp. 112-36/37
- [⁻37_] D.Geithoff: Zerstörungsfreie Nachuntersuchung der Rapsodie-Stäbe, KFK 1273/4, pp. 112-37/40
- [⁻38_] W.van Witzenburg, H.Kwast: Stress-Rupture Tests on Fast Breeder Fuel Cladding Tubes at Temperatures near 1000^oC, RCN-Report 193
- [⁻39_] D.Geithoff: Abbrandbestrahlungen im schnellen Fluß: Experiment DFR-435, KFK 1272/2, pp.112-71/73
- [⁻40_] R.Möller et.al: Lokale fluid- und thermodynamische Untersuchungen in Bündelgeometrien, KFK 1275/4, Pkt. 1263.3 (1975) (in Druck)

- [-41_] F.C.Engel, A.A.Bishop: Experimental Determination of Local Heat Transfer Coefficient in an Annular Sodium Flow Passage at and near a Flow Obstruction, Liq.Met. Heat Transf. and Fluid Dynamics, ASME Winter-Meeting, New York (1970), pp. 50-57
- [-42_] R.Ladisch: GfK Karlsruhe, persönliche Mitteilung
- [-43_] A.M.Judd: Measurements of Flow near a Blockage in a Pin Bundle, 6. Liq.Met. Boiling Working Group Meet., Risley, GB, Oct. 1-3 (1975)
- [-44_] U.Borgstedt: GfK Karlsruhe, persönliche Mitteilung
- [-45_] D.Kirsch: Bestimmung mittlerer Kühlmitteltemperaturen im Totwasser hinter lokalen Kühlkanalblockaden in natriumgekühlten Reaktoren, Reaktortagung des DATF, Karlsruhe (1973), pp. 174-177
- [-46_] P.Basmer, D.Kirsch, G.F.Schultheiß: Phänomenologische Untersuchungen der Strömungsverteilung hinter lokalen Kühlkanalblockaden in Stabbündeln, KFK 1548 (Jan. 1972)
- [-47_] P.Basmer, GfK Karlsruhe, persönliche Mitteilung
- [-48_] A.W.Quick: Ein Verfahren zur Untersuchung des Austauschvorganges in verwirbelten Strömungen hinter Körpern mit abgelöster Strömung, DVL-Bericht Nr. 12 (1956)

- └⁻49_7 G.Winterfeld: Versuche über Rezirkulationsströmungen in Flammen, Ztschr.f.Flugwissenschaft, 10, 5.168-178; DVL-Bericht Nr. 219 (1962)
- └⁻50_7 T.Krings: Experimentelle Ermittlung des integralen Massenaustausches in Totwasserbereichen von örtlich gestörten Brennelementbündeln, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (Sept. 1971)
- └⁻51_7 I.Hauffe: Hydrodynamische Untersuchungen an Totwasserbereichen in Bündelgeometrien, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (Juni 1972)
- └⁻52_7 H.Nabizadeh: Konstruktion und Erprobung einer Versuchseinrichtung zur Ermittlung von Totwasserbereichen in örtlich gestörten Brennelementbündeln, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (1970)
- └⁻53_7 K.Gast, E.G.Schlechtendahl: Schneller Natriumgekühlter Reaktor Na 2, KFK 660 (Okt. 1967)
- └⁻54_7 G.Steinhaus: Konstruktion einer beheizbaren Versuchsstrecke für Totwasseruntersuchungen in Brennstabbbündeln, Studienarbeit, Universität Karlsruhe (März 1972)
- └⁻55_7 G.Grötzbach: Messung der Temperaturverteilung im Totwasserbereich lokaler Blockaden in einem Brennelementmodell, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (Aug. 1972)

- [-56_] P.Basmer, B.Dorr, D.Kirsch, R.Meyder,
K.Schleisiek: Experiments on Local Blockages,
6. Liq.Met. Boiling Working Group Meeting,
Risley, GB, Oct. 1-3 (1975)
- [-57_] A.D.Gosman, R.Herbert, S.V.Patankar,
R.Potter, D.B.Spalding: The SABRE Code for
Prediction of Coolant Flows and Temperatures
in Pin Bundles Containing Blockages,
Paper No. 82. Proc.Int.Meet. Reactor Heat
Transfer, Karlsruhe (1973)
- [-58_] R.Herbert, D.Kirsch: A Comparison of
Temperature Distributions Calculated by the
SABRE Programme with Experimental Results,
KFK 2205, AEEW-R 987 (Juli 1975)
- [-59_] E.G.Schlechtendahl (Hrsg.): Sechster REGENT-
Halbjahresbericht, KFK-Ext.Ber. 8/74-5
(1974)
- [-60_] K.Schleisiek: Experimentelle Untersuchungen
zum Natriumsieden in einem elektrisch
beheizten Siebenstabbündel, Reaktortagung
des DAtF, Nürnberg (1975), pp. 157-160
- [-61_] F.Huber, H.Brüggemann, I.Kornelson:
Untersuchungen zum Sieden in großen Bündeln,
KFK 1275/1, EUR 5202d (Juli 1975),
pp. 123-37/38
- [-62_] K.Schleisiek: Lokales Sieden in einem 60°-
Bündelausschnitt im RCN Petten, KFK 1272/1,
EUR 4844d (Juni 1972), pp. 123-3/4

- └63_7 Chr.Sauer: Untersuchung des Strömungsverhaltens und der Betriebskennlinien einer porösen Blockade in einem Stabbündelmodell, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (1975)
- └64_7 S.Kiesskalt: Verfahrenstechnik, Carl Häuser-Verlag, München, 3. Aufl. (1958)
- └65_7 H.Rumpf: Mechanische Verfahrenstechnik, Carl. Häuser-Verlag, München-Wien, 3. Aufl. (1975)
- └66_7 H.Schlichting: Grenzschicht-Theorie, Braun-Verlag, Karlsruhe, 5. Aufl. (1965)
- └67_7 A.Franke: Untersuchung des Abscheideverhaltens von Partikeln an Gitterabstandshaltern in Brennelementbündel, Diplomarbeit, Inst.f.Reaktortechnik, Universität Karlsruhe (TH), (1976)
- └68_7 F.Pasquill: Atmospheric Diffussion, D. van Nostrand Co. Ltd., London (1962)
- └69_7 K.Schleisiek: GfK, Karlsruhe, persönliche Mitteilung
- └70_7 S.Jacobi: Freisetzung und Nachweis von Spaltprodukten aus defekten Brennstäben im HSD-Loop des FR2, KFK-Nachrichten, 7. Jahrg., Heft 2 (1975), S.19-27
- └71_7 H.Kleykamp: GfK, Karlsruhe, persönliche Mitteilung

- [⁻72_7 F.Weinberg: Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik sowie Anwendungen im Operations Research, Springer-Verlag, Berlin-Heidelber -New York (1968)
- [⁻73_7 K.Leschonski: Theorie der Teilchengrößenanalyse, Inst.f.Mech.Verfahrenstechnik, Universität Karlsruhe (TH), Kursunterlage Kontaktstudium (1971)
- [⁻74_7 H.Böhm, W.Dienst, K.Kummerer:
Arbeiten zur Brennelement-Entwicklung für den schnellen Brutreaktor SNR-300,
KFK 1999 (Sept. 1974)
- [⁻75_7 W.J. McCarthy Jr., W.H.Jens: A Review of the Fermi Reactor Fuel Damage Incident and a Preliminary Assessment of its Significance to the Design and Operation of Sodium Cooled Reactors. Int.Conf. on the Safety of Fast Reactors, Aix-en-Provence, Sept. 19-22 (1967)